

# 보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석

## Efficient Analysis of Structure Vibration Induced by Walking Loads

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

### 국문요약

주차장, 버스터미널, 스타디움, 집회공간과 같이 낮은 고유진동수를 갖는 장경간 건축물에서는 저속 차량의 이동하중이나 보행자의 보행하중과 같은 동적하중에 의해 과도한 바닥판 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 건축물의 이용자에게 불쾌감을 일으켜 건축물의 사용성에 심각한 영향을 주게 된다. 구조물에 가해지는 보행하중의 일반적인 적용 방법은 분할된 요소의 절점을 따라 절점하중으로 가하는 것이다. 그러나 이러한 해석모델은 보행하중을 절점에만 가해야 하는 제한적인 문제점을 가지고 있어 보폭 수만큼 절점을 생성시켜야 하며 보폭이 변하거나 절점이외에 하중이 작용할 경우 해석모델을 수정해야 하는 번거로움이 있다. 본 연구에서는 보행하중에 대한 계측과 분석을 통하여 보행하중의 동적특성을 분석하였으며 계측한 보행하중을 예제구조물에 적용하였다. 그리고 보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석을 위하여 구조물에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하는 방법을 제안하였으며 제안된 등가절점하중의 타당성을 검증하기 위하여 예제구조물의 진동해석을 수행하였다.

주요어 : 장경간, 보행하중, 바닥판 진동, 등가의 절점하중

### ABSTRACT

Structures with a long span have a higher possibility of experiencing excessive floor vibration induced by human activities such as walking, running, jumping and dancing. These excessive vibrations give occupants annoyance. The general method for the vibration analysis of structures subjected to walking loads is to apply a series of nodal loads with assigned time delays at the nodes. But this method has a limit in representing the walking loads. In this study, the equivalent nodal loads are introduced for an effective analysis of floor vibration induced by walking loads. And walking loads with difference walking rate are measured and applied to the analytical model for numerical analysis.

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

## 1. 서 론

현대 건축물은 고강도 재료와 강재의 사용이 증가하면서 부재의 크기가 작아지고 있으며 건물의 용도에 따라서 넓은 공간이 필요한 건축물은 칸막이 벽과 같은 비구조재의 사용이 감소함으로써 감쇠효과가 크게 줄어들고 있다. 주차장, 버스터미널, 스타디움, 집회공간과 같이 낮은 고유진동수를 갖는 장경간 건축물에서는 차량의 이동하중이나 보행자의 보행하중과 같은 동적하중에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 건축물의 이용자에게 불쾌감을 유발시켜 건축물의 사용성에 심각한 영향을 주게 된다. 이동하중을 받는 골구조물의 진동해석<sup>(3)</sup>과 차량이나 열차의 운행에 의한 인접구조물의 동적해석에 대한 연구는 교량과 터널구조물 같은 토목분야에서 비교적 많이 진행되어 왔다. 보행하중에 대한 연구는 70년대와 80년대에 독일과 영국에서 활발히 진행되었으며, 현재 미국과 캐나다 등에서 보행하중에 대한 연구와 보행하중에 의하여 야기되는 구조물의 진동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 국내의 경우 보행하중에 대한 연구와 보행하중에 의한 구조물의 진동에 대한 연구가 미비한 실정이다. 구조물에 가해지는 보행하중의

일반적인 적용 방법은 보행하중을 분할된 요소의 절점을 따라 시간지연 절점하중<sup>(4)</sup>으로 가하는 것이다. 그러나 이러한 해석모델은 보행하중을 절점에만 가해야 하는 제한적인 문제점을 가지고 있어 보폭 수만큼 절점을 생성시켜야 하며 보폭이 변하거나 절점이 아닌 부재에 하중이 작용할 경우에는 해석모델을 수정해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 보행하중에 대한 계측과 분석을 통하여 보행하중의 동적특성을 분석하였으며 계측한 보행하중을 예제구조물에 적용하였다. 그리고 보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석을 위하여 구조물에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하는 방법을 제안하였으며 제안된 등가절점하중의 타당성을 검증하기 위하여 시간지연 절점하중에 의한 예제구조물의 응답과 비교 분석하였다.

