

## 보행하중을 받는 건축물 바닥판의 진동해석

### Vibration Analysis of Building Floor Subjected to Walking Loads

김 기 철\*  
Kim, Gee-Cheol

이 동 근\*\*  
Lee, Dong-Guen

#### ABSTRACT

Recently, the damping effect of building structures are greatly reduced because the use of non-structures members as like curtain wall are decreased and large open space are in need for the service of buildings. Assembly and office buildings with a lower natural frequency have a higher possibility of experiencing excessive vibration induced by human activities as like jumping, running and walking. These excessive vibration make the occupants uncomfortable and the serviceability deterioration. The common method of application of walking loads for the vibration analysis of structures subjected to walking loads is to inflict a series unit walking load and a periodic function at a node. But this method could not consider the moving effect of walking.

In this study, natural frequency and damping ratio of plate structure are evaluated by heel drop tests. And new application of equivalent walking loads are introduced for vibration analysis of real slab system subjected to walking loads. The response obtained from the numerical analysis are compared well to the results measured by experimental tests. It is possible to efficiently analyze the vibration of floor which is subjected to walking loads by applying equivalent walking loads.

#### 1. 서론

최근에는 건축물이 장경간화 되어감에 따라서 바닥판 구조물의 연직 진동모드에 대한 고유진동수가 낮아지고 있다. 그리고 칸막이 벽과 같은 비구조재의 사용이 감소함으로써 감쇠효과가 크게 줄어들고 있어 구조물의 진동이 중요한 문제로 인식되고 있다. 대형집회공간, 쇼핑몰, 사무실 등과 같은 건축물에서는 이용자의 보행하중이나 충격하중과 같은 동적하중에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 구조물의 안정성은 물론 내부 부착물의 손상과 이용자의 불편감 유발 등으로 건축물의 사용성을 저하시키는 원인이 된다.

보행하중에 대한 기존의 연구는 주로 보행하중에 대한 분석과 보행하중을 받는 구조물의 사용성 평가가 대부분을 차지하고 있으며 수치해석을 위한 보행하중의 적용에 대한 연구는 미비한 실정이다.<sup>(1),(2)</sup> 구조물의 진동해석을 위한 보행하중의 적용은 한 지점에 단위 보행하중이나 주기하중으로 이상화시킨 보행하중을 가하는 것이 일반적이다. 그러나 구조물에 작용하는 보행하중은 이동하면서 가해지기 때문에 보행방향을 따라서 여러 절점에 순차적으로 가해져야 한다.

본 연구에서는 구조물의 진동해석을 위하여 구조물의 동적특성인 고유진동수와 감쇠비를 heel

\* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

drop tests하여 평가하였으며 보행하중을 등가의 보행하중으로 치환하여 적용하는 방법을 제안하였다. 제안된 등가 보행하중의 타당성을 검증하기 위하여 예제 구조물의 해석 응답과 계측 응답을 비교 분석하였다.

## 2. Heel drop tests에 의한 바닥판 구조물의 동적특성 분석

예제 구조물의 진동해석에 필요한 구조물의 감쇠비를 결정하고 진동모드와 진동수를 평가하기 위하여 heel drop tests를 실시하였다. 진동평가를 위한 예제 구조물은 4층 구조물이며 3층 슬래브에서 가속도응답을 계측하였다. 계측 대상 슬래브는 그림 1(a)와 같으며 단면방향으로 시공줄눈이 있다. 예제 구조물의 부재 단면은 표 1과 같으며 재질은 콘크리트이다. 그림 1(b)와 같이 계측 대상 슬래브의 A, B, C, D 지점에 가속도계를 설치하여 heel drop impact에 의한 가속도 응답을 계측하였다.

