

보행하중을 받는 건축물 바닥판의 진동해석을 위한 등가 보행하중의 적용

Application of Equivalent Walking Loads for Vibration Analysis of Building Floor Subjected to Footstep Loadings

김기철* 이동근**
Kim, Gee Cheol Lee, Dong Guen

국문요약

최근에 넓은 공간이 요구되는 건축물에서는 칸막이 벽과 같은 비구조재의 사용이 감소됨으로써 감쇠효과가 크게 줄어들고 있으며 고강도재료의 사용으로 바닥판 구조물이 유연화, 장경간화 되어가고 있다. 대형집회공간, 쇼핑몰, 사무실 등과 같이 장경간 건축물에서는 사람의 움직임에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 건축물의 사용성을 크게 저하시키는 원인이 되고 있다. 바닥판 진동의 주요 진동원 중의 하나가 보행하중이다. 보행하중을 받는 구조물의 진동해석에 있어서 보행하중을 적용하는 일반적인 방법은 한 절점에 보행하중을 연속적으로 가하거나 주기하중으로 이상화된 동적하중을 가하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 보행의 이동효과를 고려할 수 없다. 본 논문에서는 실제 바닥판 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 평가하였으며 예제 구조물의 효율적인 진동해석을 위하여 등가의 보행하중을 적용하였다.

주요어 : 바닥판 시스템, 장경간, 보행하중, 바닥판 진동, 등가의 보행하중

ABSTRACT

Recently, the floor systems those require large open space may have low inherent damping due to the decline of the use of curtain walls. Furthermore, the use of the high strength materials has resulted in more flexible and longer spanning in floor systems. The long span structures such as shopping malls, offices and large assembly rooms may lead to significant dynamic response due to human activities. Excessive vibrations make the occupants uncomfortable and deteriorate the serviceability of buildings. It is now proved that footfall loading is the major source of floor vibrations. The common method of application of walking loads for the vibration analysis of structures subjected to walking loads is to inflict measured walking loads and periodic function at a node. But this method could not account for the moving effect of walking. In this study, natural frequency and damping ratio of example structure are evaluated by heel drop tests. And the application of equivalent walking loads is used for an efficient vibration analysis of the plate structures subjected to walking loads.

Key words : floor system, long span, walking loads, floor vibration, equivalent walking loads

1. 서 론

최근 시공기술의 발전과 건축구조용 자재의 발달로 바닥판 구조물은 장경간화, 유연화 되어가고 있다. 또한 넓은 공간이 요구되는 건축물에서는 칸막이 벽과 같은 비구조재의 사용이 감소됨으로써 감쇠효과가 크게 줄어들고 있다. 이러한 바닥판 구조물은 구조적으로 우수한 성능을 확보하고 있으나 진동과 관련된 구조물의 사용성에 있어서 많은 문제를 가지고 있다. 대형집회공간, 쇼핑몰, 사무실 등과 같은 건축물에서는 이용자의 보행하중이나 충격하중과 같은 동적하중에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있다. 과도한 진동은 구조물의 구조적 성능을 저하시키는 것은 물론 부착물의 파손 또는 이용자의 불편감 유발 등과 같이 건축물의 사용성을 저하시키는 원인이 되고 있다.

보행하중에 대한 기존의 연구는 주로 보행하중에 대한 분석과 보행하중을 받는 구조물의 사용성 평가가 대부분을 차지하고 있었으며 구조물의 동적해석을 위한 보행하중의 적

용에 대한 연구는 미비한 실정이다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 보행하중의 일반적인 적용은 한 지점에 단위 보행하중이나 주기하중으로 이상화된 동적하중을 가하는 것이다. 그러나 구조물에 가해지는 보행하중은 이동성을 가지고 있기 때문에 보행방향을 따라서 여러 절점에 순차적으로 가해져야 한다.

본 연구에서는 뒤꿈치 충격 실험(heel drop tests)을 실시하여 바닥판 구조물의 동적특성인 고유진동수와 감쇠비를 분석하였으며 보행하중을 등가의 보행하중으로 치환하여 적용하는 방법을 제안하였다. 제안된 등가 보행하중의 타당성을 검증하기 위하여 바닥판 구조물의 해석응답과 계측응답을 비교 분석하였다. 또한 무리 보행하중 받는 구조물의 진동해석을 위하여 등가의 무리 보행하중을 적용하였다.

2. 뒤꿈치 충격 실험에 의한 바닥판 구조물의 동적특성 분석

본 논문에서는 뒤꿈치 충격 실험을 실시하여 실제 바닥판 구조물의 진동수와 진동모드를 평가하고 진동해석에 필요한 구조물의 감쇠비를 결정하였다. 진동해석을 수행한 구조물은 4층 철근콘크리트 구조물이며 3층 바닥판에서 뒤꿈치 충격 실험을 실시하고 보행하중에 의한 가속도응답을 계측하

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정(대표저자 : beat67@dreamwiz.com)

** 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 5. 11 / 심사종료일 : 2001. 8. 3)

였다. 3층 바닥판의 크기는 그림 1과 같이 900cm×500cm이며 단변방향으로 시공줄눈이 있다. 3층 바닥판을 지지하는 부재의 단면은 표 1과 같다. 바닥판 구조물의 A, B, C, D지점에 가속도계를 설치하여 뒤꿈치 충격에 의한 가속도 응답을 계측하였다.

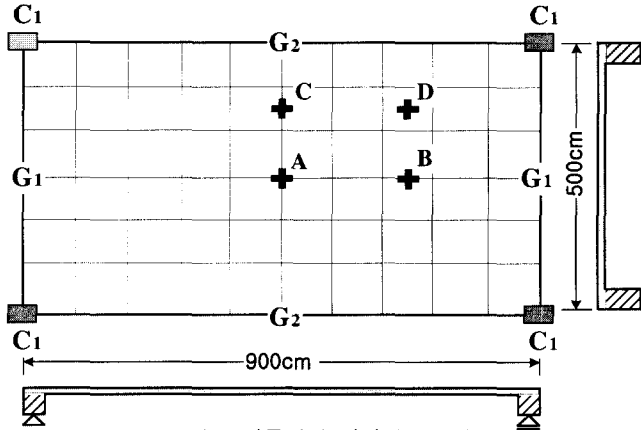


그림 1 진동해석 바닥판 구조물

표 1 부재단면 크기

부재명		부재단면(mm)
기둥	C ₁	400×600
	G ₁	400×750
보	G ₂	400×900
	슬래브	165

2.1 바닥판 구조물의 고유진동수 분석

실제 구조물의 진동모드와 고유진동수는 여러 가지 방법에 의하여 구할 수 있으나 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용하는 peak picking법을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ Peak picking법은 뒤꿈치 충격과 같은 하중에 의한 구조물의 응답을 스펙트럼 분석하여 주요 진동수성분을 읽음으로서 구조물의 고유진동수를 평가하는 방법이다. 모드형상의 정점(antinode)

에 해당하는 지점에서 계측한 응답과 정점이 아닌 다른 지점에서 계측한 응답을 스펙트럼 분석하면 대상 모드의 진동수 성분에서 정점의 응답이 다른 지점의 응답보다 진폭이 크게 나타난다.

바닥판 구조물의 고유치해석에 의한 진동모드를 그림 2에 나타내었다. 고유치해석에 의한 구조물의 동적특성은 시공 오차나 구조물의 사용으로 발생하는 균열 등으로 실제 구조물의 동적특성과 약간 다를 수 있다. 고유치해석으로 모드형상의 정점을 알아낼 수 있으며 이러한 모드형상의 정점에 가속도계를 설치하여 응답을 계측하였다. 고유치해석에 의한 바닥판 구조물의 진동모드는 일반적인 바닥판 진동모드의 양상을 나타내고 있다. 바닥판의 장단변비가 1:1.8이므로 장변방향으로 진동모드가 먼저 나타나며 장변방향 보의 강성이 크지 않기 때문에 3차와 4차 모드와 같은 모드 형상이 나타난다.

계측 지점 중에서 A지점은 1차, 4차, 5차 그리고 8차 모드형상의 정점이며 B지점이 모드형상의 정점으로 나타나는 모드는 2차 모드이다. 그리고 3차와 7차 모드형상의 정점은 C지점이며 D지점은 9차 모드형상의 정점으로 나타나고 있다.

