건물 바닥판의 진동제어를 위한 동조질량감쇠기의 조율
Tuning of TMDs for Control of Floor Vibration

이 동 근* 최 원 호** 안 상 경***
Lee, Dong-Guen Choi, Won-Ho Ahn, Sang-Kyoung

ABSTRACT

Floors in a structure are often subject to periodic forces which induce excessive oscillations. For control of such oscillations, TMDs (Tuned Mass Dampers) have been widely used and prooved effective. But it is very difficult to estimate the natural frequency of a TMD when it is installed to a structure. Therefore to achieve the TMD properties that are required for satisfactory performances of the structure, it is necessary to tune the TMDs to the optimal state. This paper is intended to suggest the efficient tuning method for simple and economically designed TMDs and to investigate the validity of the method by installing TMDs to a real structure.

1. 서 론

일반적으로 기계 설비들이 설치되어 있는 건축물의 바닥판에서는 기계의 가동으로 인하여 많은 진동이 발생하는데 이러한 기계들은 대부분 연직방향, 수평방향, 그리고 회전방향으로 운동을 하며 진동을 일으킨다. 기계 진동으로 인한 바닥판의 진동제어를 위해서는 감쇠장치(damper device)의 특수한 형태인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, 이하 TMD)를 이용하여 바닥판의 진동을 효과적으로 저감할 수 있다는 것이 연구되어진 바 있다. TMD에 의한 진동제어는 구조물에서 진동을 일으키는 기계의 고유진동수를 파악하여 이와 동일한 진동수를 가지는 질량을 구조물에 부착시킴으로써 이 보조적인 질량이 진동을 일으켜 구조물의 진동을 저감시키는 방법이다.

그러나, 이러한 진동제어를 위하여 구조물에 설치되는 TMD는 강성, 질량 그리고 고유진동수 등이 설치하기 전 설계된 값들과 구조물에 설치되었을 경우의 값들과는 다를 수가 있다. 그 이유는 구조물에 설치되는 TMD의 경우는 보와 바닥판 등의 연성(flexibility)의 영향으로 인하여 고유진동수가 달라질 수 있으며, TMD를 제작하는 과정에서도 강성 및 질량의 오차가 발생할 수 있기 때문이다. 그러므로 원하는 TMD의 고유진동수를 정확히 구하기 위해서는 보와 바닥판 등의 연성이 고려된 고유진동수로 반드시 조율을 하여야 한다. 실제 선진국 등에서 사용되고 있는 TMD의 조율 장치는 요구되는 진동수 대역(frequency bandwidth)을 자유롭게 조정할 수 있는 특수한 장치를 사용하고 있지만, 이러한 장치는 원리가 복잡할 뿐만 아니라 구조물에 설치하는데 있어 많은 비용이 든다는 단점이 있다.

이러한 이유 때문에 TMD를 간단하게 설계함으로써 경제적으로 제작하여 사용할 수 있는데, 설

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교 수
** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 석사과정
*** 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정

치된 TMD가 정확한 고유진동수를 갖도록 하기 위해서는 설치되기 전 TMD의 실제 크기를 고려하여 완전한 강체로 된 기초를 만든 후에 정확한 실험을 통하여 조율을 하여야 한다. 그러나 이러한 과정을 통하여 조율이 되더라도 실제 보 및 바닥판에 설치했을 경우 TMD의 강성, 질량 그리고 고유진동수는 달라질 수가 있다. 그리고 TMD가 설치된 이후에는 질량 및 강성의 조절이 매우 어렵기 때문에 TMD의 고유진동수를 정확히 얻을 수가 없게 된다.

본 논문에서는 구조물에 설치된 TMD에 대하여 효율적으로 고유진동수를 조율하는 방법을 제시하고, 이 방법을 실제 구조물에 적용하여 그 효과를 연구하여 보았다.