## 2. 보행하중의 계측 및 분석

사람의 움직임으로 야기되는 동적하중에 대한 기존의 연구에서는 변위응답이나 가속도응답의 계측을 통하여 동적하중을 계측하고 평가하였으며, 기존의 연구 논문에서 제시한 보행하중 모델은 보행하중을 주기하중으로 가정한 것으로 보행자의 몸무게와 보행속도에 따른 조화하중의 진폭과 위상으로 나타낼 수 있다.<sup>(1),(2)</sup> 본 연구에서는 사람의 움직임으로 야기되는 동적하중 중에서 가장 일반적인 보행하중을 로드셀(load cell)을 이용하여 직접 계측하고 분석하였다.<sup>(6)</sup>

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

\*\* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

### 2.1 보행하중의 계측

보행하중에 대한 기존의 연구에서 보행하중의 주요 매개 변수인 보행속도, 몸무게, 성별, 바닥 조건 등에 대한 평가와 분석이 있었으며 본 연구에서는 보행하중의 주요 매개 변수 중에 하나인 보행속도에 따른 하중-시간이력을 계측하여 보행하중의 양상을 분석하였다.

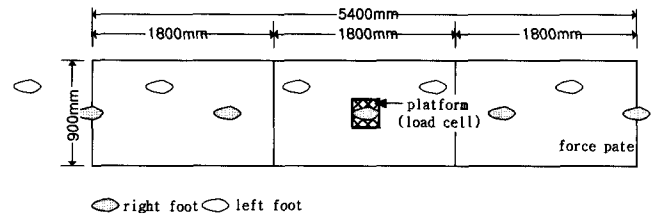


그림 1 계측 플레이트

#### 2.1.1 계측 플레이트(force plate)

보행하중 계측을 위하여 그림 1과 같이 계측 플레이트 중앙에 로드셀을 장착하여 보행하중을 직접 계측하였다. 계측 플레이트의 크기는 길이 5400mm, 너비 900mm로 하였으며, 두께는 24mm로 로드셀의 두께와 같게 하여 보행에 지장이 없도록 하였다. 계측 플레이트를 길게 제작하여 보행자가 로드셀을 밟기 전에 일정한 보폭을 유지할 수 있도록 하였으며 로드셀과 계측 플레이트를 분리하여 계측플레이트의 움직임이 보행하중 계측에 영향을 주지 않도록 하였다.

#### 2.1.2 계측장비

보행하중을 직접 계측하기 위하여 본 연구에서는 로드셀, 전송기, A/D변환기 등과 같은 장비를 사용하였다. 보행하중과 같은 동적하중의 계측에서는 데이터의 샘플링 속도와 분해도가 중요한 요소가 된다. 본 연구에 사용된 A/D변환기는 보행하중 계측에 충분한 분해능력과 샘플링 속도를 가지고 있는 것으로 데이터 분해능력은 12비트이며 초당 최대 200,000개의 데이터를 샘플링할 수 있는 장비이다. 보행하중

의 하중-시간이력은 초당 100개 정도의 데이터로 충분히 표현할 수 있으나 본 연구에서는 수치해석에 사용한 시간중분이 0.02초이므로 이에 1/10인 0.002초로 데이터를 샘플링하여 보행하중을 계측하였다.

### 2.2 보행하중의 분석

보행하중은 표 1과 같은 몸무게와 평균보폭을 갖는 보행자에 의한 동적하중을 계측한 것으로 보행속도를 느리게, 보통, 빠르게 세 가지로 구분하여 보행하였으며 보행속도에 따른 하중-시간 이력을 각각의 보행속도에 대하여 3회씩 계측하였다.

그림 2는 보행하중의 하중-시간이력을 동적하중계수(동적하중/몸무게)로 나타낸 것으로 보행에 의한 동적하중은 일반적으로 두 개의 정점(peak)성분을 가지고 있으며 첫 번째 정점은 발의 뒤꿈치(heel)의 충격에 의하여 나타나는 성분이며 두 번째 정점은 발가락(toe lift-up)의 바닥판 접촉에 의하여 나타나는 성분이다.

