

인간이 진동을 감지하는 민감도는 개인이 일에 집중하는 정도나 환경에 적응하는 정도에 따라 서로 다를 수 있다. 인간의 진동에 대한 민감도에 영향을 미치는 인자는 표 1과 같으며, 진동에 대한 인지강도 (Intensity of perception)는 진동의 변위, 속도, 가속도 및 진동의 성분과 지속시간에 의해서 결정된다.

표 1. 진동에 대한 민감도에 영향을 미치는 인자

	파라미터
진동에 대한 민감도	- 자세 (서있는 상태, 앉아있는 상태, 누워있는 상태)
	- 척추의 경사각도 및 방향
	- 인간의 활동상태 (쉬는 상태, 걷는 상태, 뛰는 상태)
	- 나이와 성별
	- 진동수와 발생시간
	- 진동의 특성

2.2 인지 강도 평가 기준

진동에 대한 인간의 인지강도를 평가하는 기준은 여러 사람에 의해 연구되었으며, 코드로는 ISO 2631 코드와 DIN 4150 코드가 광범위하게 사용되고 있다. 국제규준 ISO 2631/1에서는 조화 진동하중 뿐만 아니라 랜덤과 충격하중에 의해서 발생할 수 있는 횡방향과 연직방향 진동에 대하여 진동수 범위가 1~80Hz에서의 유효 가속도와 진동에 대한 노출시간으로 사람의 움직임에 의한 진동을 평가하며 3단계의 영역으로 분류하고 있다. 독일 규준인 DIN 4150/2 코드에서도 1~80 Hz의 진동수 범위에서 측정된 가속도 또는 속도와 진동수로 인지 강도를 평가하며 건물의 사용목적, 진동수, 진동시간, 발생시각에 따라 다르게 평가한다. 그 밖에 Lenzen(1966)은 Reiher-Meister Scale을 수정하여 제시하였으며, 이는 진동수에 따른 변위의 한계를 단계별로 제한한 것이다. 또한 Bachmann과 Ammann(1987)은 진동에 대한 가속도 기준치를 일반사무실에서 2 %g, 체육관, 무도장, 콘서트 홀에서는 5~10 %g보다 작아야 한다고 규정하였다.

2.3 연직 진동에 대한 인지 영역

인지 강도에 대한 연구는 많은 사람들에 의해 연구되었으며, 그 결과는 일반적으로 표 2와 같다. 보편적으로 1Hz 에서 10Hz 범위에서는 사람의 지각은 가속도에 비례하고, 10Hz 에서 100Hz에서는 속도에 비례한다. 표 2에서 제시하는 분류는 진동 자극의 정도에 따라 다소 달라질 수 있으나 일반적으로 사용되고 있는 기준이다.

표 2. 연직진동에 대한 인간의 민감도 (서있는 경우)

민감도의 단계	진동수 범위 1~10Hz 일때 최대 가속도치 (mm/sec ²)	진동수범위 10~100Hz 일때 최대속도치 (mm/sec)
겨우 느낌	34	0.5
분명히 느낌	100	1.3
불쾌함을 느낌	550	6.8
참을 수 없음	1800	13.8

3. 사람의 움직임에 의한 동적 하중

바닥판 구조물에서 사람의 움직임에 의해 발생할 수 있는 가장 보편적인 하중 형태는 걷는 경

우(walking), 뛰는 경우(jumping) 및 달리는 경우(running)에 의한 하중이다. 이러한 동적 하중은 걷는 경우, 뛰는 경우 및 달리는 경우 진동수의 조합으로 이루어져 있으며, 진동수가 가장 낮은 3~4개의 성분이 전체 하중에 대한 기여도가 크다는 것을 알 수 있다. 사람의 움직임에 의한 동적 하중의 평가는 구조물 거주자에 의해서 야기될 수 있는 진동문제에 대한 이해와 걷는 경우, 뛰는 경우, 달리는 경우의 하중에 의한 구조물의 동적거동을 예측하는데 매우 중요한 역할을 한다.