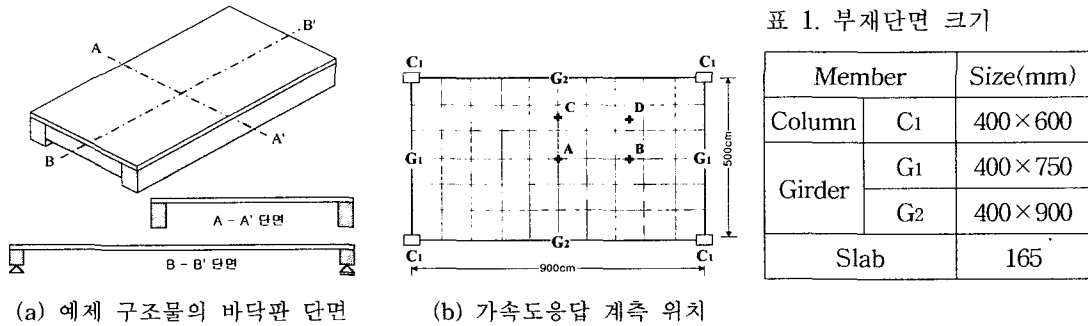


그림 1. 진동해석 예제 구조물

### 2.1 구조물의 고유진동수 분석

실제 구조물의 진동모드와 고유진동수를 heel drop impact에 의한 여러 지점에서 가속도응답을 스펙트럼 분석하여 알아낼 수 있다. 진동수영역에서의 응답을 살펴보면 어떠한 모드의 진동수 성분에서 그 모드 형상의 정점(antinode)에서 계측한 응답이 다른 지점에서 계측한 응답보다 진폭이 크게 나타난다.

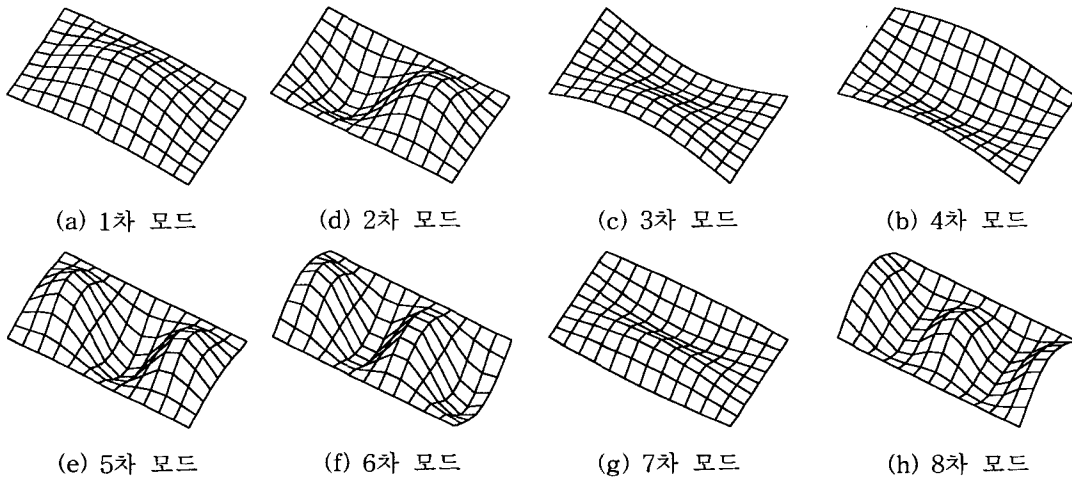


그림 2. 슬래브의 진동모드

그림 2는 가속도응답을 계측한 대상 슬래브의 진동모드를 나타낸 것이다. 진동모드는 일반적인 바닥판의 진동모드의 양상을 나타내고 있다. 슬래브의 장단변비가 1:1.8이므로 단변방향으로 진동모드가 먼저 나타나며 장변방향의 거더의 강성 크지 않기 때문에 3차와 4차 모드와 같은 모드 형상이 나타난다. A지점이 모드 형상의 정점으로 나타나는 모드는 1차, 4차, 5차 모드이고 B지점이 모드 형상의 정점으로 나타나는 모드는 2차 모드이다. C지점이 모드 형상의 정점으로 나타나는 모드는 3차와 7차 모드이며 D지점이 정점으로 나타나는 모드는 9차 모드로 그림 2에는 나타내지 않았다.