그림 3(a)는 A지점에서 뒤꿈치 충격을 가한 후에 여러 지점의 가속도응답을 계측하여 FFT(fast Fourier transform)한 것이다. A지점에 위치한 가속도계의 응답이 1차 모드 고유진동수인 19.04Hz에서 가장 크게 나타내고 있으며 36.13Hz, 42.48Hz, 67.87Hz에서도 다른 지점의 응답에 비하여 큰 응답을 나타내고 있다. 이는 A지점이 1차, 4차, 5차 그리고 8차 모드형상의 정점에 해당하는 위치이기 때문이다. 그림 3(b)는 바닥판의 1/4지점인 B지점에서 충격하중을 가한 후에 계측한 가속도응답을 스펙트럼분석한 것이다. B지점은 2차 모드형상의 정점에 해당하는 지점이므로 2차 모드의 고유진동수인 29.79Hz에서 B지점의 가속도 응답이 다른 지점의 가속도 응답보다 큰 응답을 보여 주고 있다. C지점은 3차 모드와 7차 모드의 정점에 해당하는 지점이므로 3차, 7차 모드의 고유진동수인 33.69Hz와 50.78Hz에서 다른 지점의 응답보

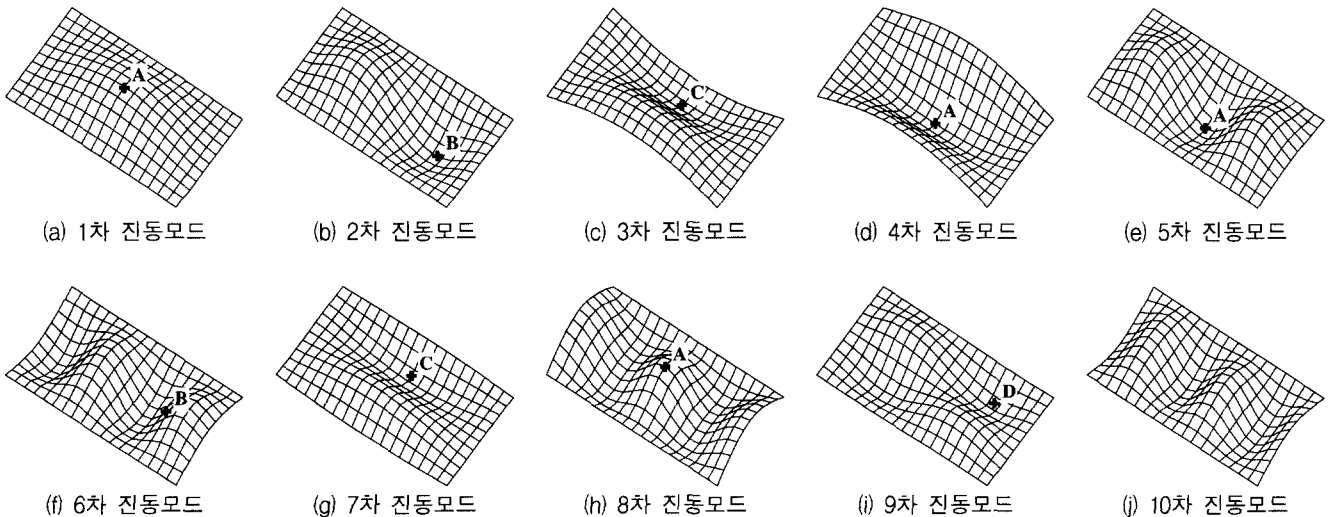


그림 2 바닥판 구조물의 진동모드

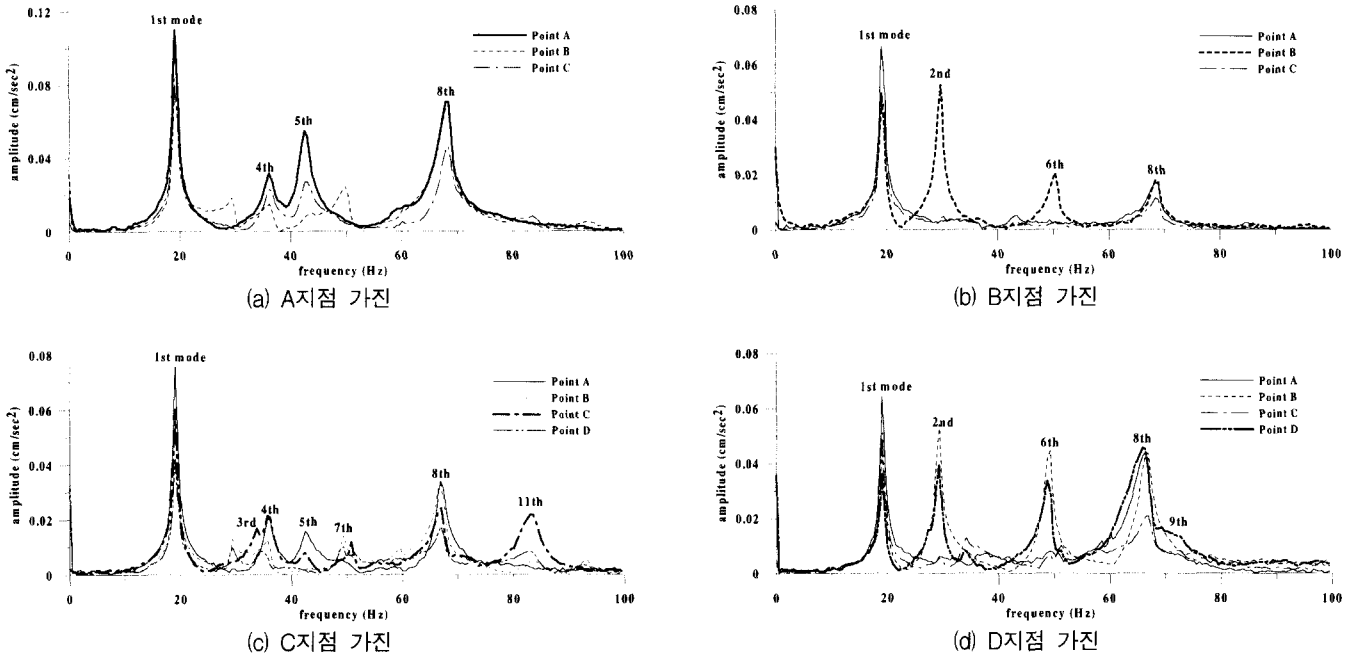


그림 3 뒤꿈치 충격 실험에 의한 가속도 응답스펙트럼

다 큰 응답을 보여주고 있다. 그림 3(d)에서는 9차 모드
 고유진동수를 파악할 수 있다. 위와 같이 여러 지점에서의
 가속도응답을 스펙트럼분석하여 실제 구조물의 고유진동수
 를 파악할 수 있다.

바닥판 구조물의 진동해석은 바닥판을 조밀하게 나눌수
 록 정확한 해를 얻을 수 있으나 요소수의 증가에 따른 절점
 수의 증가로 해석시간이 길어지며 컴퓨터의 메모리 용량이
 많이 필요하게된다. 따라서 분할된 요소 수에 따른 고유진동
 수와 진동모드의 비교 분석을 통하여 적절하게 구조물을 분
 할하여야 한다. 장방형 바닥판의 경우에는 분할된 요소의 크
 기를 장방형보다는 정방형으로 분할하는 것이 진동수와 진
 동모드 표현에 있어서 보다 효과적인 것으로 연구되어진바
 있다.⁽³⁾ 그림 4는 바닥판 구조물의 바닥판 분할정도에 따른
 고유진동수를 비교한 것이다. 바닥판을 06×04로 분할한 것
 은 분할된 요소의 크기가 150cm×125cm이다. 분할된 요소
 의 장단변비가 1:0.8정도가 되므로 구조물의 고유진동수가

다른 모델의 고유진동수와 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있다.
 그러나 바닥판 분할이 10×06정도가 되면 바닥판을 18×10
 으로 분할한 모델의 고유진동수와 거의 차이가 없는 것을
 볼 수 있다. 표 2를 살펴보면 해석모델의 고유진동수와 실제
 바닥판 구조물의 고유진동수가 6차 이상의 모드에서 차이가
 나타나지만 5차 모드까지는 매우 유사한 것을 볼 수 있다.
 이것은 해석모델의 질량과 강성이 실제 구조물에 가깝게 모
 델링되었다는 것을 의미한다.