3.1 실제 계측에서 나타난 사람의 움직임에 대한 동적하중

바닥판 (6m×8m)이 포함된 구조물에서 몸무게가 65kg, 75kg, 80kg 정도의 사람이 걷는 경우 (1.7Hz), 뛰는 경우(2.2Hz) 및 달리는 경우(3.2, 3.6Hz)에 대한 진동수로 바닥판에 동적하중을 가할 경우 각각의 동적하중에 대한 가속도 응답을 진동계측기(HP35670A)와 calibration exciter (Type 4294)를 이용하여 계측하였다. 그림 1은 사람의 움직임에 의해서 발생될 수 있는 다양한 동적하중에 대하여 실제 계측된 진동수 영역에서의 가속도 응답이다.

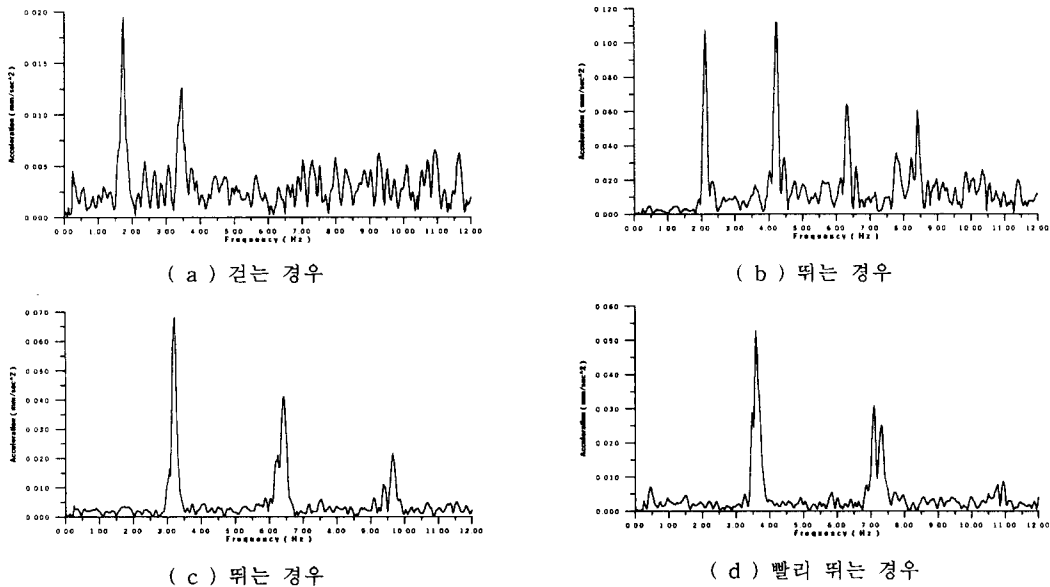


그림 1. 사람의 움직임에 의해 발생하는 다양한 동적하중의 양상

진동수 영역에서의 사람의 움직임에 의한 동적하중에 대하여 실제 계측한 응답을 살펴본 결과 참고문헌 1에서 제시한 식에 의해서 나타나는 동적하중의 양상과 거의 유사함을 보였다. 계측된 가속도 응답은 걷는 경우, 뛰는 경우, 달리는 경우 진동수비의 정수배에서 뚜렷한 주파수 성분이 나타났으며, 1차 조화 성분의 진동수 대역에서 대체적으로 가장 큰 응답이 나타났다.

3.2 사람의 움직임에 대한 하중 함수

실제 바닥판 구조물에 가진할 사람의 움직임에 의한 동적하중의 식은 참고문헌 1에서 인용하였으며, 식 (1)과 같이 Fourier 함수의 형태로 표현된다.

$$F(t) = P \left[1 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \sin(i2\pi ft - \phi_i) \right] \quad (1)$$

여기서,

P = 몸무게 (Weight)

f = 사람의 움직임의 진동수

α_i = Fourier 함수의 크기 또는 Fourier 계수

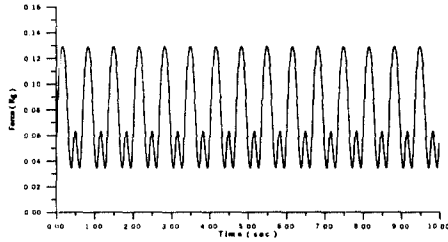
ϕ_i = 상대적인 위상각

i = 조화성분의 차수 (i = 1, 2, 3 ...)