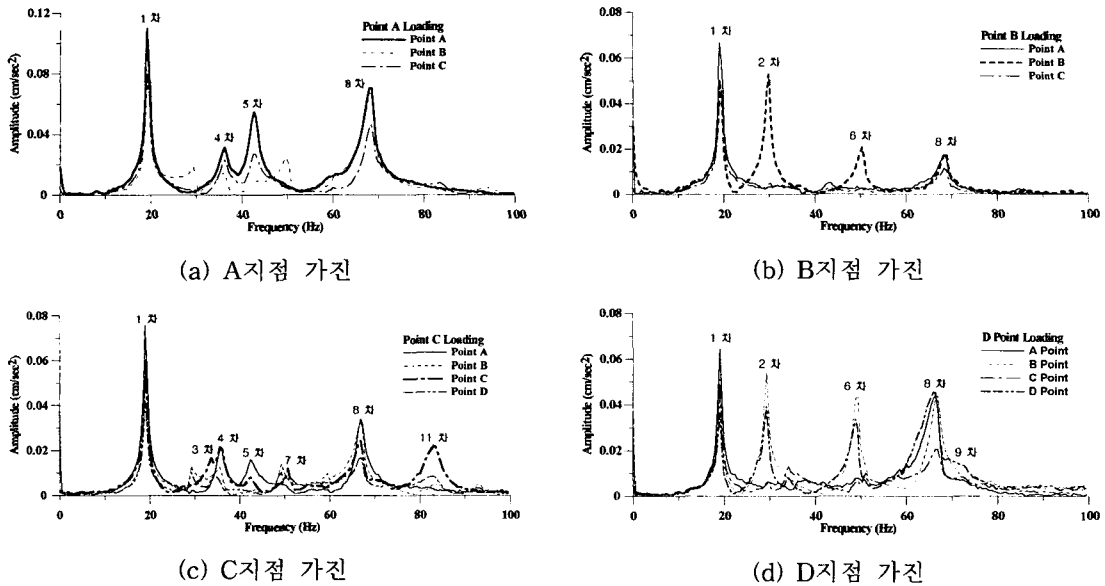


그림 3. 가속도 응답스펙트럼

그림 3(a)는 A지점에 heel drop impact를 가한 후 여러 지점에서의 가속도응답을 계측하여 FFT(fast fourier transform)한 것이다. A지점의 응답이 1차 모드 진동수인 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, 8차 모드형상의 정점에 해당하는 위치이기 때문이다. 그림 3(b)는 바닥판의 1/4지점인 B지점에 impact를 가한 후 계측한 가속도응답을 FFT한 것이다. B지점은 2차 모드 형상의 정점에 해당하는 지점이므로 2차 모드의 진동수인 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 진동수인 33.69Hz와 50.78Hz에서 다른 지점의 응답보다 큰 응답을 보여주고 있다. 그림 3 (d)에서는 8차 모드의 고유진동수를 파악할 수 있다. 위와 같이 여러 지점의 가속도 응답에 대한 스펙트럼분석을 통하여 실제구조물의 고유진동수를 파악할 수 있다. 표 2는 heel drop tests와 고유치 해석에 의한 계측 대상 슬래브의 모드별 고유진동수를 나타낸 것이다.

바닥판 진동해석은 해석 대상 바닥판을 조밀하게 나눌수록 정확한 해를 얻을 수 있으나 요소수의 증가에 따른 절점수의 증가로 해석시간이 길어지며 기억용량이 많이 필요하게 된다. 따라서 분할된 요소 수에 따른 고유진동수와 진동모드의 비교 분석을 통하여 적절하게 요소를 분할하여야 한다. 장방형 바닥판의 경우 바닥판의 분할된 요소의 크기를 장방형보다는 정방형으로 분할하는 것이 진동수와 진동모드 표현에 있어서 보다 효과적인 것으로 연구되어진바 있다.<sup>(3)</sup>

