

동조질량 감쇠기에 의한 건물 바닥판의 연직진동제어

The Control of Vertical Vibration of Building Slabs using Tuned Mass Dampers

이 동 근* 김 진 구** 안 상 경***
Lee, Dong Guen Kim, Jin Koo Ahn, Sang Kyoung

국문요약

기계설비가 설치되어 있는 건축구조물의 바닥판은 기계설비의 진동이 미소하다 하더라도 공진이나 맥놀이(beatting)현상에 의하여 큰 진동이 발생할 수 있다. 이러한 진동은 감쇠장치의 일종인 동조질량감쇠기를 이용하여 효과적으로 저감시킬 수 있다. 그러나 진동저감 효과는 동조질량감쇠기의 설치위치 및 진동수에 많은 영향을 받는다. 특히 하중의 위치에 따라서 건축구조물의 동적거동은 많은 차이를 보이기 때문에 동조질량감쇠기의 위치결정이 중요한 변수가 된다. 그러므로 본 논문에서는 건축구조물의 바닥판에 대하여 하중의 위치에 따른 동조질량감쇠기의 위치와 동조진동수 결정방법에 대하여 연구하였으며, 가진층(加振層)뿐만 아니라 비가진층(非加振層)의 진동저감에 대해서도 연구하였다. 정상상태 응답을 효율적으로 구하기 위하여 벡터합성법 및 대형 요소를 사용하였으며, 구조물의 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있는 동조질량감쇠기의 위치 및 동조진동수를 찾을 수 있었다.

주요어 : 동조질량감쇠기, 진동저감, 동조질량감쇠기의 위치, 정상상태에서의 응답

ABSTRACT

The floors of building structures equipped with vibrating machines can be susceptible to large vibration as a result of resonance or beating. Such a vibration can be reduced efficiently by using tuned mass dampers. However, the effectiveness of the damper depends greatly on the location and the natural frequency of the damper. To determine the optimum damper location is especially important since the dynamic behavior of a building structure varies with the location of the input loading. To this end, it is intended to decide the location and natural frequency of tuned mass dampers for reducing vibration of both loaded floors and floors located nearby the loaded floors considering the location and frequency components of the loading. The Vector composition method and the super elements are used to obtain the responses in steady states, and the optimum damper location and natural frequencies were found with the given damper mass

Key words : tuned mass damper, reducing vibration, damper location, response in steady state

1. 서 론

기계설비가 설치되어 있는 건축구조물의 바닥판은 기계의 가동으로 인하여 많은 진동이 발생한다. 기계의 가동으로 발생하는 하중의 종류는 기계설비의 구조와 배치에 따라 달라지며 아무리 정교하게 제작된 기계설비라 할지

라도 어느 정도의 동적하중이 발생한다. 이러한 기계설비에 의하여 유발되는 동적하중은 크게 연직방향과 수평방향의 동적하중으로 구분될 수 있으며, 건축구조물의 바닥판에 많은 영향을 주는 것은 연직방향의 하중이 주류를 이루고 있다. 하지만 기계설비에서 발생하는 진동이 미소하다 하더라도 공진이나 맥놀이(beatting)현상이라는 구조물의 특이한 동적거동으로 인하여 구조물에 큰 진동이 발생할 수 있으며, 구조물의 사용성 및 안정성에 매우 심

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 전임강사

*** 성균관대학교 건축공학과 박사과정

각한 문제를 발생시킬 수도 있다. 이러한 진동은 감쇠장치의 일종인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, 이하 TMD)를 이용하여 효과적으로 저감시킬 수 있다. 그러나 TMD에 의한 진동저감 효과는 TMD의 설치 위치 및 동조진동수에 많은 영향을 받는다.

현재까지 국내 및 국외에서 발표된 TMD에 관한 연구는 주로 수평방향의 진동제어에 국한되어있으며 연직방향의 진동제어에 관한 연구는 많지 않다. Setareh와 Hanson⁽¹⁾은 TMD를 이용한 건물 바닥판의 진동제어에 대하여 연구하였으며, 발코니에서 발생하는 진동에 대하여 구조물을 등가의 캔틸레버로 치환하여 단자유도계로 가정하고 TMD의 설치위치 및 진동수를 결정하여 진동제어를 하였다. 기존의 연구에서는 TMD의 최적화를 위하여 주로 구조물을 단자유도계로 단순화시켜 건축구조물에서와 같이 여러 층으로 이루어지고 많은 자유도를 가지는 경우에 대해서는 적용하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구를 바탕으로 하여 건축구조물에서 TMD의 위치와 동조진동수의 결정 방법에 대하여 연구하였다. 이를 위하여 모드별 응답속도, 각 자유도에 대한 응답속도 및 구조물의 모드형상을 비교하였다. 또한 효율적인 해석을 위하여 행렬응축기법과 주자유도 선택기법을 이용하였으며, 각 모드에 의하여 발생하는 응답속도를 벡터합성법에 의하여 효율적으로 계산할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 구조물의 동적해석

기계의 가동으로 인하여 발생하는 기계진동 하중의 경우에는 조화하중의 형태로 가정할 수 있다. 일반적으로 기계가 가동되기 시작할 때는 천이상태 응답이 지배적이며 계속적인 운전상태에서는 정상상태 응답이 지배적이다. 기계 가동시에 발생하는 천이상태 응답은 일반적으로 매우 단시간에 발생하기 때문에 구조물에는 큰 영향을 주지 않는다. 또한 천이상태 응답은 기계의 시동방법 등을 이용하여 줄일

수 있지만 정상상태 응답은 줄이기가 어렵다. 따라서 기계설비가 있는 건축구조물은 사용성 및 안전성 측면에서 천이상태 응답보다는 정상상태 응답이 더 지배적이라는 것을 알 수 있다.