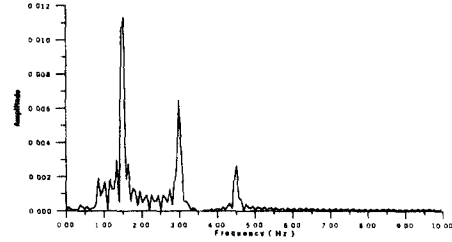
N = 조화하중의 전체적인 갯수

3.2.1 걷는 경우의 동적 하중

걷는 경우에 의해서 발생하는 동적 하중의 진동수는 대체적으로 1.5 ~ 2.0Hz의 범위에 존재하며, 하중의 뚜렷한 진동수 성분은 걸음걸이의 정수배에서 나타난다. 식(1)을 이용한 예제 구조물에 가진되는 걷는 경우에 대한 동적하중은 3개의 낮은 조화 성분만을 고려하였으며 그림 2와 같다.



(a) 시간 영역

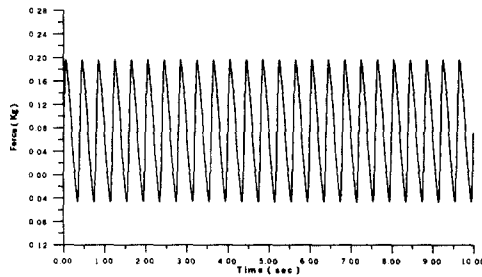


(b) 진동수 영역

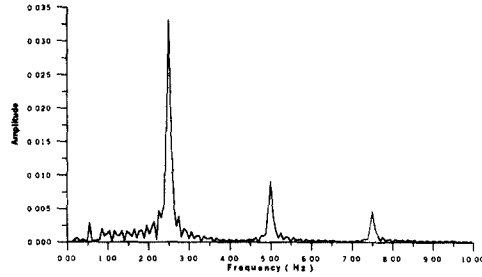
그림 2. 걷는 경우의 동적하중

3.2.2 뛰는 경우의 동적 하중

뛰는 경우에 의한 동적 하중은 걷는 경우에 의한 동적 하중과 비슷하지만 진동수가 2.0 ~ 3.5Hz의 범위에 존재하며, 조화 성분에 대한 상대적 위상각이 분명하지 않다. 뛰는 경우 하중 역시 예제 구조물에 가진되는 동적하중으로 3개의 낮은 조화 성분을 고려하였으며 그림 3과 같다.



(a) 시간 영역



(b) 진동수 영역

그림 3. 뛰는 경우의 동적하중

4. 예제 구조물의 해석

사람의 움직임에 의해서 발생하는 다양한 동적하중에 의하여 바닥판이 포함된 구조물에 진동이 발생할 경우 이러한 바닥판의 연직진동에 대한 제어를 TMD 진동제어 원리를 이용하여 예제 구조물에 적용하여 보았다. 걷는 경우, 뛰는 경우 그리고 복수의 절점에 여러 가지 진동수 성분의 동적하중이 작용할 경우에 바닥판 구조물의 응답을 살펴보고, 효과적으로 바닥판의 진동을 제어할 수 있는 TMD의 진동수 및 위치에 대하여 연구하여 보았다. 설치되는 TMD의 무게는 바닥판 무게의 1%로 정하였다.

4.1 예제 구조물의 선택

예제 구조물은 24 m×18 m의 2층 장스팬 구조물로 그림 4와 같으며, TMD의 설치와 동적하중이 가해지는 평면은 그림 5와 같다.