표 2 모드별 고유진동수(단위 : Hz)

진동모드	뒤꿈치 충격 실험	고유치해석 Mesh 18×10
1차	19.04	19.03
2차	29.79	30.79
3차	33.69	32.69
4차	36.13	36.44
5차	42.48	44.12
6차	50.29	57.74
7차	50.78	57.99
8차	67.87	63.74

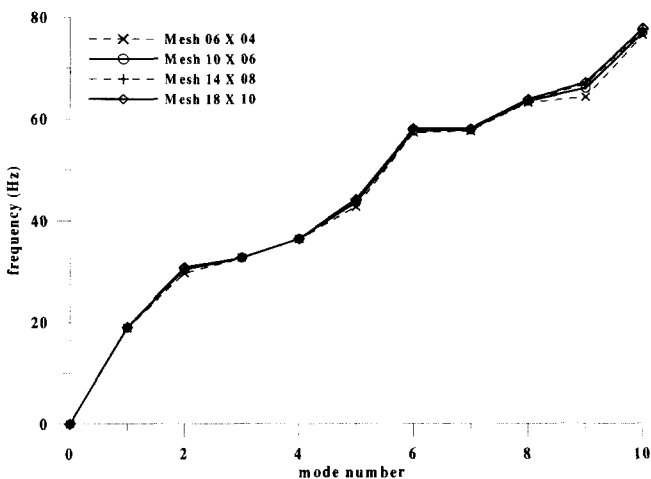


그림 4 바닥판 분할에 따른 고유진동수의 비교

2.2 구조물의 감쇠비

구조물의 중요한 동적특성 중의 하나인 감쇠비는 바닥판
 형식, 콘크리트 종류, 천장 마감 및 칸막이 벽과 같은 여러
 가지 요인에 의하여 영향을 받으므로 실제구조물의 정확한
 감쇠비를 구하는 것은 매우 어렵다. 바닥판의 감쇠비에 대하
 여 여러 기준에서 대략적으로 산정하고 있으며 캐나다 기준
 에서는 마감을 하지 않은 바닥판에는 3%, 천정, 덕트 등으로
 마감한 바닥에는 6%, 칸막이 벽과 같은 비구조재가 있는 바
 닥판 시스템에는 13%의 감쇠비를 적용하고 있다.⁽⁴⁾

실제 바닥판 구조물의 감쇠비는 충격하중을 가한 후 구조물의 자유진동에 의한 가속도응답을 분석하여 구할 수 있다. 자유진동에 의한 가속도응답-시간이력에서 연속되어 있는 두 개의 정점 값의 비는 다음 식 (1)과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} = \exp\left(\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (1)$$

식 (1)과 같은 인접한 두 정점 값의 비를 로그함수로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\delta = \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+1}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2)$$

식 (2)에서 감쇠비(ζ)가 작다면 $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1.0$ 이 되므로 식 (2)는 식 (3)과 같이 된다.

$$\zeta = \frac{1}{2} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+1}} \quad (3)$$

인접한 두개의 정점 값을 선택하여 감쇠비를 측정할 경우에 선택한 정점 값에 따라서 감쇠비가 다를 수가 있다. 따라서 인접한 정점 값 대신 여러 사이클의 정점 값을 이용하여 식 (4)와 같이 감쇠비를 측정하면 보다 정확한 감쇠비를 구할 수 있다.

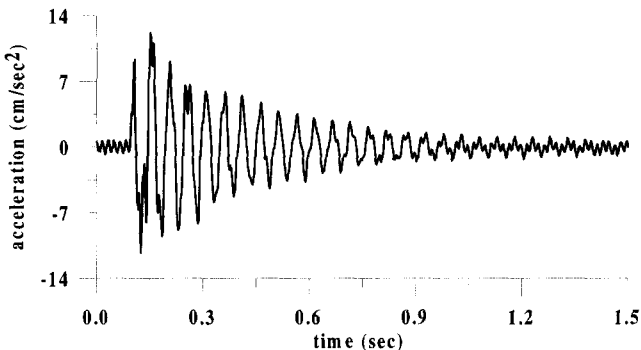
$$\zeta = \frac{1}{2(k-i)} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+k}} \quad (4)$$

그림 5와 그림 6은 바닥판 구조물의 A지점과 B지점에서 뒤꿈치 충격을 가한 후에 바닥판의 자유진동에 의한 가속도응답을 계측하여 시간영역과 진동수영역으로 나타낸 것이다.

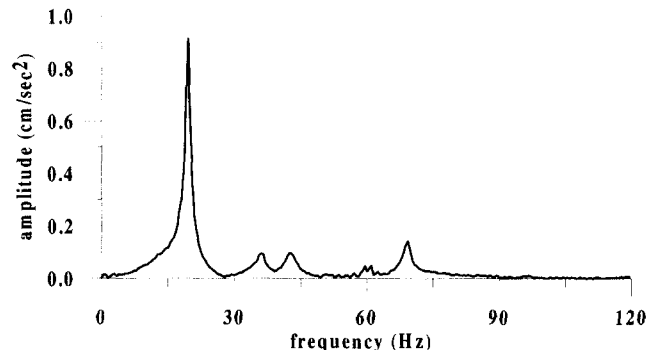
그림 5(a)는 A지점에서 뒤꿈치 충격을 가한 후에 바닥판의 자유진동에 의한 가속도응답을 계측하여 시간영역으로 나타낸 것이다. 그림 5(b)는 계측한 가속도응답을 FFT한 것으로 1차, 4차, 5차 그리고 8차 모드의 진동수 성분에서 큰 응답을 나타내고 있으나 1차 모드의 진동수 성분(19.04Hz)이 응답의 주된 성분임을 보여 주고 있다. 그러므로 A지점에서 계측한 가속도응답으로 1차 모드의 감쇠비를 평가할 수 있다.

그림 6(a)는 B지점에서 뒤꿈치 충격을 가한 후에 가속도응답을 계측한 것으로 B지점은 2차 모드의 정점에 해당하는 지점이다. 그림 6(b)는 계측가속도 응답을 스펙트럼 분석한 것으로 1차 모드 진동수(19.04Hz)와 함께 2차 모드의 진동수(29.379Hz)에서 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러므로 B지점의 경우에는 계측한 가속도응답을 모드별 성분으로 필터링하여 1차 모드의 감쇠비와 2차 모드의 감쇠비를 평가할 수 있다.

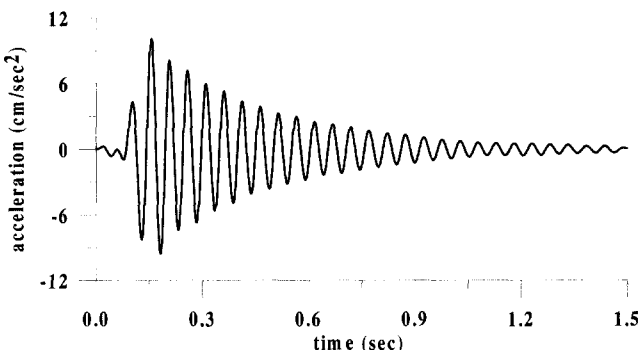
그림 5와 그림 6의 가속도응답에 대한 분석으로 구한 바닥판 구조물의 1차 모드 감쇠비는 약 1.8%정도이며, 2차 모드 감쇠비는 약 1.7%정도 된다. 계측한 감쇠비가 캐나다 규준에서 제시한 감쇠비보다 훨씬 적은 것을 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 캐나다 규준의 감쇠비를 적용할 경우에 바닥판 구조물의 응답이 과소평가 될 수 있으므로 뒤꿈치