2.1 기존의 해석 방법

일반적으로 구조물의 운동방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M \ddot{D} + C \dot{D} + KD = A \quad (1)$$

여기서, M , C 와 K 는 n 개의 자유도를 가지는 $n \times n$ 의 질량 행렬, 감쇠 행렬과 강성 행렬을 나타낸다. 또한 D 와 A 는 각각 변위 벡터와 하중 벡터를 나타내며 하중은 식(2)와 같이 조화함수로 가정하였다.

$$A = P \cos \Omega t \quad (2)$$

여기서 하중의 크기를 나타내는 P 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \{ P_1, P_2, P_3, \dots, P_n \} \quad (3)$$

식 (1)을 일반화된 모드(normal mode)로 정규화(normalization) 시키면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4)는 각 모드에 대하여 독립적이므로 해는 단자유도계에서의 해와 같아지며 각 모드에 대한 해를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\ddot{u}_{Ni} + 2n_i \dot{u}_{Ni} + \omega^2 u_{Ni} = a_{Ni} \cos \Omega t \quad (4)$$

$$u_{Ni} = a_{Ni} \beta_i \cos(\Omega t - \theta_i) \quad (5)$$

식 (5)에서 각 항은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} a_{Ni} &= \Phi_{Ni}^T P \\ \beta_i &= \frac{1}{\sqrt{(\omega_i^2 - \Omega^2)^2 + (2\gamma_i \omega_i \Omega)^2}} \\ \theta_i &= \tan^{-1} \left(\frac{2\gamma_i \Omega / \omega_i}{1 - (\Omega / \omega_i)^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식 (5)는 정규좌표계(normal coordinates)에서의 변위이며, 실제 좌표계에서 i 번째 모드에 대한 변위는 식 (7)의 관계를 이용하여 얻을 수 있다.

$$D_i = \phi_{N_i} u_{N_i} \quad (7)$$

여기서 하중이 특정한 k 자유도에 작용한다면 식 (2)와 식 (3)의 관계를 이용하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \{0, 0, P_k \cos \Omega t, 0, \dots, 0\} \quad (8)$$

위의 식 (7)에 식 (8)과 식 (5)를 대입하면 식 (9)과 같아지며, k 자유도에 하중이 가해질 때 i 번째 모드에 의하여 발생하는 j 절점에서의 변위를 나타내게 된다.

$$D_{jki}(t) = \phi_{ji} \phi_{ki} \beta_i P_k \cos(\Omega t - \theta_i) \quad (9)$$

그러므로 n 개의 자유도를 가지는 구조물에서의 변위는 1차에서 n 차 모드까지 모두 더하면 식 (10)과 같이 된다.

$$D_{jk}(t) = \sum_{i=1}^n A_{jki} \cos(\Omega t - \theta_i) \quad (10)$$

위의 식 (10)에 나타낸 A_{jki} 는 다음과 같다.

$$A_{jki} = \phi_{ji} \phi_{ki} \beta_i P_k \quad (11)$$

2.2 벡터합성법을 이용한 해석 방법

앞 절에서 살펴본 식 (10)은 기존의 해석 방법을 나타내며 여기서 최종적인 응답은 각 모드에 대하여 시간 간격으로 원하는 만큼의 시간까지를 계산하여 중첩함으로써 얻을 수 있다. 그러나 이러한 방법은 시간 간격이 많아지면 많아질수록 해석시간이 길어지는 단점이 있으며, 최대값만을 구하고자 할 때에는 비효율적인 방법이라고 할 수 있다. 그러므로 본

논문에서는 식 (10)을 개선하여 비교적 간단한 방법으로 응답을 얻을 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

각 모드에 대한 응답의 크기를 나타내는 식 (10)의 A_{jki} 는 $\cos(\Omega t - \theta_i)$ 항의 위상각 θ_i 때문에 간단히 더할 수 없다. 그러므로 각 모드에 대한 위상각을 고려하기 위하여 벡터합성법을 이용하면 다음과 같다. 식 (10)에서 1차 모드부터 n 차 모드까지를 합성한 크기를 α_{jk} 라 한다면 α_{jk} 는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{jk} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_{jki} \sin \theta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n A_{jki} \cos \theta_i\right)^2} \quad (12)$$

여기서 위상각은 다음과 같다.

$$\theta_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{jki} \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n A_{jki} \cos \theta_i} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 식 (10)에 대입하면 식 (14)와 같이 단순화시킬 수 있다.

$$D_{jk}(t) = \alpha_{jk} \cos(\Omega t - \theta_{jk}) \quad (14)$$

여기서 식 (14)를 식 (10)과 비교하면, 식 (10)에 나타낸 A_{jki} 는 i 번째 모드에 의한 응답의 크기를 나타내는 반면 식 (14)의 α_{jk} 는 각 모드의 영향을 모두 고려한 값이 된다. 그러므로 응답을 구할 때 식 (10)을 사용하는 것보다 식 (14)를 사용하는 것이 연산횟수가 줄어들어 더 효율적인 해석이 된다.