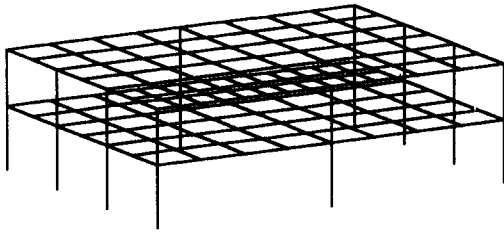


그림 4. 예제 구조물

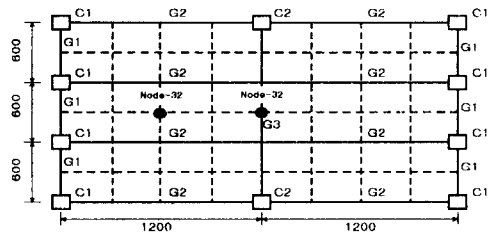


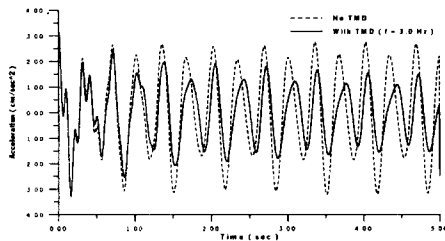
그림 5. 예제 구조물 평면 및 가진 위치점

4.2 동적하중에 의한 바닥판 구조물의 응답

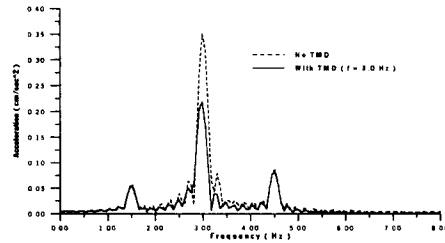
사람의 움직임 증 걷는 경우와 뛰는 경우의 하중을 그림 5에서와 같은 절점 32,30에 각각 적용시켜 구조물의 응답을 분석한 후에 TMD를 이용하여 바닥판의 진동제어 효과를 알아보았다.

4.2.1 걷는 경우의 하중에 의한 바닥판 구조물의 응답

절점 32에 진동수 1.5, 3.0, 4.5 Hz의 대역을 가진 동적하중을 가진하여 보고, 구조물의 응답을 분석하여 응답이 가장 큰 절점 32에 TMD를 설치하였다. 구조물의 응답에 따른 TMD의 진동제어 효과는 그림 6과 같다.



(a) 시간영역



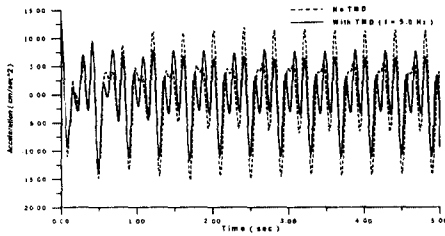
(b) 진동수영역

그림 6. 걷는 경우의 하중에 대한 구조물의 응답

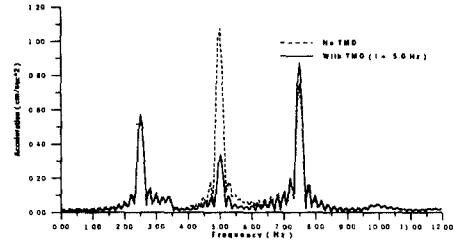
진동수 성분에 따른 하중의 크기가 2차 조화 성분 보다 1차 조화 성분이 크에도 불구하고, 구조물의 1차 진동수에 가까운 진동수 대역에서 응답이 크게 나타났다. 또한 구조물의 1차 모드 진동수인 3.4063Hz보다 하중의 2차 조화 성분의 진동수인 3.0Hz에서 가장 큰 응답을 보였다. 응답은 하중의 크기에 관계없이 여러 진동수 대역의 하중에서 구조물의 모드의 진동수와 유사한 하중 성분이 응답을 좌우한다고 할 수 있다. 효과적인 바닥판의 진동제어를 위하여 TMD를 여러 모드의 정점에 설치하여 본 결과 가진 점(절점 32)이 모드의 정점이 되는 1차모드의 정점(절점 32)에 설치하는 것이 효과적이며, TMD의 진동수는 구조물의 1차모드의 진동수와 유사한 가진 진동수(3.2Hz)로 할 경우 응답이 가장 많이 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 뛰는 경우의 하중에 의한 바닥판 구조물의 응답

절점 30에 진동수 2.5, 5.0, 7.5Hz로 복수의 진동수 대역을 가진 동적 하중으로 가진한 결과 뛰는 경우에 의한 구조물의 응답 역시 구조물의 2차 모드의 진동수와 유사한 5.0Hz의 가진 진동수 대역에서 가장 큰 응답을 보인다. 구조물의 응답에 따른 TMD의 진동제어 효과는 그림 7과 같다.