2. TMD에 의한 진동제어

2.1 TMD의 진동제어 원리

그림1에서 보듯이 강성이 K_1인 보위에 지지되어 있는 질량 m_1인 모터를 생각하여 보자. 이 시스템에서 회전력인 벡터 P_1의 진동수(Angular Frequency)가 임계치(critical value)가 되는 경우에는 시스템 전체에 매우 큰 진동을 일으킬 수 있다. 이러한 경우 보에서 발생하는 진동을 저감하기 위하여 임계치의 진동수와 같은 진동수를 갖는 강성과 질량을 가진 TMD를 보에 설치한다. 이 시스템에서 진동수와 강성, 그리고 질량에 대한 관계식은

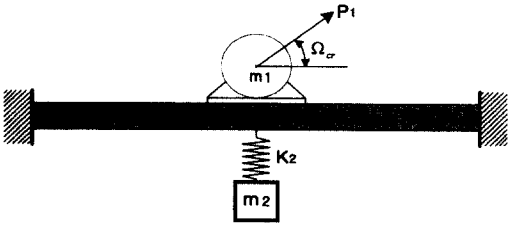

그림1. TMD가 설치된 보

$$\Omega_{cr}=\sqrt{K_1/m_1}=\sqrt{K_2/m_2} \tag{1}$$

이며, 식(1)에서 Ω_{cr}은 임계치에 도달하였을 경우의 진동수이고 K_1은 보의 강성, m_1은 모터의 질량 그리고 K_2, m_2은 각각 TMD의 강성과 질량을 나타낸다.

2.2. TMD의 진동제어 예제

건물의 어떤 특정한 부분에서 기계 하중으로 인하여 진동이 발생할 경우 바닥판의 연직 진동에 대한 제어를 TMD의 진동제어 원리를 이용하여 3층 예제 구조물에 적용하여 보았다.

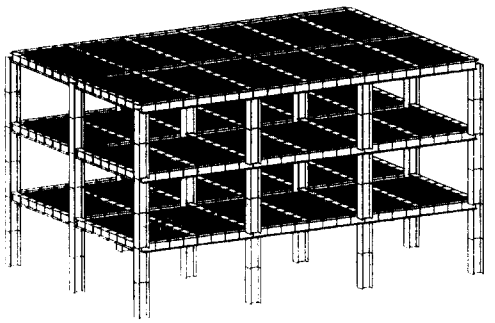

그림2. TMD가 설치된 3층 구조물

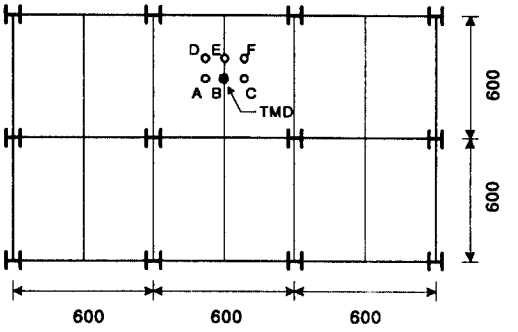

그림3. 2층 평면도 및 TMD의 설치위치

예제 구조물은 그림3과 같이 3×2경간의 평면을 가진 3층 구조물이며 바닥판의 모듈은 6m×6m 이고 층고는 4m로 하였다. 사용된 부재중에서 기둥은 H-500×500×12×19 이며 보는 H-500×300×12×15 인 구조용 형강을 사용하였으며, 바닥판은 두께가 12cm인 철근 콘크리트를 사용하였다. 구조물에 작용하는 하중은 바닥판과 공진을 일으킬 수 있는 진동수(18.6 Hz)를 가지며 그림3에서 표시된 B절점에서 연직방향으로 작용하도록 하였다. TMD는 하중이 작용하는 절점인 보의 중앙에 설치하였으며. TMD의 무게는 설치되는 부분의 보가 부담하는 바닥판 무게의 1%로 정하였다.

다음은 TMD를 설치하기 전후에 바닥판에서 발생하는 연직방향에 대한 가속도와 TMD가 설치된 절점에서의 변위 및 가속도을 비교한 표이다.