표 2. 모드별 진동수 (단위:Hz)

고유진동수	Heel drop tests	Analysis (Mesh 18×10)
1차	19.04	19.09
2차	29.79	30.91
3차	33.69	33.07
4차	36.13	36.84
5차	42.48	43.82
6차	-	56.66
7차	50.78	58.41
8차	65.92	62.46

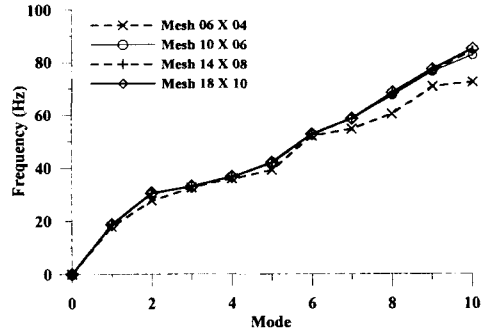


그림 4. 바닥판 분할에 따른 구조물의 고유진동수

그림 4는 바닥판 분할정도에 따른 해석모델별 고유진동수를 비교한 것이다. 바닥판을 06×04로 분할한 모델은 분할된 요소의 크기가 150cm×125cm이다. 분할된 요소의 장단변비가 1:0.8정도가 되므로 구조물의 고유진동수가 다른 모델의 고유진동수와 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 그러나 바닥판 분할이 10×06정도가 되면 바닥판을 18×10으로 분할한 모델의 고유진동수와 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 예제구조물의 바닥판은 10×06으로 분할하여 진동해석을 수행하여도 조밀하게 분할하여 진동해석을 수행한 구조물의 응답과 거의 차이가 없다. 해석모델의 고유진동수와 실제구조물의 고유진동수가 매우 유사하며 이는 해석모델의 질량과 강성이 실제구조물에 가깝게 모델링되었다는 것을 의미한다.

## 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 감쇠비를 여러 규준에서 대략적으로 산정하고 있으며 캐나다 규준에서는 마감층을 하지 않은 바닥판에는 3%, 천정, 덕트 등으로 마감한 바닥에는 6%, 칸막이 벽과 같은 비구조체가 있는 바닥판 시스템에는 13%의 감쇠비를 적용하고 있다.

실제 바닥판 슬래브의 감쇠비는 impact를 가한 후 구조물의 자유진동에 의한 가속도응답의 분석을 통하여 구할 수 있다. 자유진동에 의한 구조물의 시간이력 응답에서 인접한 두 정점의 비를 자연로그함수로 나타내면 식(1)와 같다.

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

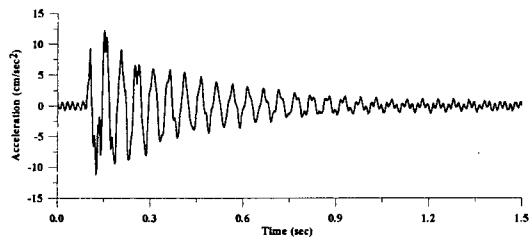
식(2)에서 감쇠비(ζ)가 작다면,  $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1.0$ 이 되므로 식(1)은 식(2)와 같이 된다.

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

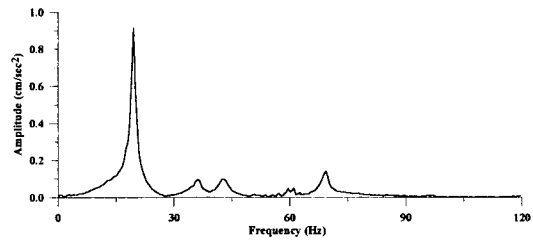
인접한 두개의 peak 값을 선택하여 감쇠비를 측정할 경우, 선택한 peak 값에 따라서 감쇠비가 다를 수가 있다. 따라서 인접한 peak 값 대신 여러 사이클의 peak 값을 이용하여 식(3)과 같이 감쇠비를 측정하면 보다 정확한 감쇠비를 구할 수 있다.