(a) 시간영역



(b) 진동수영역

그림 7. 뛰는 경우의 하중에 대한 구조물의 응답

뛰는 경우의 하중이 적용된 경우의 응답을 살펴보면 걷는 경우 하중이 가진되었을 경우와 유사한 결과가 나타난다. TMD의 위치는 2차모드의 정점(절점 30, 절점34)에 설치하는 것이 보다 효과적이며, 가진점의 응답이 다른 정점의 응답보다 크므로 TMD의 위치는 가진점으로 설치한다. TMD의 진동수는 2차 모드의 진동수(4.8687Hz)와 유사한 가진 진동수(5.0Hz)로 한 것이 효과적이었다.

4.3 복수의 절점에 동적하중을 가진한 바닥판 구조물의 응답

복수의 절점에 사람의 움직임에 대한 다양한 동적하중을 가진한 후에 바닥판 구조물의 응답을 살펴보고, 효과적인 진동제어를 위한 TMD의 갯수와 위치에 대하여 살펴보았다.

4.3.1 여러 사람이 동시에 뛰는 경우

복수의 절점에 그림 8과 같이 가진 진동수가 1.8Hz(1.8, 3.6, 5.4Hz)을 갖는 뛰는 경우에 대한 하중을 가진할 경우 바닥판 구조물은 절점 32에서 가장 큰 응답을 보였으며, 진동수 대역은 3.6Hz 부근이었다. 진동수영역에 대한 구조물의 응답 결과는 그림 9와 같다.

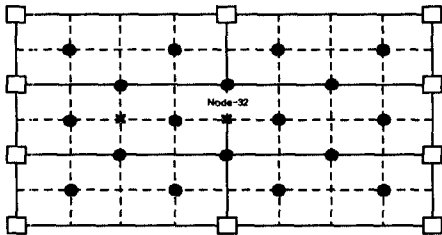


그림 8. 바닥판 가진점 위치 평면도

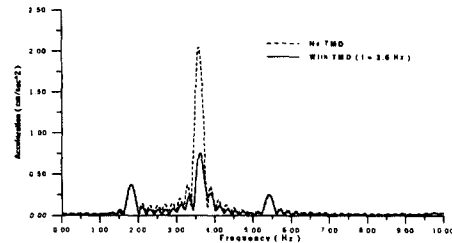


그림 9. 동시에 뛰는 경우 진동수 영역에서의 응답 (절점 32)

가진된 동적하중이 구조물의 1차 모드에 가장 큰 영향을 주므로 TMD의 위치는 1차 모드의 정점이 절점32에 설치하는 것이 가장 효과적이며 TMD의 진동수는 응답이 가장 큰 3.6Hz로 하는 것이 진동제어에 가장 효과적이었다.

4.3.2 여러 사람이 다른 진동수로 뛰는 경우

복수의 절점에 그림 10과 같이 가진 진동수가 1.8Hz(1.8, 3.6, 5.4Hz)과 2.4Hz(2.4, 4.8, 7.2Hz)인 두가지 진동수 성분의 뛰는 경우에 대한 하중을 가진할 경우 바닥판 구조물의 응답은 절점 30, 34에서 가장 큰 응답을 보였으며, 구조물의 1차 및 2차 모드를 제어하기 위

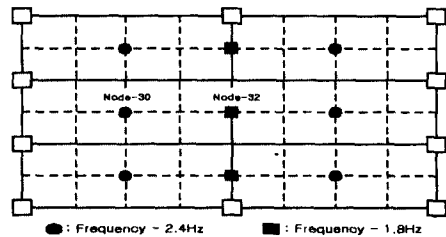


그림 10. 바닥판 가진점 위치 평면도

하여 복수의 TMD를 적용하여 보았다. 진동수영역에 대한 구조물의 응답 결과는 그림 11과 같다.