지금까지는 조화하중이 작용할 경우에 대하여 식 (14)를 유도하였다. 하중이 주기함수의 형태로 작용할 경우는 주기함수를 $f(t)$ 라 하면 식 (2)에 나타낸 작용 하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = F(t) = P f(t) \quad (15)$$

여기서 P는 식 (2)와 같고 $f(t)$ 는 식 (16)과 같은 푸리에 급수(Fourier series)형태로 나타낼 수 있으며 각각의 하중에 대하여 나누어 계산할 수 있다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos i\Omega t + b_i \sin i\Omega t) \quad (16)$$

위의 식 (14)는 식 (16)의 관계를 이용하면 다음의 식 (17)과 같아진다.

$$D_{jk} = a_{jkl}a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_{jkl}a_i \cos(i\Omega t - \theta_{jki}) + \sum_{i=1}^{\infty} a_{jkl}b_i \sin(i\Omega t - \theta_{jki}) \quad (17)$$

위의 식 (17)은 앞에서 언급하였듯이 하중의 진동수 성분과 크기에 따라서 계산하면 된다. 즉 주기하중은 여러 개의 조화하중이 위상각을 가지고 결합되어 있는 형태로 가정할 수 있으며, 구조물의 응답 또한 여러 개의 조화하중에 의한 응답을 중첩시켜 주기하중의 응답을 계산할 수 있다.

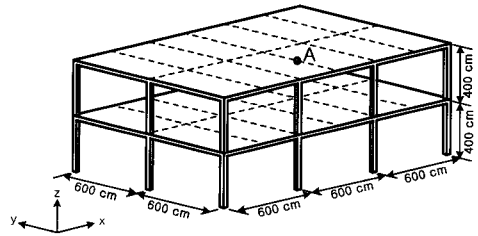
3. 예제 해석

건축구조물에서 바닥판에 하중이 작용하게 될 때 하중의 위치와 가진 진동수에 따라서 구조물의 동적 응답은 많은 차이를 보이게 된다. 그러므로 TMD를 이용하여 진동을 저감시키고자 할 때는 하중의 위치에 따른 구조물의 동적응답을 파악할 필요가 있다. 특히 주기하중의 경우는 여러 개의 진동수 성분을 가지고 있기 때문에 구조물에서의 응답은 더욱 더 다양하게 발생한다.

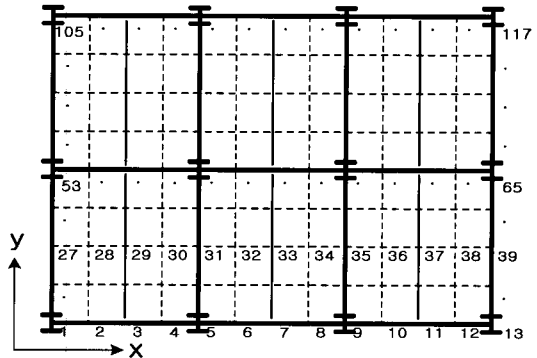
3.1 예제 구조물

하중의 위치에 따른 동적 거동을 비교하기 위하여 그림 1과 같은 예제 구조물을 이용하였다. 그림 1(a)는 예제 구조물의 형상을 나타내며 점선으로 표시된 부분은 바닥판을 지지하는 보를 나타낸다. 그림 1(b)와 (c)는 바닥판의 평면을 나타낸 것이며 굵은 실선으로 표시

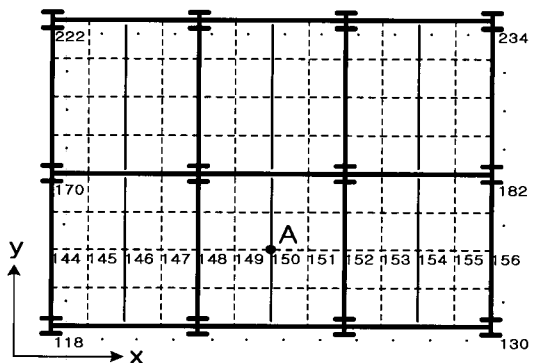
된 부분은 큰보, 보와 보를 연결하는 가는 실선은 작은보를 나타낸다. 또한 그림 1(b) 및 (c)에서 점선으로 표시된 부분은 유한요소해석을 위하여 바닥판을 요소분할 한 것이다. 그림에 나타낸 숫자는 절점 번호이며, 구조물의 응답속도를 비교한 절점이다. 절점 번호는 2층 바닥판부터 시작하여 옥상층의 바닥판까지 왼쪽에서 오른쪽으로 순차적으로 부여하였다.