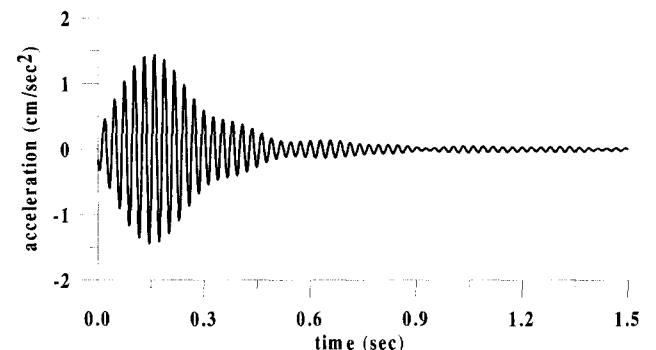
(a) A지점 계측 가속도응답



(b) A지점 가속도응답의 FFT

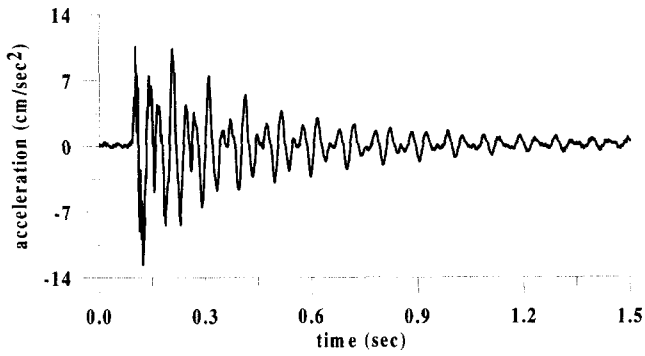


(c) 1차모드 진동수 영역 필터링

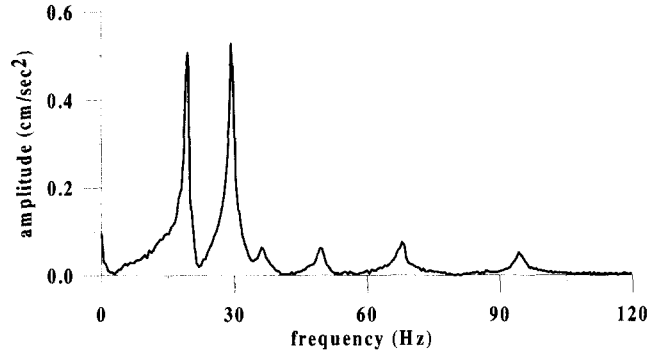


(d) 4차모드 진동수 영역 필터링

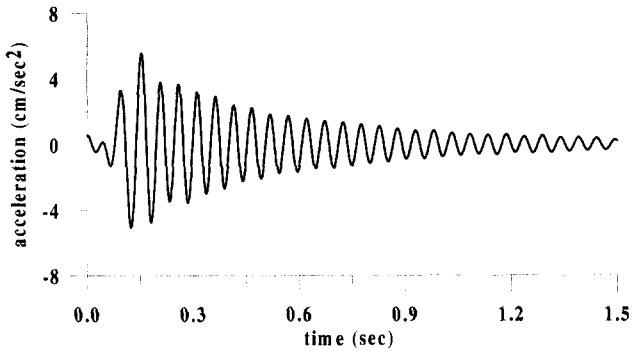
그림 5 1차 모드 감쇠비 평가를 위한 A지점 가속도응답



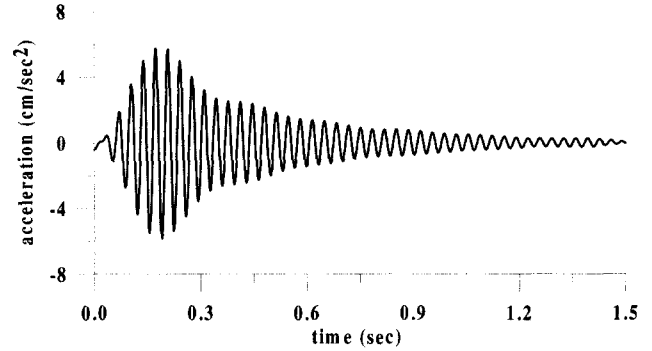
(a) B지점 계측 가속도응답



(b) B지점 가속도응답의 FFT



(c) 1차모드 진동수 영역 필터링



(d) 2차모드 진동수 영역 필터링

그림 6 2차 모드 감쇠비 평가를 위한 B지점 가속도응답

충격 실험으로 구한 1.8%의 감쇠비를 적용한다.

3. 진동해석을 위한 등가 보행하중의 적용

3.1 로드셀을 이용하여 계측한 보행하중의 분석

보행하중에 대한 주요 매개 변수로는 보행속도, 몸무게, 성별, 바닥판의 조건 등이 있다.⁽⁵⁾ 보행하중의 주요 매개 변수 중의 하나인 보행속도에 따른 하중-시간이력을 계측하여 보행하중의 양상을 분석하고 계측한 보행하중은 수치해석을 위한 입력하중으로 사용되었다. 보행에 의한 동적하중은 일반적으로 두개의 정점성분을 가지고 있으며 첫 번째 정점 성분은 발뒤꿈치의 충격에 의하여 나타나는 성분이며 두 번째 성분은 발가락의 접촉에 의하여 나타나는 성분이다. 이러한 정점은 보행하중의 크기를 평가하는데 이용된다. 보행하중의 최대정점을 보행자의 몸무게에 대한 비로 나타낸 최대 동적하중계수는 보행속도에 따라서 다르게 나타난다. 느린 보행의 최대 동적하중계수는 1.06~1.14로 나타나고 있으며 보통보행의 최대 동적하중계수는 1.08~1.21로 느린보행에 비하여 약간 크게 나타나고 있다. 빠른보행의 최대 동적하중계수는 1.23~1.36으로 다른 두 보행에 비하여 매우 크게 나타나고 있다. 그러므로 보행속도가 빠르면 보행하중의 동적효과가 커지며 빠른보행의 경우에는 동적효과에 의하여 몸무게의 약 30%정도 되는 하중이 추가되는 것을 알 수 있었다.⁽⁷⁾

3.2 진동해석을 위한 보행하중의 적용

구조물의 진동해석을 위한 보행하중의 적용에 있어서 기

존의 연구에서는 한 지점에 보행하중을 연속적으로 가하거나 또는 주기하중으로 이상화시킨 동적하중 식을 사용하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 이러한 방법은 보행의 이동효과를 고려하지 못하기 때문에 새로운 적용방법이 필요하게 되었다.

3.2.1 절점 보행하중

이동효과를 고려한 보행하중의 적용 방법 중에 하나는 그림 7과 같이 구조물을 보폭에 맞추어 분할하고 분할하여 생성된 절점에 시간지연을 갖는 보행하중을 순차적으로 가하는 것이다. 지연시간은 한 발이 바닥판의 한 절점에 가해지는 시간과 다른 발이 인접한 절점에 가해지는 시간 사이의 차이로 나타낼 수 있다. 오른발과 왼발이 번갈아 가면서 가해지는 대부분의 보행하중은 한발이 바닥판에서 떨어지기 전에 다른 한발이 바닥판에 닿게 되므로 오른발과 왼발의 보행하중이 그림 8과 같이 시간 축에 대하여 약간 겹치는 것을 볼 수 있다. 시간지연(time delay)을 갖는 절점 보행하

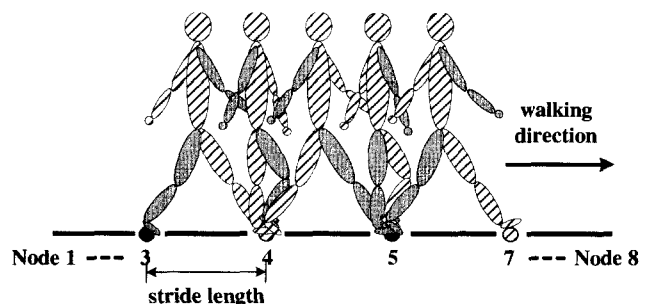


그림 7 절점 보행하중

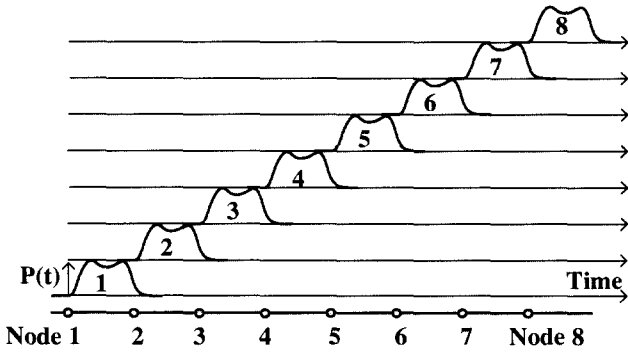


그림 8 시간지연 절점 보행하중

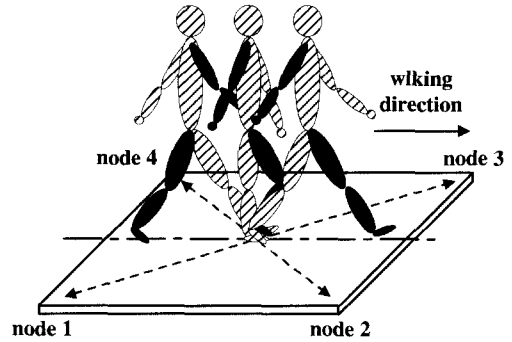


그림 9 판요소에 작용하는 보행하중

중 모델은 보행하중이 가해지는 지점마다 절점이 있어야 하므로 구조물의 모델링과 해석에 있어서 비효율적이다. 그러므로 보폭이 변하는 경우에는 다시 구조물을 모델링하여야 하는 문제점을 가지고 있다.