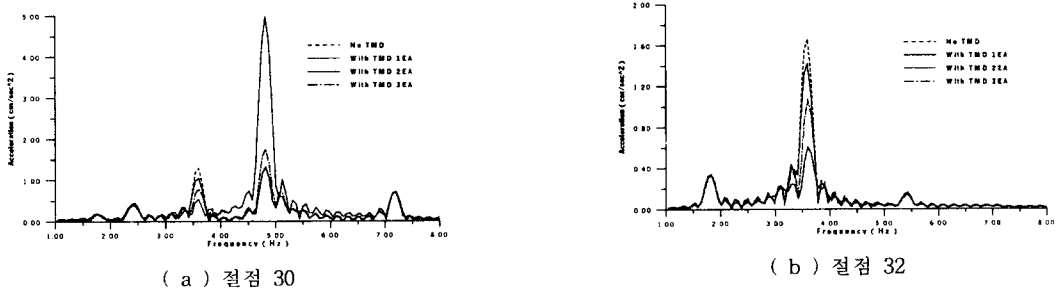


그림 11. 다른 진동수로 뛰는 경우 진동수영역에서의 응답

두가지 진동수 성분을 가진 동적하중을 가진할 경우 절점 32에는 가진 진동수가 1.8Hz의 정수배에서 가장 큰 응답이 나타나며, 절점 30과 34에는 가진 진동수가 2.4Hz의 정수배에서 가장 큰 응답이 나타난다. TMD의 위치는 제어하고자 하는 모드의 정점에 그 갯수만큼 설치하는 것이 가장 효과적이었다.

4.3.3 여러 사람이 불규칙적으로 뛰는 경우

구조물 바닥판에 그림 12와 같이 여러사람이 불규칙하게 뛰는 경우에 대한 하중을 가할 경우 구조물의 응답과 TMD를 이용한 진동제어에 대하여 살펴보았다. 진동수 성분은 4가지(1.8, 2.4, 3.6, 4.8Hz) 경우에 대하여 고려하였으며, 각각의 절점 하중에 대하여 시간 오차를 설정함으로써 하중의 불규칙성을 고려하였다. TMD는 1~3개를 절점 30,32,34번에 설치하였으며 진동수영역에서의 바닥판 구조물의 응답은 그림 13과 같다.