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

그림 5와 그림 6은 A지점과 B지점에서 heel drop impact를 가한 후 바닥판의 자유진동에 의한 가속도응답을 시간영역과 진동수영역으로 나타낸 것이다.



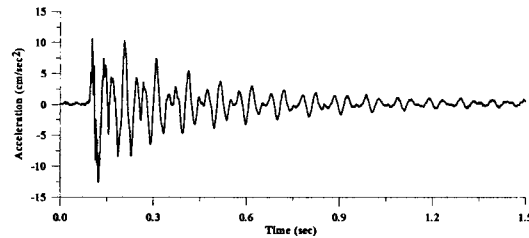
(a) A지점에서 계측한 가속도응답



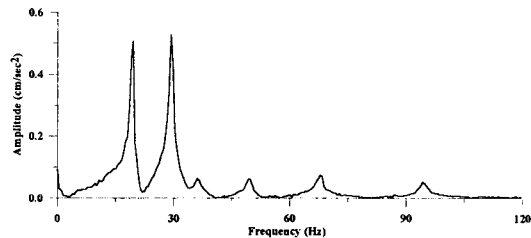
(b) A지점 가속도응답의 FFT

그림 5. 1차 모드 감쇠비 평가를 위한 계측 가속도응답

그림 5(a)는 A지점에서 heel drop impact를 가한 후 바닥판의 자유진동에 의한 가속도응답을 계측하여 시간영역으로 나타낸 것이다. 그림 5(b)는 계측한 가속도응답을 FFT(fast fourier transform)한 것으로 1차, 4차, 5차 고유진동수 성분에서 큰 응답을 나타내고 있으나 1차 모드의 진동수 성분이 가장 큰 응답을 보여주고 있다. A지점의 가속도응답으로 1차 모드의 감쇠비를 평가할 수 있다.



(a) B지점에서 계측한 가속도응답



(b) B지점 가속도응답의 FFT

그림 6. 2차 모드 감쇠비 평가를 위한 계측 가속도응답

그림 6(a)는 B지점에서 heel drop impact를 가한 후 가속도응답을 계측한 것으로 B지점은 2차 모드의 정점에 해당하는 지점이다. 그림 6(b)는 계측가속도 응답을 스펙트럼 분석한 것으로 1차 모드 진동수(19.04Hz)는 물론 2차 모드의 진동수(29.379Hz)에서 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 B지점의 가속도응답을 모드별 성분으로 필터링하여 1차 모드의 감쇠비는 물론 2차 모드의 감쇠비를 평가할 수 있다. 그림 5와 그림 6의 가속도응답의 분석으로 구한 예제 구조물의 1차 모드 감쇠비는 약 1.8%정도이며, 2차 모드 감쇠비는 약 1.7%정도 된다. 따라서 구조물의 진동 해석에 있어서 1.8%의 감쇠비를 적용하는 것이 타당하다.

### 3. 진동해석을 위한 등가 보행하중의 적용

#### 3.1 로드셀을 이용하여 계측한 보행하중의 분석

보행에 의한 동적하중은 일반적으로 두개의 정점성분을 가지고 있으며 첫 번째 정점성분은 발 뒤꿈치의 충격에 의하여 나타나는 성분이며 두 번째 성분은 발가락의 접촉에 의하여 나타나는 성분이다. 이러한 정점은 보행하중의 크기를 평가하는데 이용된다. 보행하중의 최대정점은 보행속도에 따라서 다르게 나타난다. 느린보행의 동적하중계수는 1.06~1.14, 보통보행의 동적하중계수는 1.08~1.21, 빠른보행의 동적하중계수는 1.23~1.36로 다른 두 보행에 비하여 매우 크게 나타나고 있다. 따라서 보행속도가 빠를수록 보행하중의 동적효과가 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 동적하중계수는 몸무게보다는 보행속도에 의하여 크게 영향을 받고 있다.