표1. 바닥판의 가속도 비교 (단위 : $cm/\sec^2$)

절점위치	TMD 설치 전	TMD 설치 후
A	498.2	246.4
B	493.7	243.7
C	498.2	246.4
E	472.9	234.0
F	469.1	231.8
G	472.9	234.0

표2. 바닥판의 변위 비교 (단위 : mm)

절점위치	TMD 설치 전	TMD 설치 후
B	0.361	0.179
B′	-	1.655

* B′은 설치된 TMD에서의 절점을 나타냄.

표 1,2에서도 알 수 있듯이 TMD 설치 전보다 TMD를 설치한 후에 바닥판에서 발생하는 가속도 및 변위가 줄어들고, TMD에서의 변위는 다른 절점에서의 변위와 비교하여 볼 때 매우 큰 값을 나타내는 것으로 보아 TMD에 의한 진동저감의 효과를 확인 할 수가 있다.

3. TMD의 고유진동수 조율

구조물에 설치되기 전 고정된 TMD의 고유진동수는 지지점이 흔들림이 없는 완전히 고정시킨 상태에서 자유진동을 계측하여 구할 수 있지만 구조물에 설치된 TMD의 고유진동수는 보와 바닥의 연성(flexibility)의 영향으로 인하여 TMD의 고유진동수가 변할 수 있다. 그러므로 변화된 고유진동수가 목표로 하는 TMD의 고유진동수가 되기 위해서는 조율하는 과정이 필요하다.

그림4는 단자유도 구조물에서 TMD가 설치되는 경우 설치된 TMD의 고유진동수와 지지점이 고정된 TMD의 고유진동수와의 관계를 나타낸다. 이 두가지 고유진동수의 관계는 그림4와 같이 어떠한 값에 접근을 하는 점근선의 형태를 가진다. TMD의 강성이 굉장히 작다면 구조물에 설치된 TMD의 고유진동수는 거의 영(零)에 가까울 것이며, 반대로 TMD의 강성이 아주 크다면 구조물에서 설치된 TMD의 고유진동수는 어떠한 특정한 진동수의 값에 접근을 하게 되는 형태를 가진다.

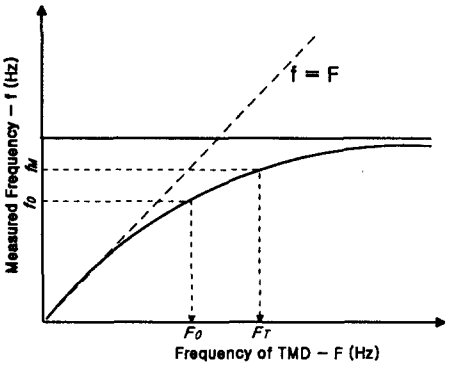

그림4. 설치된 TMD 진동수와 고정된 TMD의 진동수 관계

실제 구조물에 설치할 TMD를 제작할 경우에 TMD

의 질량은 어느 정도 정확하게 설치된다고 할 수 있으나, TMD의 강성의 경우에는 제작 및 설치 과정에서 부정확하게 될 가능성이 많다. 이러한 오차에 의해서 발생하는 TMD의 고유진동수 변화를 효율적으로 조율하는 방법을 본 논문에서 제시하였으며 그 방법은 다음과 같다.

① 구조물에 설치된 TMD의 고유진동수와 지지점이 고정된 TMD의 고유진동수의 관계를 그림5와 같이 유한요소 해석을 통하여 알아낸다.

② 설치된 TMD의 고유진동수(f_0)에 해당하는 고정된 TMD의 고유진동수(F_0)를 그림5에서의 관계를 이용하여 구하면, 고정된 TMD의 고유진동수와 TMD의 질량으로부터 TMD의 강성을 구할 수가 있다.

$$K_0 = (2\pi \times F_0)^2 \times M_0 \tag{2}$$

여기서 F_0 : 고정된 TMD의 고유진동수
M_0 : 제작 상태의 측정된 질량
K_0 : 제작상태의 TMD 강성

③ 조율목표로 하는 TMD의 고유진동수(F_T)에 관한 식은 다음과 같다.

$$F_T = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_0}{M_1}} \tag{3}$$

여기서 F_T : 조율목표로 하는 TMD의 고유진동수
$M_1 = M_0 + \Delta M$ (추가 또는 제거되는 질량)