(a) 예제 구조물의 형상



(b) 2층 바닥판 평면도



(c) 옥상층 바닥판의 평면도

그림 1 예제 구조물

본 연구에서는 효율적인 해석 및 모형화를 위하여 정적 및 동적 행렬응축기법과 대형요소(super element)⁽²⁾를 사용하였다. 부재의 단면 치수는 표 1과 같다.

표 1 부재의 단면 치수 (단위 : mm)

부재명	재료	단면 치수
기둥	steel	H-500×500×10×10
큰보	steel	H-600×500×10×10
작은보	steel	H-500×500×10×10
바닥판	concrete	두께 200

3.2 가진(加振) 하중

일반적으로 기계하중은 기계설비의 구조와 배치에 따라 달라지며 기계의 회전운동 또는 왕복운동 등에 의하여 발생한다. 회전운동의 경우는 기계의 회전속도에 따라서 기계하중의 진동수가 정해진다. 이러한 기계설비에 의하여 유발되는 하중이 바닥판에 작용할 경우에는 주로 연직방향의 하중이 구조물에 많은 영향을 준다. 그림 2에 나타난 것은 회전기계의 연직방향에 대한 가속도를 실측한 것으로써 가로축을 진동수로 나타낸 것이다.

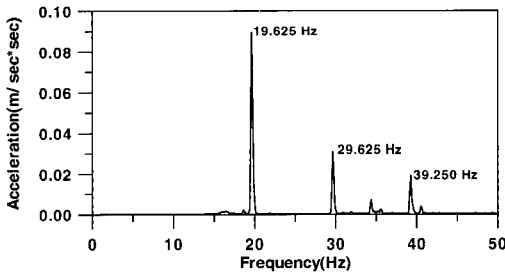


그림 2 회전기계에서 계측한 가속도

첫 번째 탁월진동수는 19.625Hz이며, 두 번째 및 세 번째 탁월진동수는 각각 29.625Hz, 39.250Hz이다. 회전모터의 회전수는 1200 R.P.M 이며, 진동수로 나타내면 20Hz가 된다. 그러나

실측에서 19.625Hz를 나타내는 것은 기계의 사용정도, 기계의 부하 및 윤회상태 등의 영향으로 인하여 실제보다 조금 낮은 값을 보인 것으로 생각된다. 진동 하중의 계측은 거의 불가능하기 때문에 본 연구에서 질량 1kg이 그림 2와 같은 가속도로 운동을 한다고 가정하여 가진 하중으로 사용하였으며, 위상차는 0°로 가정하였다. 또한 하중을 가진한 곳은 그림 1(a)와 (c)에 나타난 A점(절점 150)이며, 여러 모드의 영향에 의하여 응답이 결정되는 곳이기 때문에 선택을 하였다.

3.3 TMD의 모형화

예제에 사용한 TMD는 트러스요소에 질량을 첨가하는 방법을 사용하여 모형화 하였다. TMD의 진동수는 트러스요소의 축방향 강성을 조절하여 조율하였다. 단일 TMD의 질량은 기둥으로 둘러싸인 바닥판 질량의 1%로 가정하였으며 2개의 TMD를 설치할 경우에는 TMD의 질량비를 각각 0.5%로 가정하였다. 또한 구조물과 TMD의 합성구조물은 구조물을 유한요소로 모형화한 다음 TMD의 강성 및 질량을 첨가하는 방법을 사용하여 모형화 하였다.

3.4 예제 구조물의 정상상태 응답

본 절에서는 본 논문의 2장에서 유도한 식을 이용하여 가진점에 대한 정상상태 응답속도로 나타내었다. 응답속도로 나타낸 이유는 일반적으로 사람들은 진동수가 1~10Hz 일 때에는 최대가속도에 의하여 진동을 느끼게 되며, 10~100Hz일 때에는 최대 속도에 의하여 진동을 감지하기 때문이다.⁽³⁾ 그림 3은 본 논문에서 제안된 해석방법인 식 (14)와 기존의 해석 방법인 식 (10)을 이용하여 동일한 기준에서 해석하였을 때 각 절점에서의 최대응답속도를 비교한 것이다. 그림 3에 나타난 결과를 비교하여 보면 두 가지 방법이 모두 정확히 일치함을 알 수 있다.