3.2.2 등가보행하중

보행하중을 받는 구조물의 진동해석을 위해서 바닥판을 보폭에 맞추어 분할할 경우 절점이 많아지므로 비효율적인 해석이 될 수 있다. 그러므로 바닥판을 구조물의 진동모드나 고유진동수와 같은 동적특성에 크게 영향을 주지 않을 정도로 적절하게 분할하고 절점 이외에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하여 적용한다면 보폭에 관계없이 구조물을 모델링할 수 있으며 요소수를 줄임으로서 효율적인 해석이 가능하다.⁽⁶⁾

그림 9와 같이 판요소의 내부에 작용하는 보행하중은 식 (5)와 같이 판요소의 절점에 대한 등가의 보행하중으로 치환될 수 있다. 본 연구에 사용한 MZC 요소는⁽⁶⁾ 절점당 하나의 연직 자유도와 두개의 회전자유도를 가지고 있으므로 그림 10과 같이 각각의 절점에 대하여 하나의 연직 하중과 두 방향의 모멘트하중을 갖는 등가의 보행하중으로 나타낼 수 있다.

$$F_i^{(p)}(t) = [P_i(t) \quad Mx_i(t) \quad My_i(t)]^T \quad (5)$$

$$= w(t) [N_{1i} \quad N_{2i} \quad N_{3i}]^T$$

P_i, Mx_i, My_i 는 절점 i 의 연직하중, x 축 모멘트하중, y 축 모멘트하중을 의미하며 N_{1i}, N_{2i}, N_{3i} 는 절점 i 의 변위형상함수이다. 식 (5)의 등가 보행하중을 형상함수를 이용하여 나타내면 식 (6)과 같이 표현된다.

$$P_i(t) = w(t) \left\{ \frac{1}{8} (1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(2 + \xi_0 + \eta_0 - \xi^2 - \eta^2) \right\} \quad (6-a)$$

$$Mx_i(t) = w(t) \left\{ -\frac{1}{8} b \eta_i (1 + \xi_0)(1 - \eta_0)(1 + \eta_0)^2 \right\} \quad (6-b)$$

$$My_i(t) = w(t) \left\{ \frac{1}{8} a \xi_i (1 - \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \xi_0)^2 \right\} \quad (6-c)$$

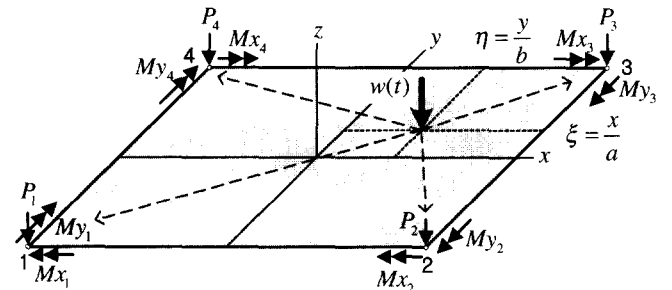


그림 10 판요소의 등가 보행하중

4. 사람의 움직임에 의한 예제 구조물의 응답

구조물의 진동해석을 위하여 적용하는 감쇠비는 콘크리트 구조물인 경우 약 3%~5% 정도의 감쇠비를 적용하는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 뒤꿈치 충격 실험에서 구한 감쇠비를 적용하여 진동해석을 수행하였다.

4.1 뒤꿈치 충격하중에 의한 바닥판 구조물의 응답

4.1.1 뒤꿈치 충격하중

뒤꿈치 충격하중(heel drop impact loads)은 사람이 로드셀에 올라서서 뒤꿈치를 들고 있다가 갑자기 떨어뜨릴 때 발생하는 충격하중을 직접 계측한 것이다. 사람이 로드셀에 올라섰을 때를 기준으로 로드셀을 영점 조절하여 계측하였다.

그림 11은 몸무게 64.5kg의 사람에 의한 뒤꿈치 충격하중을 나타낸 것이다. 하중이 영(zero)보다 작게 나타나는 것은 뒤꿈치로 충격을 가하기 전에 뒤꿈치를 들어올리는 순간 몸무게가 중력방향에 대하여 반대로 작용하기 때문이다. 계측한 뒤꿈치 충격하중-시간이력 양상은 Ohmart가 계측한 뒤꿈치 충격하중과 매우 유사한 것을 볼 수 있다.⁽⁹⁾ 뒤꿈치 충격하중은 그림 12의 A지점에 가진하였으며 가속도 응답은 가진 지점 옆에서 계측하였다.

4.1.2 해석응답과 계측응답의 비교

뒤꿈치 충격에 의한 바닥판 구조물의 계측 응답과 해석 응답을 비교 분석하였다. 뒤꿈치 충격에 의한 구조물의 가속도응답은 뒤꿈치 충격효과로 초기에 크게 나오며 충격효과가 사라진 후에는 자유진동 양상을 나타내고 있다.

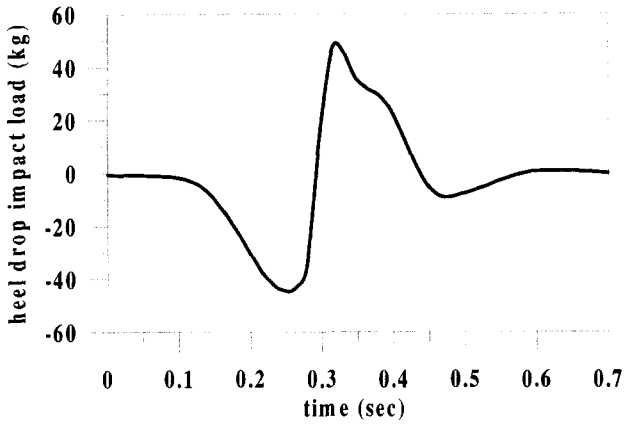


그림 11 뒤꿈치 충격하중

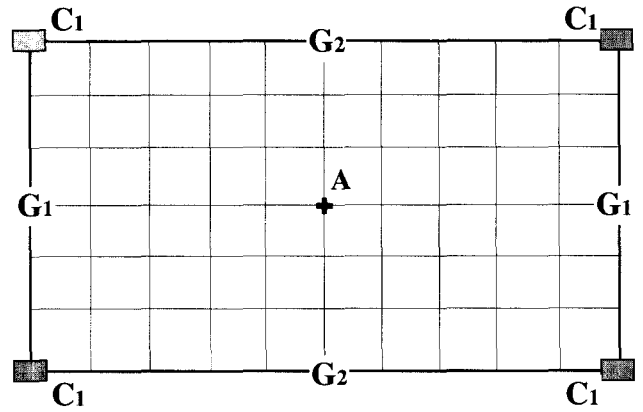


그림 12 가속도 응답 계측 지점

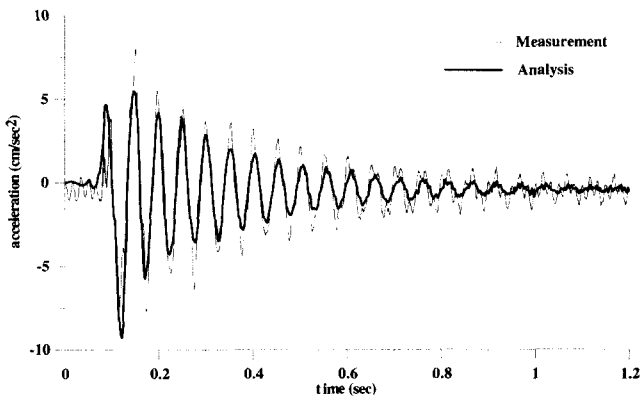
천장과 같은 마감이 없는 콘크리트 구조물의 경우에는 약 3%의 감쇠비를 적용하여 해석하는 것이 일반적이다. 그러나 건축 구조물의 재료적인 조건과 시공조건에 따라서 감쇠비가 3%보다 낮거나 높을 수 있다. 건축물을 사용으로 건설초기에 비하여 구조물의 감쇠효과가 줄어들 수 있기 때문에 실제 구조물의 진동해석에 있어서 감쇠비는 계측하여 적용하는 것이 보다 바람직하다. 그림 13(a)와 (b)는 A 지점에서의 뒤꿈치 충격에 의한 구조물의 가속도 응답을 나타낸 것으로 해석응답은 감쇠비를 다르게 적용한 것이다. 계측 응답과 해석 응답이 미소한 차이를 보이나 3.0%의 감쇠비를 적용하여 해석한 구조물의 응답보다 뒤꿈치