④ 식(3)으로부터 추가 또는 제거되는 질량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M_1 = \frac{K_0}{(2\pi \times F_T)^2} \tag{4}$$

⑤ 식(3)을 식(5)에 대입하면 조율목표 진동수가 되기 위한 조정된 질량(M_1)을 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$M_1 = \frac{(2\pi \times F_0)^2 \times M_0}{(2\pi \times F_T)^2} \tag{5}$$

⑥ 구하고자 하는 추가 또는 제거되는 질량 ΔM 은 $M_1 - M_0$이므로 식(6)과 같이 정리될 수 있다.

$$\Delta M = M_1 - M_0 = (\frac{F_0}{F_T})^2 \times M_0 - M_0 = [(\frac{F_0}{F_T})^2 - 1] \times M_0 \tag{6}$$

4. TMD의 고유진동수 조율 예제

본 논문에서 제시한 TMD의 조율 방법을 이용하여 그림2의 예제 구조물에서 설치된 TMD에 대하여 적용하여 보았다. 실제 TMD를 제작할 때 질량의 경우는 비교적 정확하게 제작되지만 강성의 경우는 설계된 값과 오차를 가질수가 있다. 설치되는 TMD의 강성의 경우에는 미세한 변화에도 달라져 오차 발생의 확율이 크다고 할 수 있다. 이번 예제에서는 TMD가 설치된 이후에 TMD의 강성의 오차가 ±9 % 라고 가정할 경우 본 논문에서 제시한 조율 과정을 몇 차례 반복하여 TMD의 고유진동수에 근접함을 확인하여 보고 조율목표로 하는 TMD의 고유진동수가 되기 위해 질량 조정을 하여 추가 또는 제거되는 질량을 계산하여 보았다.

먼저, 구조물에서 설치된 TMD의 고유진동수와 고정된 TMD의 고유진동수와의 관계식을 유도하기 위해서 강성 오차를 ±10 %로 하였을 때 TMD의 고유진동수에 대한 관계는 그림5와 같다. 그림5의 그래프는 우리가 관심을 가지는 진동수 대역에 대해서 확대한 것이며 ±10 %의 강성오차에 대하여 설치된 TMD의 고유진동수와 고정된 TMD의 고유진동수는 표3과 같다. 그러므로TMD의 강성오차가 ±9 %인 경우에는 구조물에 설치된 TMD의 고유진동수를 그림5에서의 관계에 대입하면 고정된 TMD의 고유진동수를 구할 수가 있다. 본 논문에서 제시한 조율 방법을 적용하여 TMD에 대한 질량을 조정하고 추가 또는 제거되는 질량을 구하였으며 그 결과는 표4와 같다.

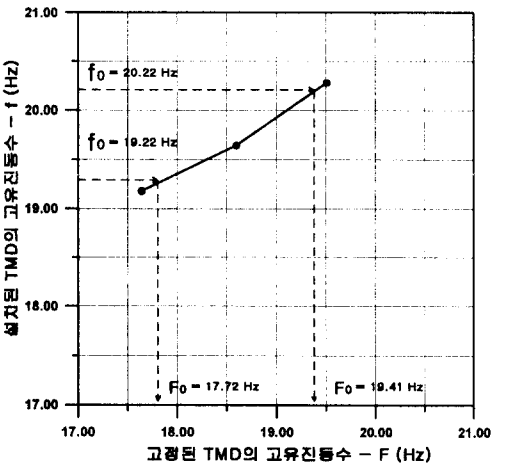

그림5. 강성오차에 의한 설치된 TMD 진동수와 고정된 TMD 진동수 관계

표3. 강성오차에 따른 설치된 TMD의 진동수와 고정된 TMD의 진동수

TMD 무게 (kg)	강성오차 (%)	설치된 TMD 진동수 (Hz)	고정된 TMD 진동수(Hz)
100	- 10	19.18	17.65
100	0	19.65	18.60
100	+ 10	20.28	19.51