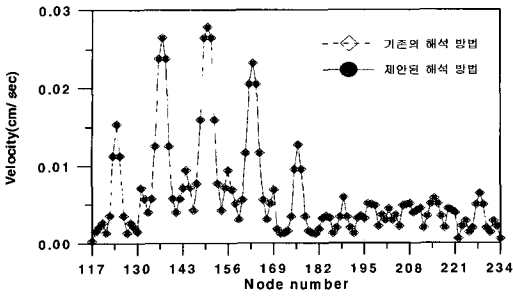
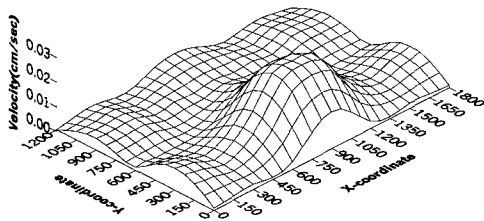


그림 3 각 절점에서 최대 응답속도의 비교

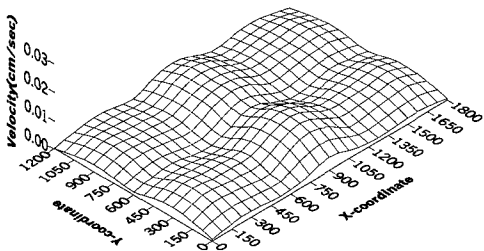
또한 표 2는 Petium 200Mhz, RAM 64M의 컴퓨터로 계산할 때의 해석방법에 따른 해석에 소요되는 시간을 비교한 것이다. 기존의 해석방법에 비하여 본 논문에서 제안된 방법이 매우 효율적이라는 것을 알 수 있다.

표 2 해석 시간의 비교

해석 방법	기존의 해석 방법	제안된 해석 방법
시간		
소요시간	11분 27초	5분 13초



(a) 옥상층 바닥판



(b) 2층 바닥판

그림 4 각 층에서의 최대 응답속도

그림 3에 나타난 각 절점에서의 최대응답속도를 3차원으로 나타내면 그림 4와 같으며 하층을 가한 A점에서 가장 큰 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. TMD를 이용한 바닥판의 진동저감

진동저감 효과는 TMD의 설치위치 및 진동수에 많은 영향을 받는다. 특히 하층의 위치에 따라서 건축구조물의 동적거동은 많은 차이를 보이기 때문에 TMD의 위치 결정이 중요한 변수가 된다. 이를 위하여 식 (17)을 이용하여 각 모드별 응답속도의 영향을 비교하였다. 또한 하층의 진동수 성분들이 응답에 영향을 주는 정도를 비교하였다.

표 3 예제구조물의 모드별 진동수(단위:Hz)

모드	진동수	모드	진동수	모드	진동수	모드	진동수
1	14.351	11	16.961	21	28.214	31	34.504
2	14.383	12	18.459	22	28.475	32	35.194
3	14.752	13	22.488	23	28.530	33	36.025
4	15.586	14	23.300	24	28.790	34	36.347
5	15.613	15	24.317	25	30.235	35	37.052
6	15.799	16	24.410	26	30.691	36	38.043
7	16.289	17	26.432	27	31.112	37	39.025
8	16.505	18	26.457	28	31.871	38	39.664
9	16.517	19	27.391	29	31.935	39	41.558
10	16.637	20	27.736	30	32.620	40	41.616

예제구조물의 연직방향 고유진동수를 나타내면 표 3과 같다. 하층과의 관계를 고려할 때 구조물의 12차, 25차 및 37차 모드가 많은 영향을 받을 것이라고 예상할 수 있다.

4.1 가진층(加振層)에서의 진동저감

하층이 가해지는 가진층에서의 진동저감을 위하여 TMD의 위치선정 및 진동수의 조율에 관하여 살펴보았다. 이를 위하여 먼저 단순한 조화하중이 작용할 때와 다음으로 주기하중이 작용할 때로 나누어 연구하였다.

(a) 조화하중이 작용하는 경우

작용하중은 그림 1에서처럼 첫 번째 최대값을 나타내는 진동수 성분인 19.625Hz 하중을 가하였다. 최대응답속도를 나타낸 절점은 그림 5와 같이 하중이 가진되는 150번 절점이다.

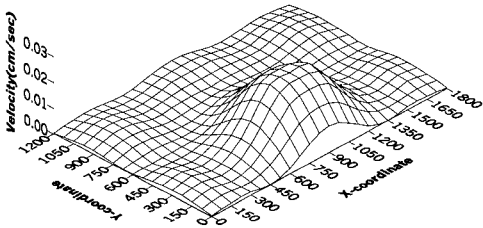


그림 5 최대응답속도

또한 구조물의 응답속도에 가장 큰 영향을 주는 모드는 식 (9)를 이용하여 간단히 구할 수 있으며, 그림 6에서와 같이 연직 8차 모드가 가장 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

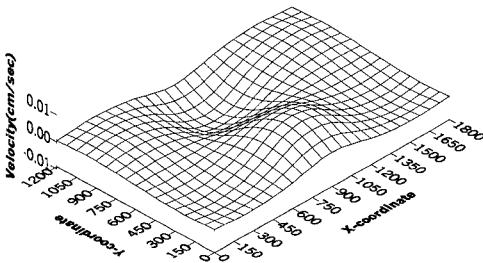


그림 6 8차 모드에 의한 응답

표 3을 보면 연직 8차 모드의 고유진동수는 16.505Hz이지만 하중의 진동수 성분과 더 가까운 12차 모드보다 8차 모드가 더 큰 영향을 주는 이유는 가진점이 모드형상에서 최대값을 가지는 곳이기 때문이라고 판단된다. 이것은 하중의 진동수가 구조물의 진동수와 일치한다 하여 공진이 발생하는 것이 아니라 가진되는 위치도 중요한 요소로 작용한다는 것을 의미

한다. 따라서 본 연구에서는 TMD의 위치 및 진동수에 따른 진동저감 정도를 비교하기 위하여 다음과 같이 TMD를 설치하였다.