### 3.2 진동해석을 위한 등가 보행하중의 적용

보행하중을 받는 구조물의 진동해석을 위해서 바닥판을 보폭만큼 분할할 경우 절점이 많아지므로 비경제적인 해석이 될 수 있다. 따라서 바닥판을 구조물의 진동모드나 고유진동수와 같은 동적 특성에 크게 영향을 주지 않을 정도로 적절하게 분할하고 절점 이외에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하여 적용한다면 보폭에 관계없이 구조물을 모델링할 수 있으며 요소 수를 줄임으로서 해석시간을 줄일 수 있다.<sup>(4)</sup>

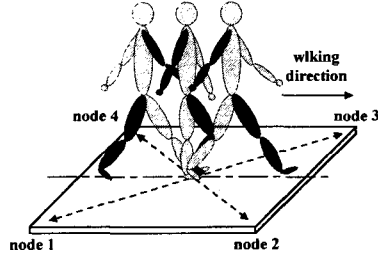


그림 7. 판 요소에 작용하는 보행하중

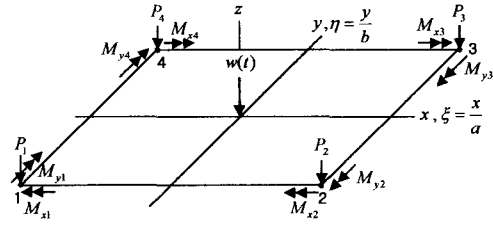


그림 8. 판 요소의 등가절점하중

그림 7과 같이 판 요소의 내부에 작용하는 보행하중은 식 (4)와 같이 판 요소의 절점에 대하여 등가의 보행하중으로 치환될 수 있다. 본 논문에 사용한 MZC 요소는 절점당 하나의 연직 자유도와 두개의 회전자유도를 가지고 있으므로 각각의 절점에 대한 등가 보행하중은 그림 8과 같이 하나의 연직 하중과 두 방향의 모멘트하중으로 나타낸다..

$$F_i^{(b)}(t) = [ P_i(t) \quad Mx_i(t) \quad My_i(t) ]^T \quad (4)$$

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

$P_i$ ,  $Mx_i$ ,  $My_i$ 는 절점  $i$ 의 연직하중,  $x$ 축 모멘트하중,  $y$ 축 모멘트하중을 의미하며  $N_{1i}$ ,  $N_{2i}$ ,  $N_{3i}$ 는 절점  $i$ 에 대한 형상함수이다. 식 (4)의 등가 보행하중을 형상함수를 이용하여 나타내면 식 (5)와 같다.

$$P_i = w(t) \left\{ \frac{1}{8} (1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(2 + \xi_0 + \eta_0 - \xi^2 - \eta^2) \right\} \quad (5-a)$$

$$Mx_i = w(t) \left\{ -\frac{1}{8} b \eta_i (1 + \xi_0)(1 - \eta_0)(1 + \eta_0)^2 \right\} \quad (5-b)$$

$$My_i = w(t) \left\{ \frac{1}{8} a \xi_i (1 - \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \xi_0)^2 \right\} \quad (5-c)$$

## 4. 사람의 움직임에 의한 바닥판 구조물의 응답

구조물의 진동해석을 위하여 적용하는 감쇠비는 콘크리트 구조물인 경우 약 3%~5%정도의 감쇠비를 적용하는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 heel drop tests에서 구한 감쇠비를 적용하여 진동해석을 수행하였다.

### 4.1 Heel drop impact에 의한 구조물의 응답

#### 4.1.1 Heel drop impact load

Heel drop impact load는 사람이 로드셀에 올라서서 뒤꿈치를 들고 있다가 갑자기 떨어뜨릴 때 발생하는 충격하중을 직접 계측한 것이다. 사람이 로드셀에 올라섰을 때를 계측기를 영점 조절하여 계측하였다. 그림 9는 몸무게 64.5kg의 사람에 의한 heel drop 충격하중이다. 하중이 영(zero)

보다 작게 나오는 부분은 뒤꿈치로 충격을 가하기 전에 뒤꿈치를 들어올리는 순간 몸무게가 중력 방향에 반대로 작용하기 때문에 나타나는 것이다. heel drop impact는 그림 11과 같이 A지점에 가진하였으며 가속도 응답은 가진점 옆에서 계측하였다.