표4. 조율 과정의 반복을 통한 질량조정

	강성 오차 (%)	설치된 TMD 진동수 (Hz)	고정된 TMD 진동수 (Hz)	조율 목표 진동수 (Hz)	조정 전 질량 (kg)	질량 조정 (kg)	조정 후 질량 (kg)
TMD	+ 9	20.22	19.41	18.60	100	8.9kg 추가	108.91
	- 9	19.22	17.72	18.60	100	9.25kg 제거	90.75

강성오차가 +9 %로 설치된 TMD의 경우 1차 조율을 한 결과 질량 조정이 8.91 kg 추가로 나타났으므로 조율이 제대로 되었다는 것을 알 수가 있으며, 강성오차가 -9 %로 설치된 TMD의 경우도 마찬가지로 질량을 9.25 kg 제거함으로써 조율목표 TMD의 진동수에 근접할 수 있다. 이러한 과정을 몇 차례 반복한다면 점점 조율을 목표로 하는 TMD의 고유진동수에 근접함으로써 본 논문에서 제안한 조율 방법이 효과적으로 적용이 될 것으로 판단된다.

다음은 조율 전후에 대하여 바닥판에서 발생하는 연직방향의 가속도를 비교한 표이다.

표5. 조율 전후의 바닥판 가속도 비교 (단위 : cm/sec^2)

절점위치	TMD 설치 전	TMD 설치 후 질량 - 100 kg	강성 오차 + 9 % 인 경우		강성오차 - 9 % 인 경우	
			조율 전 질량 - 100 kg	조율 후 질량 - 108.91 kg	조율 전 질량 - 100 kg	조율 후 질량 - 90.75 kg
A	498.2	246.4	261.6	235.4	332.3	258.5
B	493.7	243.7	261.5	232.7	325.5	255.7
C	498.2	246.4	261.6	235.4	332.3	258.5
D	472.9	234.0	248.0	223.5	316.0	245.5
E	469.1	231.8	247.7	221.3	310.7	243.2
F	472.9	234.0	248.0	223.5	316.0	245.5

5. 실제 구조물에서의 적용

본 논문에서 제시한 TMD의 고유진동수를 조율하는 방법을 이용하여 실제 공장 건물의 바닥판 연직진동 제어에 적용하여 보았다. 그림6에서 보는 공장 건물은 2층 바닥에 모두 7개의 기계가 위치하고 있으며 이러한 기계들의 진동으로 인하여 2층의 바닥 슬래브 및 벽체가 진동을 하고 있는 상태였다. 해석을 위하여 건물을 3차원으로 모델링을 한 다음 해석을 수행한 결과에 따라 그림7에서 보는 바와 같이 바닥 슬래브 및 벽체의 진동 저감을 위하여 2층 보의 4군데에 대하여 각각 500kg의 질량을 가지는 TMD를 설치하였다.

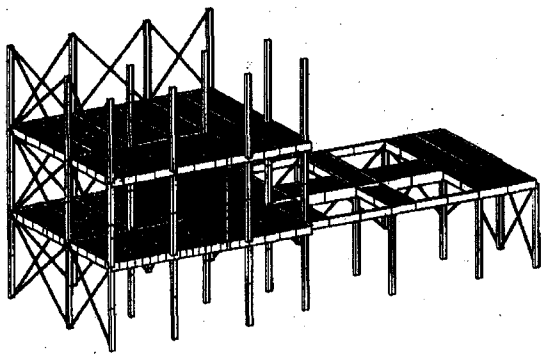

그림6. TMD의 조율방법이 적용된 실제 구조물

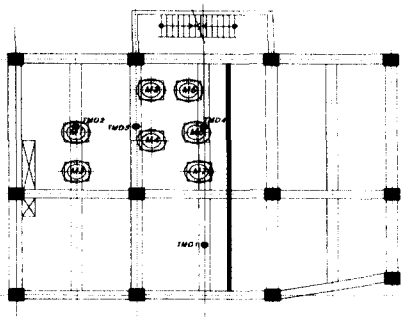

그림7. TMD가 설치된 2층 평면도

보의 4군데에 설치된 TMD의 형태는 그림8과 같으며 보에 접합되는 판(PLATE)의 부분까지 고려된 TMD의 질량은 에너지 원리를 이용한 Rayleigh법에 의하여 근사적으로 구할 수가 있다.