그림 2(a)와 같이 보행진동수가 1.30Hz~1.65Hz사이에 있

표 1 보행자 몸무게 및 보폭

보행자	성별	몸무게(kg)	평균보폭(cm)	보행자	성별	몸무게(kg)	평균보폭(cm)
A	여자	50	58.74	I	남자	70	90.14
B	여자	51	61.39	J	남자	72	76.32
C	여자	52	61.13	K	남자	74	79.00
D	여자	55	61.67	L	남자	78	85.02
E	남자	62	71.18	M	남자	80	80.41
F	남자	63	70.74	N	남자	84	84.97
G	남자	65	75.65	O	남자	89	89.53
H	남자	66	70.42				

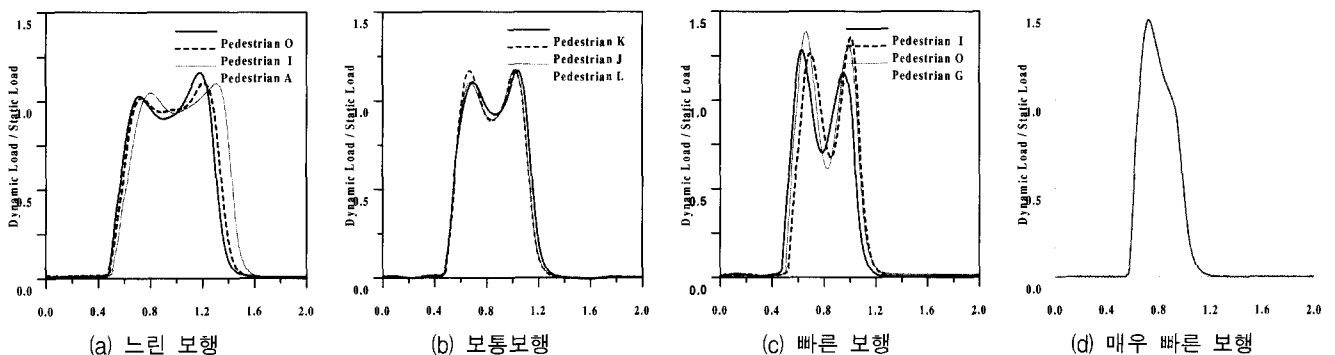


그림 2 보행속도에 따른 보하중

는 느린 걸음의 하중-시간이력을 살펴보면 동적하중이 몸무게의 근처까지 서서히 증가하다 몸무게 주위에서 약간의 변화가 있다가 점점 줄어들고 있으며 정점부근에서는 하중의 변화가 거의 없이 평평한 것을 볼 수 있다. 그림 2(b)는 보행진동수가 1.60Hz~1.95Hz인 보통 걸음의 하중-시간이력으로 몸무게보다 큰 정점까지 급속히 증가한 후 약간 떨어지다 한번 더 정점에 이르다 점점 줄어드는 말안장의 모양을 가지고 있다. 보행진동수가 1.90Hz~2.30Hz인 빠른 걸음의 하중-시간이력의 양상은 두 가지로 나타날 수 있다. 하나는 그림 2(d)와 같이 충격하중의 양상과 유사하게 하나의 정점만을 가지는 경우와 다른 하나는 그림 2(c)와 같이 보통 걸음의 하중-시간이력 양상과 비슷하지만 동적하중의 변화가 보통 걸음에 비하여 급속한 변하는 것을 볼 수 있다. 그림 2의 보행속도에 따른 하중-시간이력에서 보행속도가 빠를수록 보행하중은 큰 것을 볼 수 있으며 최대 동적하중계수는 보행속도에 따라 1.06~1.35까지 다양하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 3. 부재하중의 등가절점하중으로 치환

#### 3.1 보 요소의 부재하중

절점당 하나의 연직 자유도와 하나의 회전 자유도를 갖는 보 요소 내부에 그림 3과 같이 부재하중( $P_i$ )이 작용할 경우 부재하중( $P_i$ )은 절점  $i$ 와  $j$ 에 절점하중으로 치환할 수 있다. 절점  $i$ 와  $j$ 에 대한 등가의 절점하중은 연직하중( $P_i, P_j$ )과 모멘트하중( $M_i, M_j$ )으로 치환하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_i \\ M_i \\ P_j \\ M_j \end{bmatrix} = P_i [ f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 ]^T \quad (1)$$

여기서  $f_1, f_2, f_3, f_4$  는 형상함수를 의미한다.