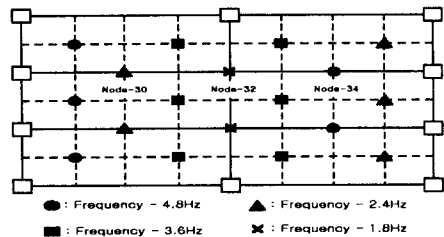


그림 12. 바닥판 가진점 위치 평면도

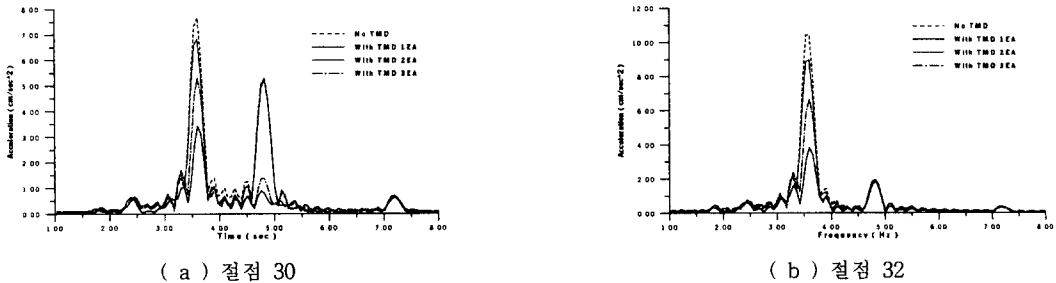


그림 13. 불규칙하게 뛰는 경우 진동수영역에서의 응답

TMD의 위치는 제어하고자 하는 바닥판의 위치에 따라 다르다. 구조물의 1차모드를 제어 하고자 하는 경우 절점30과 절점34에 각각 1개씩 설치한 것은 제어에 효과가 거의 없으며, 절점 32에 TMD 1개를 설치하는 것이 가장 효과적이었다. 구조물의 2차모드의 제어를 위해서 절점 30의 응답을 살펴보면 3.6Hz와 4.8Hz 성분이 가장 큰 응답을 보였다. TMD를 절점 32에 1개 설치하면 3.6Hz 성분에 대한 응답은 줄어드나 4.8Hz 성분의 응답은 변함이 없었다. 그러므로 2차모드 제어를 위해서는 절점 30,34에 TMD를 각각 1개씩 설치함으로써 3.6Hz와 4.8Hz 성분의 응답을 모두 제어할 수 있었다.

4.4 해석결과 분석

사람의 움직임에 대한 동적하중이 한 절점에 작용할 경우 구조물 응답에 있어서 1차 모드의 영향이 가장 큰 경우 TMD의 위치는 1차 모드의 정점인 절점 32에 설치하는 것이 효과적이었다. 2차 모드의 영향이 가장 큰 경우에는 TMD를 2차 모드의 변곡점인 절점 32에 설치할 경우는 진동 제어의 효과가 거의 없었으며, 2차 모드의 정점인 절점 30,34에 설치하는 것이 효과적이었다. TMD의 진동수는 모드의 진동수에 동조시키는 것보다 가진 하중의 진동수에 동조시키는 것이 보다 효과적으로 응답을 제어할 수 있었다.

복수의 절점에 동적하중이 작용할 경우 TMD의 위치는 제어하고자 하는 위치에 따라 가장 영향이 큰 모드의 정점에 설치하는 것이 보다 효과적이었으며, TMD의 갯수는 제어하고자 하는 모드의 정점의 수에 따라 설치한다. TMD의 진동수 역시 한 개의 절점에 동적하중을 가진한 경우와 마찬가지로 하중의 진동수에 동조시키는 것이 보다 효과적이었다.

5. 결론 및 추후연구 과제

본 논문에서 사람의 움직임에 의해서 발생할 수 있는 다양한 동적하중에 대한 분석을 하고 이러한 하중을 바닥판 구조물에 적용시켜 보았다. 그리고 TMD를 이용하여 바닥판의 효과적인 진동 제어에 대하여 연구하여 보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사람의 움직임에 의한 동적하중은 걷는 경우, 뛰는 경우, 달리는 경우 진동수의 정수배에서 지배적인 진동수 성분이 나타나며, 이러한 진동수 성분의 조화로서 전체적인 동적하중을 나타낼 수 있다.
2. TMD의 위치는 제어하고자 하는 모드의 정점에 설치하는 것이 효과적이며, TMD의 갯수는 제어하고자 하는 모드의 정점의 수에 따라 설치하는 것이 가장 효과적이다.
3. TMD의 진동수는 가진 하중의 진동수 중에서 구조물의 모드와 유사한 진동수 대역을 갖는 하중의 진동수로 동조시키는 것이 효과적이다.
4. 사람의 움직임에 대한 바닥판의 진동제어는 이동하중과 같은 보다 실제적인 동적하중에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.H.Rainer, G.Pernica(1986), "Vertical Dynamic Forces from Footsteps," Noise and Vibration Section Division of Building Research National Research Council Canada Ottawa, Canada
2. Hugo Bachmann (1994), "Vibration Problem in Structures," Birkhauser Verlag
3. T.T.Soong, G.F.Dargush (1996), "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering," Department of Civil Engineering State University of New York at Buffalo
4. C.F.Beards (1996), "Structural Vibration : Analysis and Damping," John Willey & Sons
5. Cyril M. Harris, "Shock and Vibration Handbook," McGRAW-HILL, Fourth Edition
6. Kenneth G.McConnell, "Vibration Testing : Theory and Practice," John Willey & Sons
7. S. P. Timoshenko., William Weaver, D.H. Young.(1990), "Vibration Problem in Engineering," John Wiley & Sons, Fifth Edition.