표 4 모델의 종류

TMD 모델명	위치 (절점 번호)	동조진동수 (단위 Hz)
T1	150	19.625
T2	150	16.505
T3	150, 202	16.505
T4	150, 202	19.625

위의 표 4에서 나타낸 모델 T1은 응답속도가 가장 큰 곳인 절점 150에 TMD를 설치한 것이며 가진하중의 진동수인 19.625Hz에 TMD를 동조시킨 것이다. 모델 T2는 응답속도에 가장 큰 영향을 주는 모드의 진동수인 8차 모드에 TMD를 동조시킨 것이며 위치는 모드형상의 값이 최대가 되는 곳에 설치한 것이다. 모델 T1과 T2의 가장 큰 차이점은 TMD의 동조진동수이다. 모델 T3와 모델 T4도 같은 이유에서 정하였으며 TMD를 모드형상의 값이 최대가 되는 두 곳에 설치하였고 질량비는 각각 0.5%로 하였다. 모델에 따른 해석결과는 그림 7에 나타내었으며 모델 T1이 가장 좋은 진동저감효과를 보이고 있다. 그 다음으로는 T4가 진동저감효과가 좋음을 알 수 있다. 모델 T3와 T4의 해석결과를 비교하여 보면 TMD의 진동

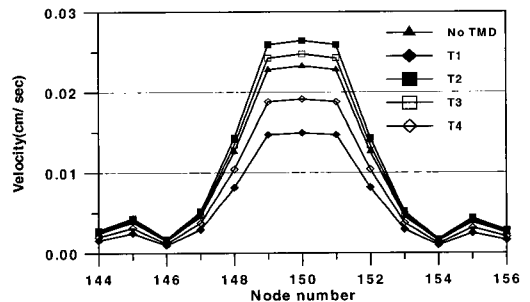


그림 7 TMD의 위치 및 진동수에 따른 응답

수를 하중의 진동수에 동조시키는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다. 또한 TMD의 위치에 있어서는 모델 T1과 T4를 비교함으로써 알 수 있는데, 모델 T1과 같이 구조물의 응답이 가장 큰 곳에 설치하는 것이 진동저감에 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

(b) 주기하중이 작용하는 경우

TMD에 의한 진동저감을 보다 일반적인 경우에 대하여 적용하기 위해서는 주기하중을 고려하여야 한다. 그림 2에 나타난 하중을 이용하여 각각의 진동수 성분이 구조물에 어느 정도의 영향을 나타내는지 분석하였다. 주기하중은 여러개의 조화하중이 조합되어 있는 것으로 볼 수 있으며 구조물의 응답은 조화하중들에 대한 선형합으로 나타낼 수 있다.

그러므로 TMD의 진동수도 구조물의 응답에 영향을 가장 많이 주는 진동수 성분인 19.625Hz에 동조시키는 것이 진동저감 효과가 가장 좋을 것이다. 이것을 확인하기 위하여 표 5에 나타난 모델을 설정하여 각 질점에 대한 응답속도를 비교하였다. 표 5에서 나타난 모델 T5에서 T7까지 TMD는 최대응답이 발생하는 질점 150에 설치하였다. TMD의 동조진동수는 모델 T5는 하중의 1차 진동수성분, 모델 T6는 하중의 2차 진동수성분이며 모델 T7은 하중의 3차 진동수성분에 동조시켰다.

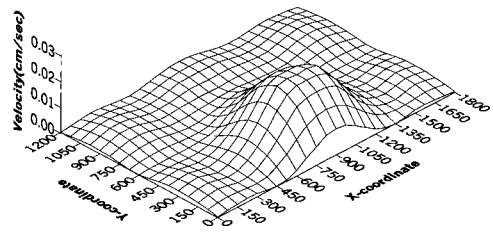
표 5 모델의 종류

모델명	TMD	위치 (질점 번호)	동조진동수 (단위 Hz)
T5		150	19.625
T6		150	29.625
T7		150	39.250

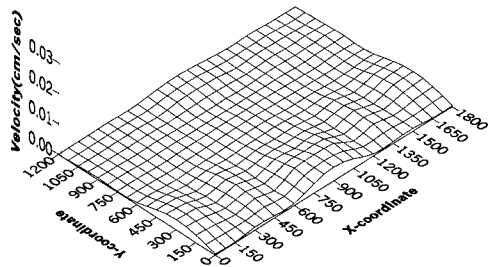
그림 8(a)~(c)는 기계하중 각각의 진동수성분에 대한 구조물의 응답속도를 나타낸 것이며, 하중의 1차 진동수성분이 작용할 때 가장

큰 응답이 발생함을 할 수 있다. 각 모델의 해석 결과는 그림 9에 나타내었으며, 진동저감효과가 가장 좋은 것은 모델 T5이다.