식 (1)을 형상함수를 이용하여 다시 정리하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = \frac{P_i(L-l)^2(L+2l)}{L^3} \quad (2-a)$$

$$P_j = \frac{P_i l^2(3L-2l)}{L^3} \quad (2-b)$$

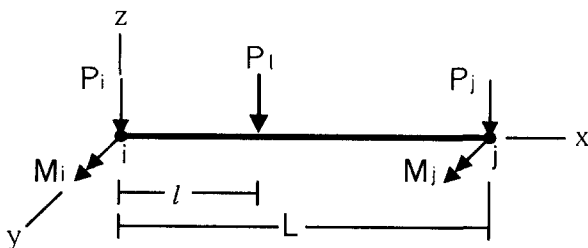


그림 3 보 요소의 등가절점하중

$$M_i = \frac{-P_i l(L-l)^2}{L^2} \quad (2-c)$$

$$M_j = \frac{-P_i(L-l)l^2}{L^2} \quad (2-d)$$

### 3.2 판 요소의 부재하중

#### 3.2.1 판의 휨 요소

본 연구에 사용한 판의 휨 요소는 Melosh, Zienkiewicz와 Cheung에 의하여 개발된 MZC사각형요소를 사용하였다.<sup>(6)</sup> MZC사각형요소는 절점당 하나의 연직변위와 두 개의 회전 변위를 가지고 있으며 절점  $i$ 의 연직변위( $w_i$ ),  $x$ 축 회전변위( $-\frac{\partial w_i}{\partial y}$ ),  $y$ 축 회전변위( $-\frac{\partial w_i}{\partial x}$ )에 대한 변위함수를 만족시키는 각각의 형상함수( $f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}$ )를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{i1} = \frac{1}{8} (1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(2 + \xi_0 + \eta_0 - \xi^2 - \eta^2) \quad (3-a)$$

$$f_{i2} = -\frac{1}{8} b\eta_i(1 + \xi_0)(1 - \eta_0)(1 + \eta_0)^2 \quad (3-b)$$

$$f_{i3} = \frac{1}{8} a\xi_i(1 - \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \xi_0)^2 \quad (3-c)$$

여기서  $\xi_0 = \xi_i \xi_j, \eta_0 = \eta_i \eta_j$

#### 3.2.2 등가의 절점하중으로 치환

각각의 절점에 하나의 연직 자유도와 두 개의 회전자유도를 고려한 판의 내부에 작용하는 부재하중은 그림 4와 같이 각각의 절점에 하나의 연직방향 성분과 두 개의 회전방향 성분을 갖는 등가의 절점하중으로 나타낼 수 있다.

판의 휨 요소 내부에 작용하는 부재하중( $P$ )을 요소에 이루는 절점들에 대한 등가하중으로 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_i \\ M_{xi} \\ M_{yi} \end{bmatrix} = P [ f_{i1} \ f_{i2} \ f_{i3} ]^T \quad (4)$$

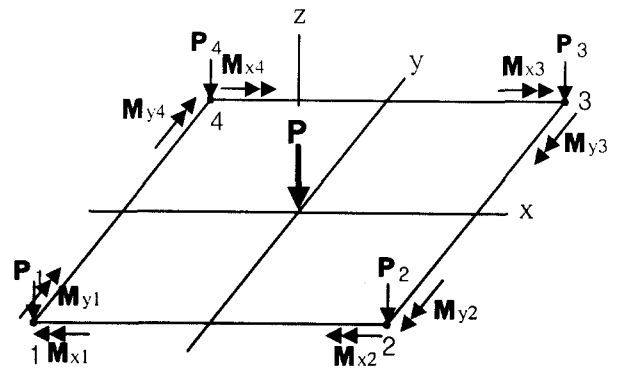


그림 4 판 요소의 등가절점하중

여기서  $f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}$ 는 절점  $i$ 에 대한 형상함수를 의미하며  $P_i, M_{xi}, M_{yi}$ 는 절점  $i$ 의 연직하중, x축 모멘트하중, y축 모멘트하중을 의미한다.