TMD의 질량(mass)은 보에 집중 질량으로 작용하고, 진동이 발생할 때 판의 질량까지 고려된 TMD의 등가

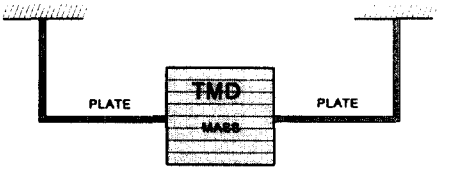

그림8. 설치된 TMD의 형태

질량은 판과 보와의 접합 상태에 따라서 달라질 수가 있다. Rayleigh 법에서 경계조건에 따른 등가 질량을 구하는 식은 표6과 같다. 그러나 실제 설치되는 TMD에서의 양단 경계는 정확하게 이론적으로 단순지지 또는 고정이 아니기 때문에 이 구조물에서는 두가지 경우에 대하여 평균값을 적용하여 TMD의 등가질량을 구하였다. 실제로 설치된 TMD의 가운데 질량(mass) 부분만 측정한 결과 476.6kg 이었으며 Rayleigh법에 의하여 TMD의 등가 질량은 491.8kg으로 계산되었다. TMD에 의한 진동저감 효과를 확인하기 위하여 진동 계측을 실시하였으며 계측된 결과를 가지고 TMD의 고유진동수를 1차 조율하고 각각의 TMD에 대하여 본 논문에서 제시한 방법으로 질량 조정을 하여 추가 및 제거되는 질량을 구하면 표7과 같다.

표6. Rayleigh 법에 의한 등가질량

보의 경계조건	등 가 질 량 (W)
단순 지지된 경우	$W = W_0 + \frac{17}{35} w_l$
양단이 고정된 경우	$W = W_0 + \frac{13}{35} w_l$

표7. TMD의 조율 방법에 의한 1차 조율

TMD 번 호	설치된 TMD 진동수 (Hz)	고정된 TMD 진동수 (Hz)	조율 목표 진동수 (Hz)	TMD무게 (kg)	질량조정 (⊿M)
TMD 1	18.141	18.779	19.625	491.8	45.3 kg 제거
TMD 2	20.750	20.456	19.672	491.8	36.9 kg 추가
TMD 3	18.365	18.758	19.664	491.8	48.6 kg 제거
TMD 4	20.766	21.274	19.551	491.8	76.4 kg 추가

표8. 조율전후의 TMD의 진동비교

TMD 번 호	가 속 도 (mm/sec^2)		비 고
	1차조율전	1차조율후	
TMD 1	84.663	280.197	231 % 증가
TMD 2	39.625	294.030	642 % 증가
TMD 3	71.727	282.901	294 % 증가
TMD 4	36.229	454.843	1155 % 증가

진동을 계측한 결과 표8에서와 같이 진동수를 조율하기 이전 계측 값보다 조율한 이후의 계측값이 더 큰 진동을 나타내므로 TMD의 조율이 효과적으로 되었다고 볼 수가 있었다. 특히 4번 TMD의 경우는 가장 크게 진동의 증가를 보인 것으로 볼 때 가장 효과적으로 조율이 되었음을 알 수가 있었다. 1번과 3번 TMD의 경우에는 진동의 증가가 2번과 4번에 비해서 적게 나타났다. 1차 조율을 한 결과에 따라 각각의 TMD에 대하여 질량을 추가 및 제거를 하였고, 조율된 효과를 확인하기 위하여 다시 한번 TMD에 대하여 계측을 실시하였다. 계측된 TMD의 고유진동수로서 2차 조율을 한 결과는 표9와 같다.