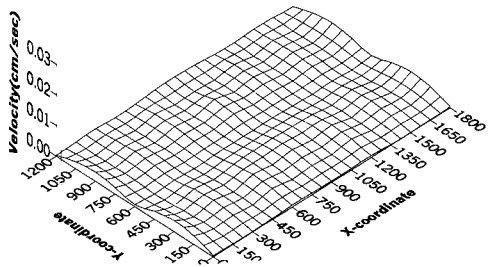
이것은 구조물의 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수성분에 대하여 TMD를 동조시켰기 때문이다. 즉 가장 큰 영향을 주는 하중성분에 의한 응답을 저감시킴으로써 구조물의 응답이 줄어든 것이다. 또한 그림 9에서 질점 146번 같은 경우는 모델 T7이 가장 적은 응답을 나타내고 있다.



(a) 진동수 19.625Hz하중이 작용할 때



(b) 진동수 29.625Hz하중이 작용할 때



(c) 진동수 39.250Hz하중이 작용할 때

그림 8 하중의 진동수에 따른 최대응답속도

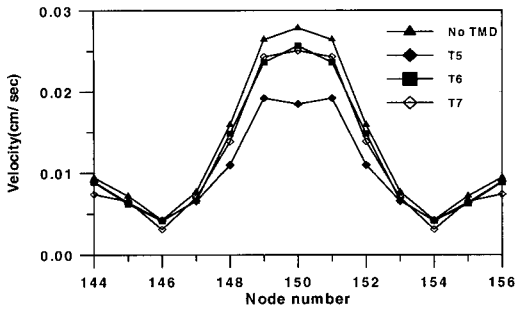


그림 9 TMD의 진동수에 따른 응답의 비교

이것은 그림 8(a)~(c)를 비교하여 보면 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분이 39.250Hz임을 알 수 있으며, TMD를 39.250Hz에 동조시킴으로서 절점 7에서의 응답이 줄어든 것으로 판단된다. 그러므로 이상에서의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

가진층에 있어서 진동을 저감시키고자 할 때에는 구조물의 응답이 가장 큰 곳에 설치하며, 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분에 대하여 TMD의 진동수를 동조시키면 효과적으로 진동을 저감할 수 있다.

4.2 비가진층(非加振層)에서의 진동저감

진동을 저감시키는 방법에는 진동저감 장치를 가진층에 설치하는 방법과 비가진층에 설치하는 방법이 있을 수 있다. 특정 층에서 임의의 위치에 진동에 민감한 기계가 있어 그곳만 진동을 줄일 필요가 있을 수 있다. 그러므로 본 절에서는 4.1절에서의 연구를 토대로 하여 비가진층에 대하여 TMD의 위치와 진동수 결정에 대하여 연구하였다. 하중은 그림 2에 나타난 하중을 사용하였으며, 응답속도의 최대값은 그림 3(b)에 나타내었다. 각 하중 성분 중 가장 큰 영향을 주는 진동수성분을 찾기 위하여 각 하중의 진동수 성분에 대하여 최대응답속도의 크기를 비교하였다. 구조물의 최대응답속도는 그림 10에 나타내었으며 19.625Hz의 하중성분이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 절점 1에서 절점 13까지는 39.250Hz

성분이, 절점 14에서 절점 65 사이에서는 19.625Hz 성분이 지배적이라는 것을 알 수 있다.

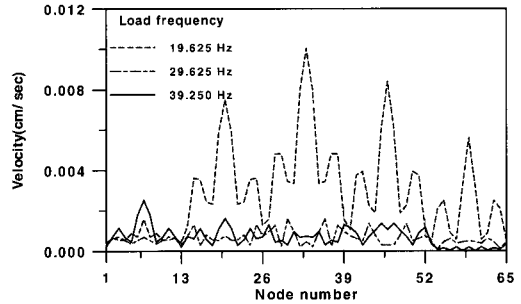


그림 10 하중의 진동수 성분에 따른 응답

(a) 절점 7에서의 진동저감

비가진층에 임의의 절점 7에서 진동문제가 발생하여 진동을 저감하고자 한다면 TMD를 어느 곳에 어떤 진동수로 설치를 해야 되는지에 대하여 살펴보았다. TMD의 위치와 진동수에 따른 진동저감 정도를 비교하기 위하여 다음과 같은 모델을 설정하였으며, 모델 T5와 비교하였다.

표 6에서 모델 T8은 진동을 저감하고자하는 절점 7에 TMD를 설치한 것이며, 그곳의 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분에 TMD를 동조시켰다. 모델 T9는 가진층에서 응답이 가장 큰 곳에 TMD를 설치하였으며 절점 7에 가장 큰 영향을 미치는 하중의 진동수 성분에 동조시킨 것이다.