충격 실험으로 구한 감쇠비(1.8%)를 적용하여 해석한 구조물의 응답이 계측한 가속도 응답에 보다 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

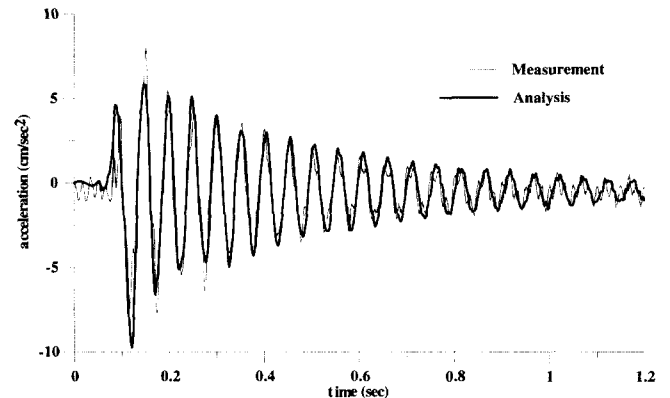
4.2 한 사람 보행하중에 의한 바닥판 구조물의 응답

4.2.1 보행하중

바닥판 구조물에는 몸무게 78kg의 보행자가 1.80Hz로 보행할 때에 계측한 보행하중을 적용하였으며 하중-시간 이력은 그림 14와 같다. 그림 15는 보행하중의 가진 방향 및 가진점



(a) 계측응답과 해석응답(감쇠비 : 3.0%)



(b) 계측응답과 해석응답(감쇠비 : 1.8%)

그림 13 뒤꿈치 충격에 의한 구조물의 가속도 응답

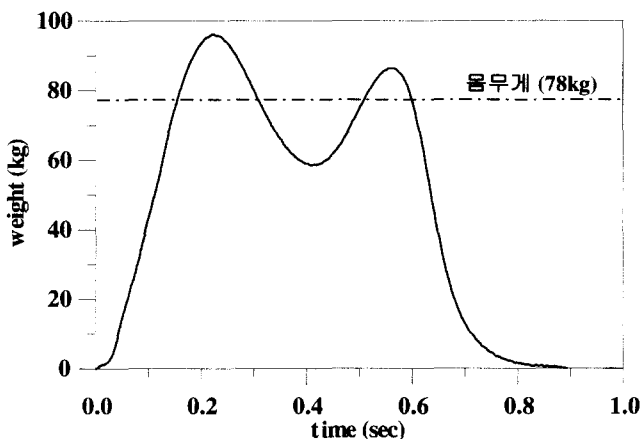


그림 14 보행하중

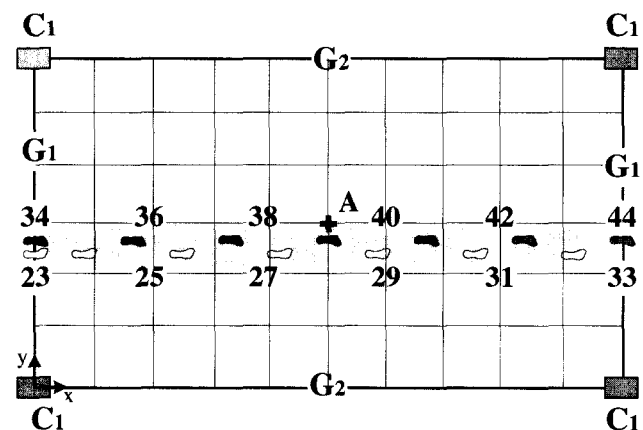


그림 15 보행하중의 가진방향 및 가진점

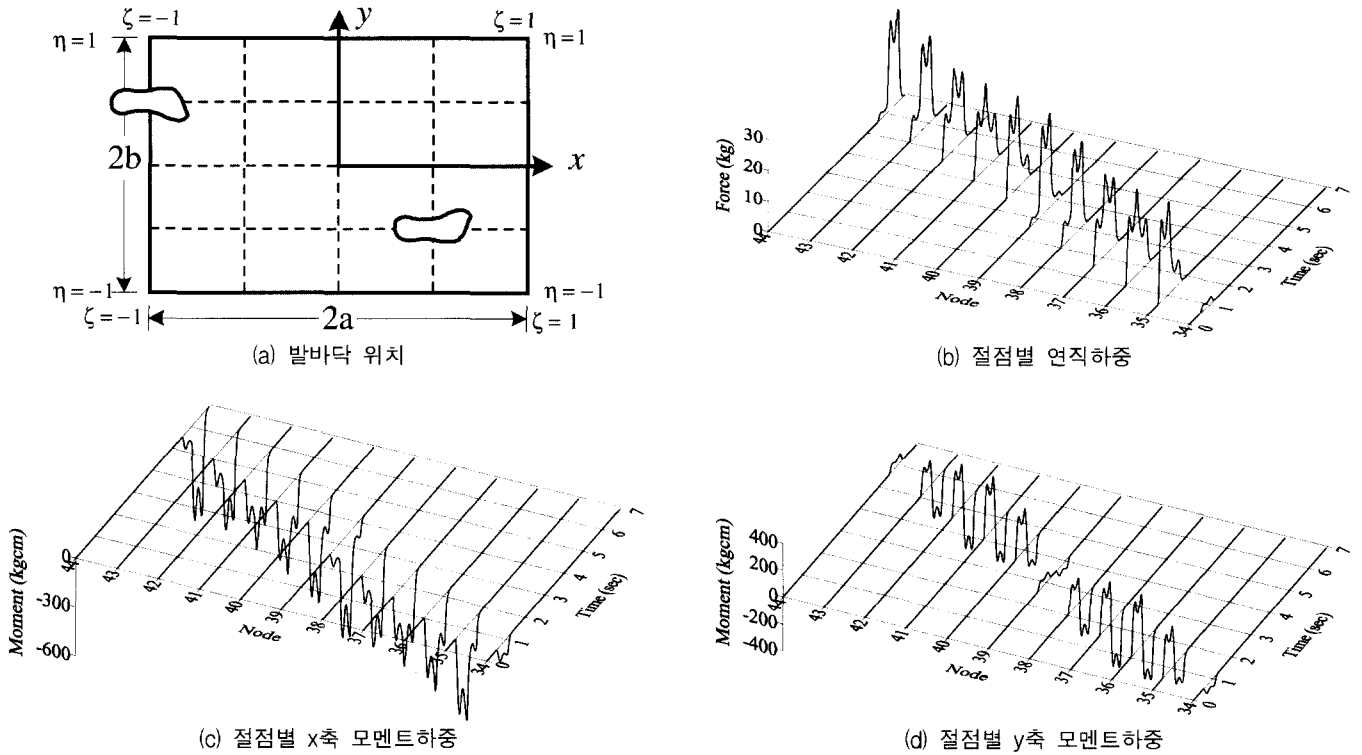


그림 16 절점별 등가 보행하중

등가 보행하중은 요소의 형상함수를 이용하여 치환되기 때문에 그림 16(a)와 같이 판요소의 크기와 가진 되는 발바닥의 위치에 따라서 다르게 표현된다. 그림 16(b)은 등가로 치환된 절점별 연직하중이며 그림 16(c)와 그림 16(d)는 절점별 x축 모멘트하중과 y축 모멘트하중을 나타낸 것이다. 보행자의 보폭을 75cm로 하였기 때문에 치환된 등가보행하중은 절점 39에 대하여 대칭으로 나타나고 있다.

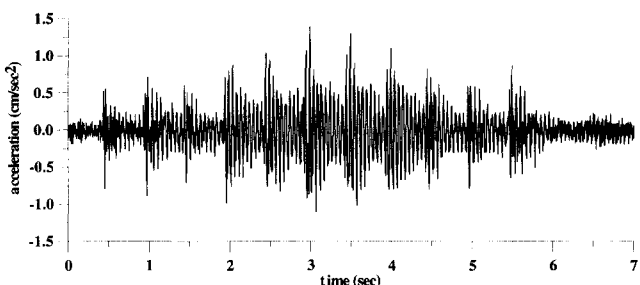
4.2.2 보행하중에 의한 구조물의 응답

바닥판의 분할정도에 따른 구조물의 진동모드 및 고유진동수의 비교 분석에 대한 기존의 연구에서 바닥판의 단변방향을 최소한 4개정도로 분할하면 조밀하게 분할하여 수치해석한 구조물의 고유진동수와 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있었다.⁽³⁾ 그러므로 본 연구에서는 2장에서 언급한바와 같이 예제구조물을 10×06으로 분할하여 수치해석을 수행하였으며 구조물의 감쇠는 Rayleigh damping을 취하였다.