표10은 각각의 TMD에 대하여 1차 및 2차 조율에서 나타난 TMD의 고유진동수 변화를 나타낸

표9. TMD의 조율 방법에 의한 2차 조율

TMD 번 호	설치된 TMD 진동수 (Hz)	고정된 TMD 진동수 (Hz)	조율 목표 진동수 (Hz)	TMD무게 (kg)	질량조정 (⊿M)
TMD 1	18.609	19.322	19.625	446.5	14.1 kg 제거
TMD 2	19.766	20.001	19.672	528.8	17.3 kg 추가
TMD 3	18.438	18.829	19.664	443.2	40.2 kg 제거
TMD 4	19.219	19.544	19.551	568.3	0.5 kg 제거

표10. TMD의 진동수 변화

TMD 번 호	TMD 무게 변화량(kg)	진 동 수 변화량(Hz)	변 화 율 (kg / Hz)
TMD 1	- 45.3	+ 0.543	- 83.36
TMD 2	+ 36.9	- 0.455	- 81.10
TMD 3	- 48.6	+ 0.071	- 686.44
TMD 4	+ 76.4	- 1.730	- 44.14

것이다. 3번 TMD의 경우 1차 조율 후의 48.65kg의 질량 제거에도 불구하고 진동수의 변화는 0.0708Hz로 다른 TMD의 질량 변화에 따르는 진동수의 변화와 비교하여 볼 때 질량 변화의 효과가 거의 없는 특이한 동적 거동을 보였다. 이것은 1차 조율 이후에 TMD의 강성이 변화되어 질량의 제거에도 불구하고 진동수가 증가하지 않은 추정되었으며, TMD의 계속되는 진동에 의하여 판(PLATE) 부분의 볼트 조임이 느슨해져 풀려 TMD의 강성이 저하되었기 때문인 것으로 판단되었다. 그래서 각각의 TMD에 대하여 점검을 한 결과 예상하였던 대로 3번 TMD의 경우 보와 연결되는 판의 볼트 중 일부가 진동으로 인하여 풀려 있었음을 확인할 수가 있었다. 그래서 모든 TMD에 대해서 재점검을 하고 3번의 경우 볼트를 완전히 체결을 하였고, 1, 2, 4번의 TMD에 대해서는 2차 조율에서 조정된 질량을 추가 및 제거하였다.

6. 결 론

본 논문에서 제안한 조율방법을 예제 구조물 및 실제 구조물에 적용하여 그 효과에 대하여 알아보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 경제적으로 간단하게 제작된 TMD로서 건물 바닥판에서 발생하는 연직 진동을 효과적으로 제어 하기 위해서는 본 논문에서 제안한 조율 방법으로 복잡한 실험장치가 없어도 효율적으로 TMD의 고유진동수가 조율이 됨을 확인할 수 있었다.
2) 조율과정을 몇 차례 반복한다면 TMD의 조율목표 고유진동수에 더욱 근접할 수 있을 것으로 판단된다.
3) 조율 전후에 대하여 바닥판에서의 연직방향의 가속도 역시 조율과정이 반복됨에 따라 TMD가 조율목표 고유진동수를 가질 경우의 가속도에 점점 근접함을 알 수 있었다.
4) 본 논문에서 제시한 조율 방법을 사용하더라도 정확한 값에 일치시키기는 어렵다. 그 이유는 실제 구조물에 대하여 정확한 해석 모델링을 할 수가 없고 TMD의 제작 및 시공상의 오차가 발생할 수 있으며, 또한 진동계측도 건물의 주변 환경에 의하여 조금씩 달라질 수가 있기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 연구비지원에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. McNamara, R.(1977), " Tuned Mass Dampers for Buildings ," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.103, No.ST9., pp.1785 - 1798.
2. 민경원(1992), " 수동동조질량감쇠장치를 이용한 고층건물의 진동특성 ," 대한건축학회 논문집, 제 8권 제 4호, pp. 89-96.
3. 민경원, 홍성목(1992), " 복수의 TMD를 이용한 고층건물의 진동조절 ," 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.26-29.
4. William Weaver, Paul R. Johnson(1987), " Structural Dynamics by Finite Elements ," *Prentice Hall.*
5. S. P. Timoshenko., William Weaver, D.H. Young.(1990), "Vibration Problem in Engineering," *John Wiley & Sons*, Fifth Edition.
6. Anil K. Chopra (1995), " Dynamics of Structures ," *Prentice Hall*, pp. 432-443.