표 6 모델의 종류

모델명 \ TMD	위치 (절점 번호)	동조진동수 (단위 Hz)
T8	7	39.250
T9	150	39.250

해석결과는 그림 11에 나타내었으며 동일한 진동수로 가진층에 TMD를 설치한 경우(모델 T9)와 진동을 저감하고자 하는 곳(절점 7)에 TMD를 설치한 경우(모델 T8)를 비교하여 보

면 절점 7에 대한 응답은 모델 T8이 진동저감 효과가 더 좋음을 알 수 있다. 그러나 다른 절점에서의 응답은 더 크게 나타나고 있다. 또한 모델 T5와 T8을 비교하여 보면 전체적인 진동저감 효과는 모델 T5가 좋지만 절점 7에 대해서는 역시 모델 T8이 진동저감효과가 좋음을 보여주고 있다. 그러므로 하중이 작용하는 층에 TMD를 설치하여 진동을 저감시키면 구조물 전체에서 응답이 줄어든다. 또한 특정 부위에 TMD를 설치하게 되면 그곳에서의 응답은 더 줄어들게 되지만 나머지 부분에서는 응답이 더 커질 수도 있다.

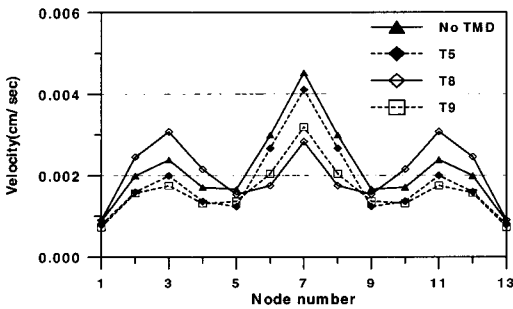


그림 11 절점 7에서의 응답 비교

(b) 절점 33에서의 진동저감

비가진층에서의 진동저감에 대하여 좀 더 비교해 보기 위하여 절점 33에 대하여 진동을 저감시키기 위하여 모델을 다음과 같이 설정하였다.

표 7에서 모델 T10은 진동을 저감하고자 하는 절점 33에 TMD를 설치한 것이며 그곳의 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분에 TMD를 동조시킨 것이다. 또한 모델 T11은 가진층에서 응답이 가장 큰 곳에 TMD를 설치한 것이며, 절점 33에 가장 큰 영향을 미치는 하중의 진동수 성분에 TMD를 동조시킨 것이다. 해석결과는 그림 12와 같으며 위의 4.2(a)절에서와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 이상에서의 결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

표 7 모델의 종류

모델명 \ TMD	위치 (절점 번호)	동조진동수 (단위 Hz)
T10	33	19.625
T11	150	19.625

하중이 가진되지 않는 비가진층에 있어서 TMD를 설치하게 되면 설치한 곳을 중심으로 하여 주위는 진동이 많이 저감되지만 다른 부분에서는 진동이 커질 수도 있다. 또한 TMD의 동조진동수는 설치할 곳의 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분에 대하여 동조시키면 효과적으로 진동을 저감할 수 있다.

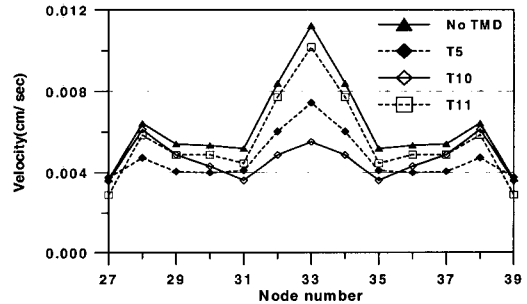


그림 12 절점 33에서의 응답 비교

5. 결 론

본 연구에서는 TMD를 이용하여 건축구조물에서 하중이 가진되는 가진층과 가진되지 않는 비가진층에 대하여 TMD의 설치위치와 동조시킬 진동수를 결정하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 논문에서 유도한 식 (17)을 사용하면 정상 상태에서의 응답을 효율적으로 구할 수 있다.
- 2) 가진층에서의 TMD를 이용한 진동저감
 - TMD의 위치 : 응답이 가장 큰 곳에 설치하는 것이 효과적이다.

- TMD의 동조진동수 : 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분에 동조시키는 것이 효과적이다.
- 3) 비가진층에서의 TMD를 이용한 진동저감
- TMD의 위치 : 저감하고자하는 곳에 TMD를 설치하는 것이 효과적이다.
 - TMD의 동조진동수 : 진동을 저감하고자하는 부분의 응답에 가장 큰 영향을 주는 하중의 진동수 성분으로 TMD를 동조시키는 것이 효과적이다.
- 4) 구조물의 전체에 대하여 진동을 저감하고자 할 때에는 가진층에 TMD를 설치하는 것이 효과적이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Setareh, M. and Hanson, R.D., "Tuned Mass Damper for balcony vibration control," *J. Struct. Engng*, Vol. 118, No. 3, March, 1992.
2. 이동근, 안상경, 김태호, "건축구조물의 효율적인 연직진동 해석", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제2호, 1998. 6, pp. 23-34.
3. Bachmann, H., et al., *Vibration problem in structures*, Birkhauser, 1995, pp. 216.
4. Petyt, M., *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*, Cambridge University Press, 1990, pp. 391~401.
5. Weaver, W., Jr. and Johnston, P.R., *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice-Hall, Inc., 1987.
6. Weaver, W., Jr. and Gere, J.M., *Matrix. Analysis of Framed Structure*, Van Nostrand Reinhold, 1980.