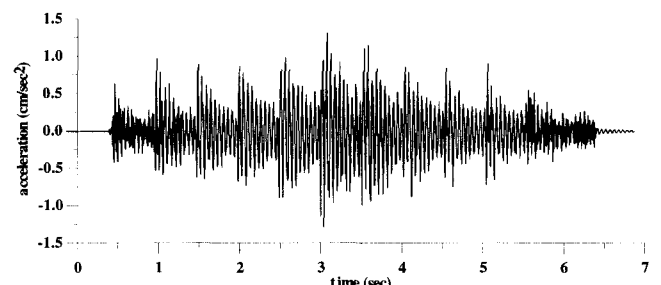
구조물의 가속도응답이 가장 크게 나타나는 바닥판의 중

앙(A 지점)에서 응답을 계측하였다. 그림 17(a)는 계측한 가속도 응답을 시간영역으로 나타낸 것이며 그림 17(b)는 해석에 의한 가속도 응답을 나타낸 것이다. 수치해석을 위한 보행하중은 매우 일정하게 입력되지만 응답계측을 위하여 가해지는 보행하중은 일정하지 않기 때문에 계측 응답과 해석 응답의 진폭이 다소 차이가 있다. 그러나 응답의 전체적인 양상이 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

그림 18은 가속도 응답을 스펙트럼 분석한 것으로 보행진동수의 정수배 성분에서 응답이 나타나고 있다. 그림 18(a)는 계측 가속도 응답을 FFT한 것으로 바닥판 중앙이 모드형상에서 정점으로 나타나는 1차 모드(19.00Hz), 4차 모드(36.38Hz), 5차 모드(43.53Hz)의 성분에서 응답이 크게 나타나고 있으며 70Hz이상의 고차 진동수 성분에서도 응답이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 18(b)는 해석에 의한 가속도 응답을 FFT한 것으로 1차, 5차 모드성분에서 응답이 크게 나타나고 있으나 고차 진동수성분에서는 계측 가속도응답의 진폭보다 작게 나타나고 있다. 그러나 계측응답과 해석응답의

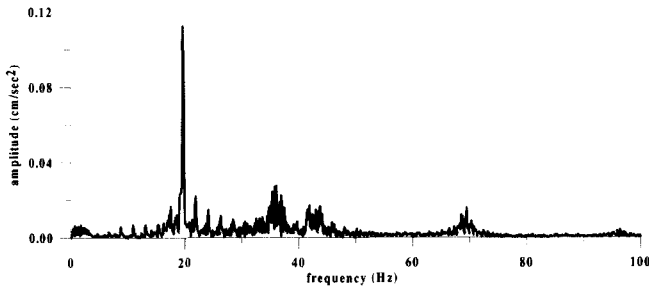


(a) 계측에 의한 가속도응답

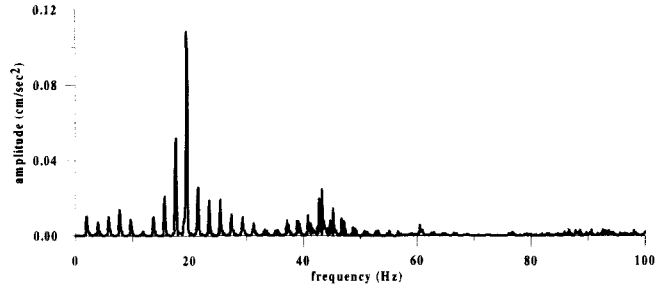


(b) 해석에 의한 가속도응답

그림 17 보행하중에 의한 바닥판 구조물의 가속도 응답



(a) 계측 응답의 FFT



(b) 해석 응답의 FFT

그림 18 바닥판 구조물의 가속도 응답에 대한 FFT

진폭이 크게 나타나는 진동수대역이 일치하는 것을 볼 수 있다.

4.3 무리 보행하중에 의한 예제 구조물의 응답

건축물 바닥판의 과도한 진동은 한 사람에 의한 보행하중보다는 여러 사람에 의한 보행하중에 의하여 발생할 가능성이 더 높다. 그러므로 무리 보행하중을 받는 구조물의 진동 해석이 필요하리라 판단된다. 본 연구에서는 무리 보행하중을 받는 구조물의 진동해석을 위하여 등가의 무리 보행을 적용하였다.

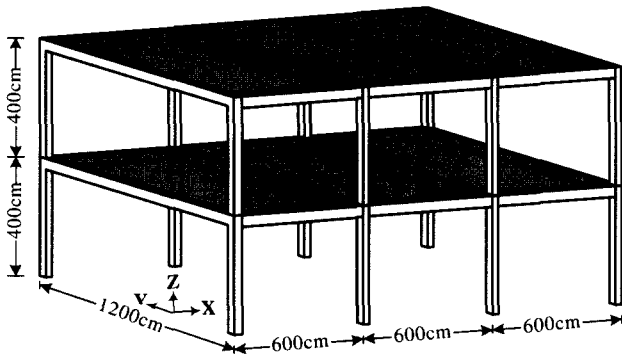
무리 보행하중을 받는 예제 구조물은 그림 19(a)와 같이 1800cm×1200cm의 2층 철근콘크리트 구조물로 바닥판을 12×08로 분할하였다. 표 3은 예제 구조물의 부재단면을 나타낸 것이다. 그림 19(b)와 같이 두 사람이 각각 다른 보행진동수로 보행진로-1과 보행진로-2를 따라서 보행하였다.

표 3 예제 구조물의 부재단면

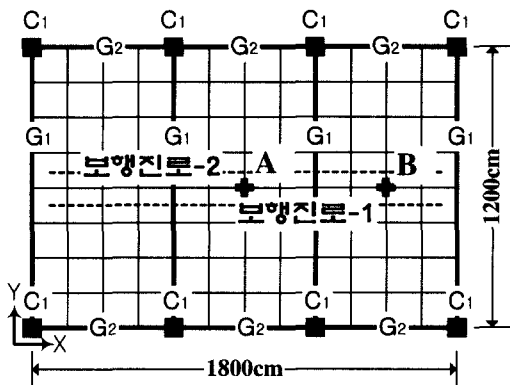
부재명		부재 단면(mm)
기둥	C ₁	400×700
	C ₂	400×700
보	G ₁	400×800
	G ₂	400×600
슬래브		150

그림 20은 두 사람이 나란히 보행하는 경우와 마주 보며 보행하는 경우의 보행하중을 등가의 무리 보행하중으로 치환하는 방법을 나타낸 것이다. 등가 무리 보행하중은 보행자들의 보행속도에 따라서 절점마다 다르게 나타난다. 보행자-1은 1.8Hz로 보행자-2는 2.0Hz의 보행진동수로 보행하였다.