각각의 절점에 대한 등가하중을 형상함수를 이용하여 정리하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$M_{xi} = \left\{ -\frac{1}{8} b \eta_i (1 + \xi_0)(1 - \eta_0)(1 + \eta_0)^2 \right\} P \quad (5-b)$$

$$M_{yi} = \left\{ \frac{1}{8} a \xi_i (1 - \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \xi_0)^2 \right\} P \quad (5-c)$$

### 3.3 등가절점하중의 적정성 검토

등가로 치환한 하중의 적정성을 검토하기 위하여 900cm×600cm×10cm의 사면고정 바닥판에 대하여 표 2와 같은 부재하중과 등가절점하중을 가하여 처짐을 비교하였다. 바닥

표 2 하중위치 및 크기

하중조건	하중조건 1	하중조건 2	하중조건 3
가진 점	A	1, 2, 3, 4	1, 2, 3, 4
하중	$P$	$P_i$	$P_i, M_{xi}, M_{yi}$
모델 A	500kg	125kg	125kg, ±9375.0kg·m
모델 B	500kg	125kg	125kg, ±4687.5kg·m
모델 C	500kg	125kg	125kg, ±3125.0kg·m

판 분할에 따라 모델은 그림 5와 같이 세 가지로 하였다. 모델 A는 요소의 수가 24개이며 요소의 크기가 150cm×150cm이다. 모델 B는 요소의 수가 모델 A의 4배이며 크기는 75cm×75cm로 모델 A의 1/2이다. 모델 C는 요소의 수가 모델 A의 9배이며 요소의 크기는 모델 A의 1/3이다.

하중조건(load case) 1은 요소 내 하중을 가하는 것이며 하중조건 2와 3은 등가의 절점하중으로 가하는 것이다. 등가의 절점하중은 요소를 이루는 4절점에 가하며 모멘트하중을 고려한 하중조건 3과 모멘트하중을 고려하지 않은 하중조건 2로 구분하였다.

그림 6은 모델 A, 모델 B 및 모델 C에서 각각의 하중조건에 따른 단변방향 중심선상의 처짐을 비교한 것이다. 그림 6(a)를 살펴보면 예제구조물의 바닥판이 거칠게 분할되어 있기 때문에 하중조건 1에 의한 처짐과 하중조건 3에 의한 처짐의 차가 많이 나타나고 있다. 그림 6(c)는 모델 C의 바닥판이 모델 A와 모델 B보다 조밀하게 분할되어 있으므로 하중조건 1과 하중조건 3에 의한 처짐의 차가 거의 나타나지 않고 있다. 모멘트를 고려하지 않은 등가의 절점하중인 하중조건 2에 의한 처짐이 모멘트하중을 고려한 하중조건 3에 의한 처짐보다 작게 나타나고 있으며 하중조건 3의 처짐과 요소의 중심에 하중을 가한 하중조건 1의 처짐을 살펴보면 하중을 가한 요소 중심에서 약간에 차이가 나고 있으나 그 이외의 절점에서는 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 요소의 내부에 작용하는 부재하중을 형상함수를 이용한 등가의 절점하중으로 치환이 가능하다.