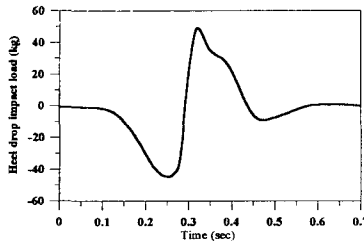


그림 9. Heel drop 충격하중

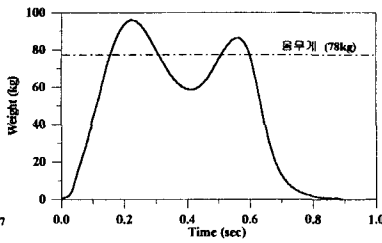


그림 10. 보행하중

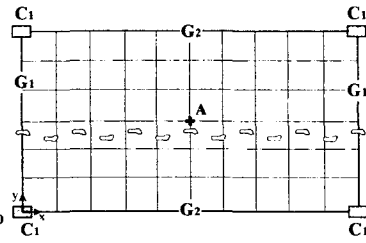
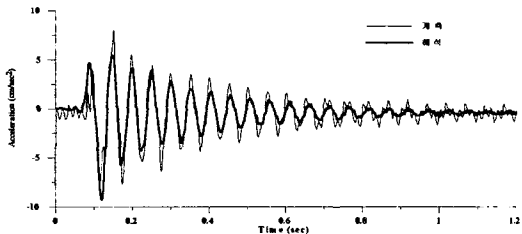


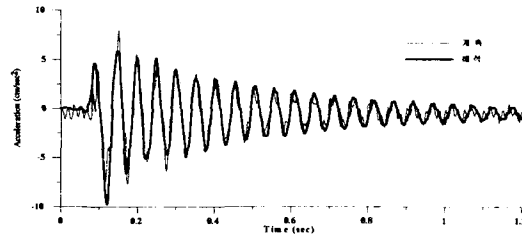
그림 11. 보행하중의 가진 방향

#### 4.1.2 해석응답과 계측응답의 비교

Heel drop impact에 의한 구조물의 가속도응답은 heel drop에 의한 충격효과로 인하여 초기에 크게 나오며 충격효과가 사라진 후에는 자유진동 양상을 나타내고 있다



(a) 계측응답과 해석응답(감쇠비:3.0%)



(b) 계측응답과 해석응답(감쇠비:1.8%)

그림 12. Heel drop impact에 의한 구조물의 가속도 응답

마감이 없는 콘크리트 구조물의 경우 약 3%의 감쇠비를 적용하여 해석하는 것이 일반적이다. 그러나 건축물을 사용으로 발생하는 크랙 등으로 인하여 감쇠효과가 줄어들기 때문에 3%의 감쇠비를 적용하는 것은 적절치 않다. 그림 12 (a)와 (b)는 A지점에서의 heel drop impact에 의한 구조물의 가속도 응답을 나타낸 것으로 해석응답은 감쇠비를 다르게 한 것이다. 계측 응답과 해석 응답에 약간의 차이는 있으나 heel drop tests로 구한 감쇠비(1.8%)를 적용하여 해석한 구조물의 응답이 계측한 가속도 응답에 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 예제 구조물의 진동해석을 위하여 1.8%의 감쇠비를 적용하는 것이 타당하다.