그림 21과 그림 22는 예제 구조물의 2층 바닥판을 그림 20과 같이 두 사람이 보행할 경우 수치해석을 하여 얻은 예제 구조물의 변위응답을 나타낸 것이다. 두 사람의 보행속도는 135cm/sec와 150cm/sec이다. 그러므로 거의 비슷한 시간에 A지점을 통과하므로 그림 21(a)와 그림 22(a)에서 볼 수 있듯이 나란히 보행하는 경우와 마주 보며 보행하는 경

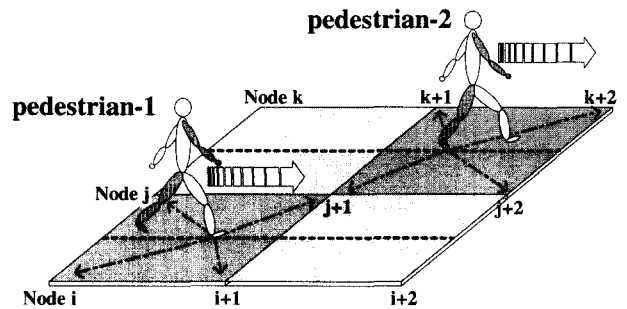


(a) 예제 구조물

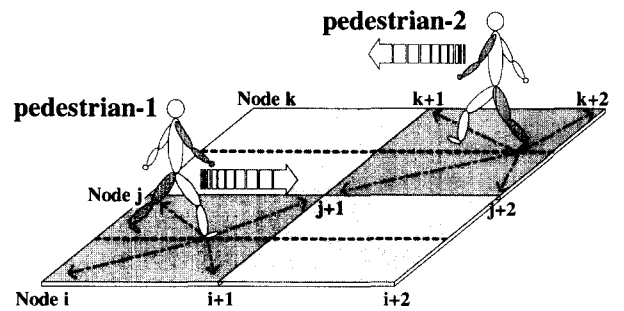


(b) 2층 평면

그림 19 수치해석을 위한 예제 구조물

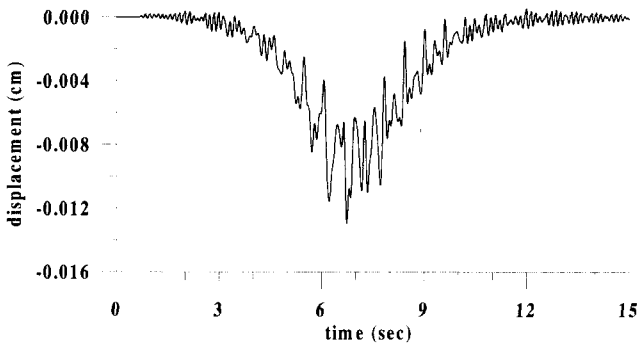


(a) 두 사람이 나란히 보행

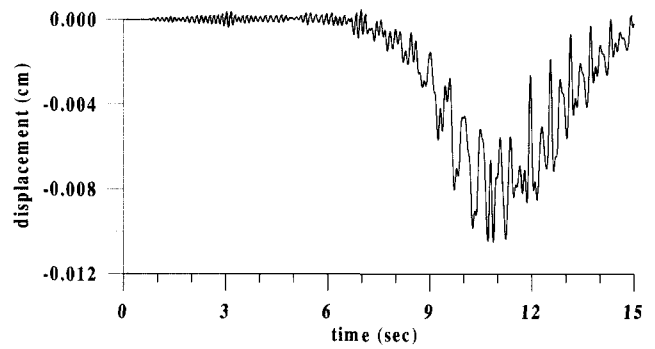


(b) 두 사람이 마주보며 보행

그림 20 등가 무리 보행하중

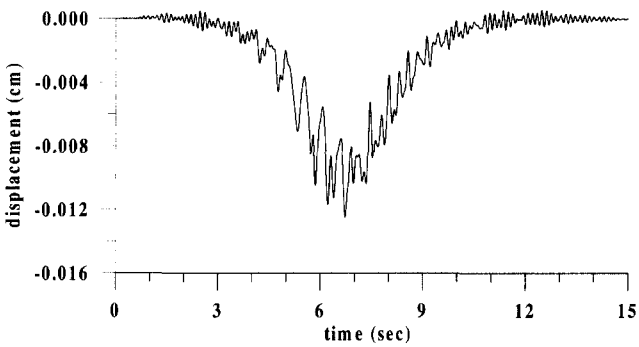


(a) A지점 변위응답

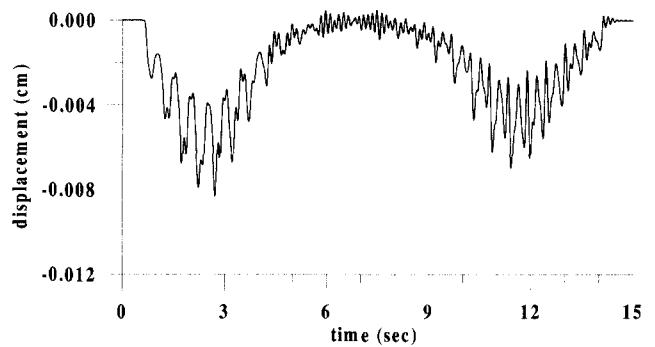


(b) B지점 변위응답

그림 21 예제 구조물의 변위응답(두 사람이 나란히 보행)



(a) A지점 변위응답



(b) B지점 변위응답

그림 22 예제 구조물의 변위응답(두 사람이 마주 보며 보행)

우의 응답이 비슷한 양상을 보인다. 그림 22(b)는 마주 보며 보행하는 경우의 B지점의 변위응답을 나타낸 것으로 두 사람이 B지점을 통과하는 시간이 다르므로 두 개의 정점이 나타난다. 그러나 나란히 보행하는 경우의 B지점 변위응답은 그림 21(b)에서 보듯이 두 사람이 B지점을 통과하는 시간대인 10초~12초 사이에서 큰 응답을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 뒤꿈치 충격 실험을 실시하여 실제 바닥판 구조물의 동적특성인 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 평가 분석하였다. 구조물의 고유진동수에 대한 분석을 통하여 구조물의 강성과 질량을 보다 실제적으로 반영할 수 있었으며 규준에서 제시한 감쇠비를 적용하여 구한 해석응답보다 계측한 감쇠비를 적용하여 구한 해석응답이 계측한 응답에 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 그리고 보행하중을 받는 실제 바닥판 구조물의 진동해석을 수행하기 위하여 보행하중을 등가의 보행하중으로 치환하여 적용하였으며 무리 보행하중을 받는 예제 구조물의 진동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 실제 구조물의 진동해석에 있어서 보다 정확한 응답을 얻기 위해서는 구조물의 고유진동수에 대한 분석이 필요하며 계측에 의한 감쇠비를 적용하는 것이 보다 타당하리라 판단된다.

둘째, 보행하중을 받는 구조물의 진동해석에서 보행하중을 점점 보행하중이나 등가 보행하중으로 적용할 수 있으며

구조물의 모델링과 진동해석에서 보다 효율적인 등가 보행하중을 적용하여도 계측응답과 매우 유사한 구조물의 해석응답을 얻을 수 있다.

셋째, 다양한 보행속도를 갖는 무리에 의한 보행하중의 경우에는 본 논문에서 제안한 등가의 무리 보행하중으로 치환하여 적용함으로써 보행자의 수와 보행속도에 제한 없이 진동해석을 수행할 수 있다.

본 논문에서는 보행하중에 대한 바닥판 구조물의 진동해석을 수행하였으나 바닥판 구조물의 진동은 보행하중 뿐만 아니라 다양한 종류의 동적하중에 의하여 발생한다. 따라서 추후 연구과제로 진동에 대한 구조물의 안전성 및 사용성 평가기준 등을 제시하기 위하여 사람의 움직임에 의하여 야기되는 다양한 형태의 동적하중에 대한 분석과 다양한 형태의 동적하중을 받는 구조물의 진동해석이 필요하리라 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Rainer G. H. and Pernica, G., "Vertical dynamic forces from footsteps," *Noise and Vibration Section, Division of Building Research, National Research Council Canada,*

- 1986, pp. 12-21.
2. Lenzen, K. H., "Vibration of steel joist concrete slab floors," *Engineering Journal*, AISC, Vol. 3, No. 3, 1966.
 3. Lee, D. G. and Kim, G. C., "Modeling of moving loads for analysis of floor vibration," *Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures*, Seoul, Korea, 2000. 10, pp. 869-879.
 4. Canadian Standards Association, *Standard S16-69, Steel Structures for Buildings Proposed Appendix G*, Ontario.
 5. Bachmann, H. and Baumann, K., "Dynamic loading induced by persons and its effect on beam structures(in German)," *Institute of Structural Engineering*, Swiss Fed. Institute of Technique, Zurich, 1987, pp. 7501-7503.
 6. 김기철, 이동근, "보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석", 한국지진공학회 논문집, Vol. 5, No. 1, 2001. 2, pp. 21-29.
 7. 김기철, 이동근, "바닥판 보행하중에 대한 실험적 연구", 한국전산구조공학회 2000년 가을 학술발표회 논문집, Vol. 13, No. 2, 2001. 10, pp. 273-280.
 8. Weaver, W. and Johnston, P. R., *Finite Elements for Structural Analysis*, New Jersey, Prentice Hall, 1984.
 9. Ohmart, R. D., "An approximate method for the response of stiffened plates to a periodic excitation on studies in engineering mechanics," Report No. 30, The University of Kansas, Center for Research in Engineering Science, Lawrence, Kansas, 1968. 4.
 10. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley & Sons, 1993.