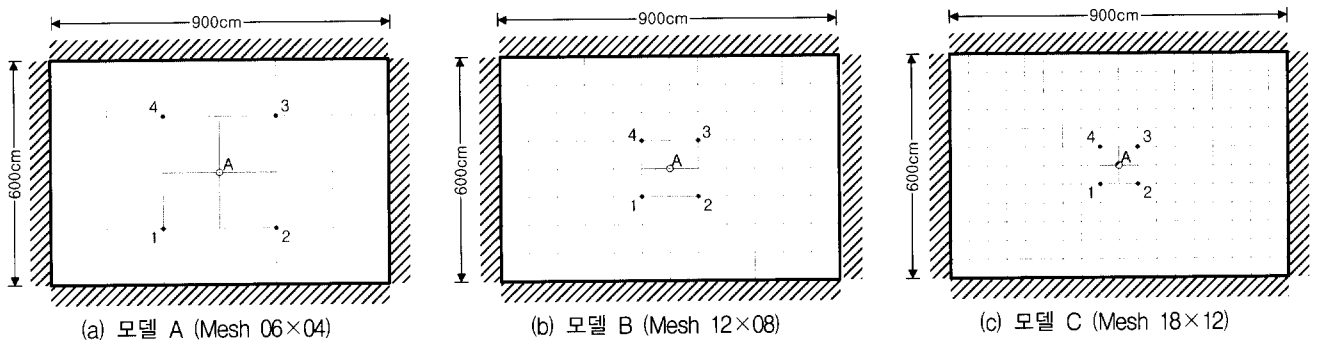


그림 5 바닥 분할에 따른 모델

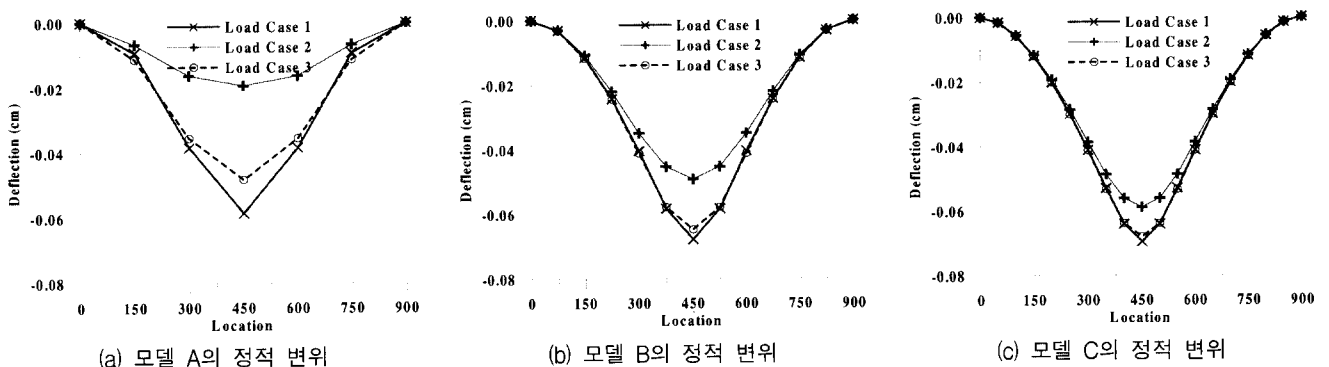
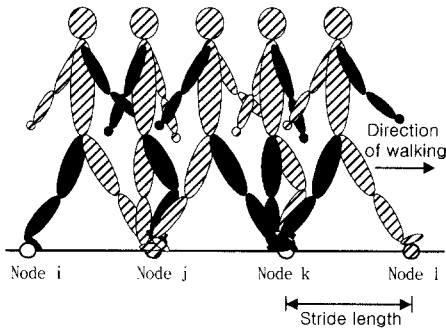


그림 6 바닥판 분할에 따른 모델별 정적 변위

### 3.4 보행하중의 등가절점하중으로 치환

일반적으로 구조물에 보행하중을 가하는 방법은 그림 7(a)와 같이 보폭만큼 절점을 생성시켜 시간지연을 갖는 절점하중으로 가한다.<sup>(4)</sup> 그러나 이러한 모델은 보폭 수만큼 절점을 생성시켜야 하므로 해석시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 보폭이 변하는 경우에는 다시 모형화하여야 하는 문제점을 가지고 있다.

그림 8과 같이 절점 이외에 가해지는 보행하중을 요소를 이루는 절점들에 대한 등가의 절점하중으로 치환하여 적용할 경우에는 보폭에 관계없이 구조물을 모형화할 수 있으며 요소 수를 줄임으로서 해석시간을 줄일 수 있다.