### 4.2 보행하중에 의한 구조물의 응답

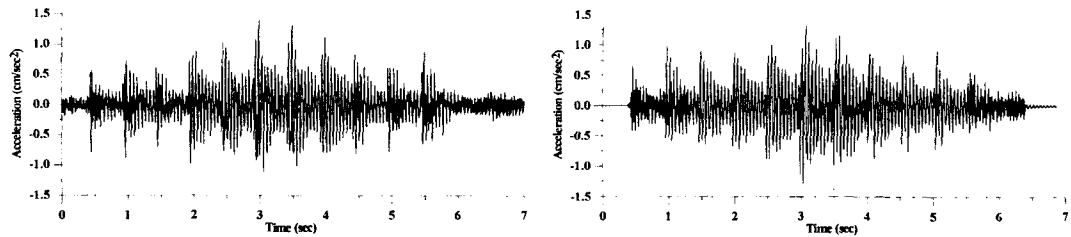
#### 4.2.1 보행하중

예제 구조물에는 몸무게 78kg의 보행자가 평균보폭 75cm로 1.80Hz의 보행속도로 보행할 때 계측한 보행하중을 적용하였으며 하중-시간 이력은 그림 10과 같다. 등가 보행하중은 분할된 바닥판의 크기와 발바닥의 위치에 따라 절점마다 다르게 나타나며 응답 계측 대상 슬래브의 보행하중 가진 방향 및 위치를 그림 12에 나타내었다.

#### 4.2.2 해석응답과 계측응답의 비교

예제구조물의 단변방향을 4개 이상으로 분할하면 조밀하게 분할한 구조물의 고유진동수와 거의 차이가 없으나 본 연구에서는 2장에서 언급한바와 같이 예제구조물을 10×06으로 분할하여 수치

해석을 수행하였으며 구조물의 감쇠는 Rayleigh damping을 취하였다.



(a) 계측 가속도 응답

(b) 해석 가속도 응답

그림 13. Walking loads에 의한 구조물의 가속도 응답

구조물의 가속도 응답이 가장 크게 나타나는 바닥판의 중앙(A 지점)에서 응답을 계측하였다. 그림 13 (a)는 계측한 가속도 응답을 시간영역으로 나타낸 것이며 그림 13 (b)는 해석에 의한 가속도 응답을 나타낸 것이다. 수치해석을 위한 보행하중은 매우 일정하게 입력되지만 가속도 응답 계측을 위하여 가해지는 보행하중은 일정하지 않기 때문에 계측 응답과 해석 응답의 amplitude가 다소 차이가 있다. 그러나 응답의 전체적인 양상은 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 Heel drop tests를 실시하여 실제 구조물의 동적특성인 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 평가하였다. 그리고 보행하중을 받는 구조물의 진동해석을 위하여 보행하중을 등가의 보행하중으로 치환하는 방법을 제안하였으며 그 타당성을 검증하기 위하여 예제 구조물의 계측 응답과 해석 응답을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, Heel drop tests로 구한 실제 바닥판 구조물의 고유진동수와 감쇠비를 분석하여 진동해석을 위한 예제 구조물을 비교적 정확하게 모델링할 수 있다.

둘째, 등가 보행하중을 적용하여 해석한 구한 구조물의 응답과 계측하여 얻은 구조물의 응답이 매우 유사하므로 보행하중을 받는 구조물의 진동해석을 위하여 등가 보행하중의 적용이 가능하다.

본 논문에서는 한 사람의 보행에 의한 바닥판 구조물의 진동해석을 수행하였으나 바닥판 구조물의 진동은 여러 사람의 보행에 의해서 야기되는 것이 보다 현실적이므로 추후 연구에는 무리 보행하중의 적용을 통한 바닥판 구조물의 진동해석이 필요하다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- (1) Rainer, G. H. and Pernica, G., Vertical Dynamic Forces From Footsteps. National Research Council Canada. Division of Building Research. Noise and Vibration Section; 1986
- (2) Lenzen, K. H, Vibration of Steel Joist Concrete Slab Floors. Engineering Journal. AISC. 1966;3(3)
- (3) Lee, Dong-Guen and Kim, Gee-Cheol, Modeling of Moving Loads for Analysis of Floor Vibration. Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures. Seoul. Korea. 16~18 October. 2000;2:869-879
- (4) 김기철, 이동근, 2001. 2, “보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석,” 한국지진공학회 논문집, Vol. 5, No. 1, pp. 21~29