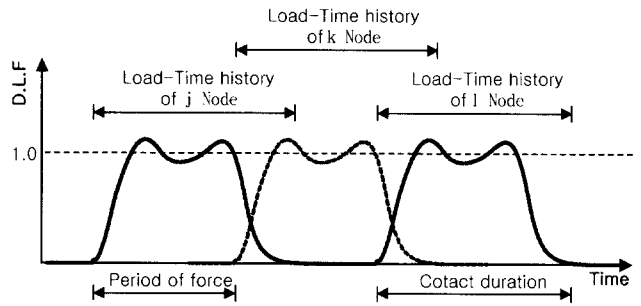
(a) 시간지연을 갖는 보행하중

### 4. 보행하중을 받는 예제구조물의 진동해석

#### 4.1 수치해석을 위한 예제구조물

##### 4.1.1 골조 구조물

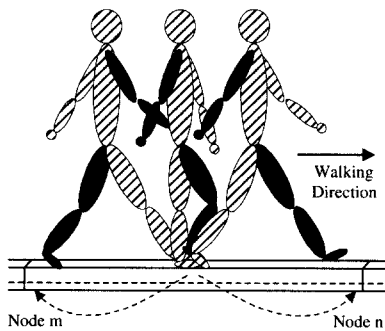
본 논문에서 사용한 동적해석방법은 모드중첩법이며 골조 예제구조물과 plate 예제구조물 모두 5% 일정 감쇠비를 적용시켰다. 보행하중을 받는 골조 구조물의 진동해석을 위한 예제구조물은 그림 9와 같이 길이 2,100cm, 폭 600cm, 높이 400cm의 3경간 2층 구조물로 하였다. 부재의 단면은 표 3과 같으며 재료는 콘크리트이다. 요소 분할에 따른 예제구조물의 모델은 그림 10과 같이 보폭만큼 요소의 크기를 분할한



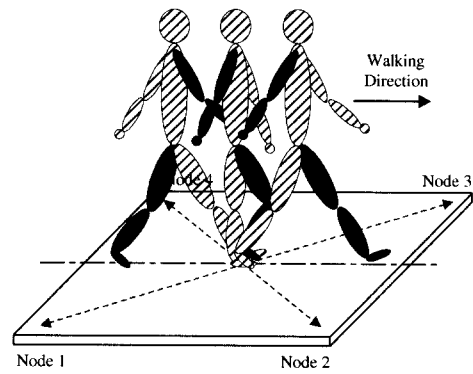
D.L.F. : Dynamic Load/Weight

(b) 절점 보행하중

그림 7 시간지연 보행하중의 적용

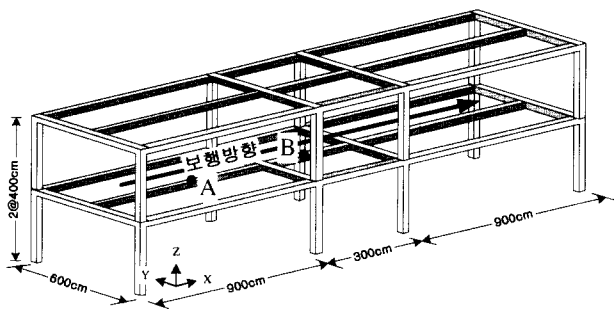


(a) 보 요소 등가절점하중

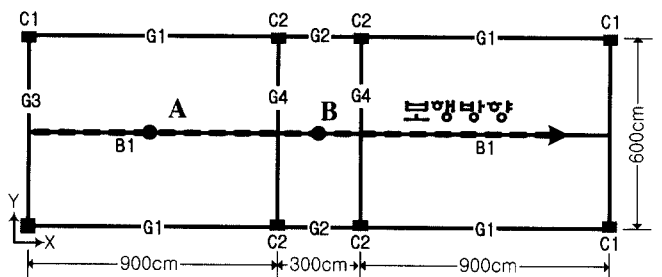


(b) MZC 요소 등가절점하중

그림 8 등가 보행하중의 적용



(a) 골조 예제구조물



(b) 골조 예제구조물의 2층 평면

그림 9 골조 예제구조물

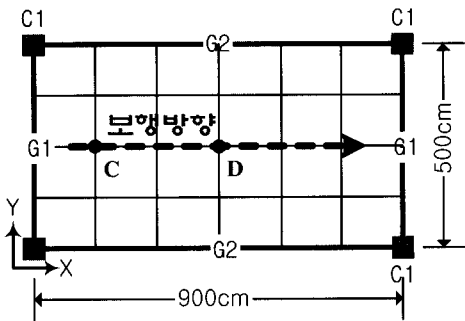
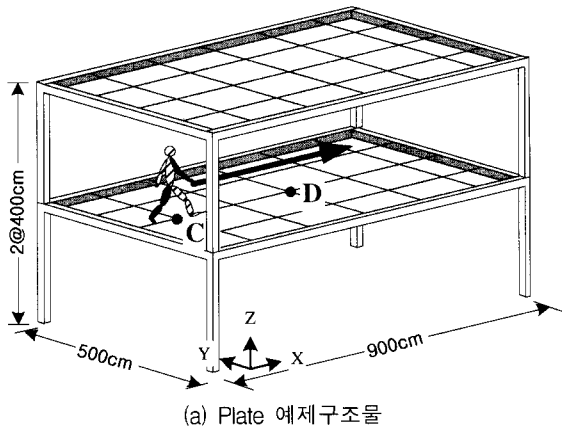
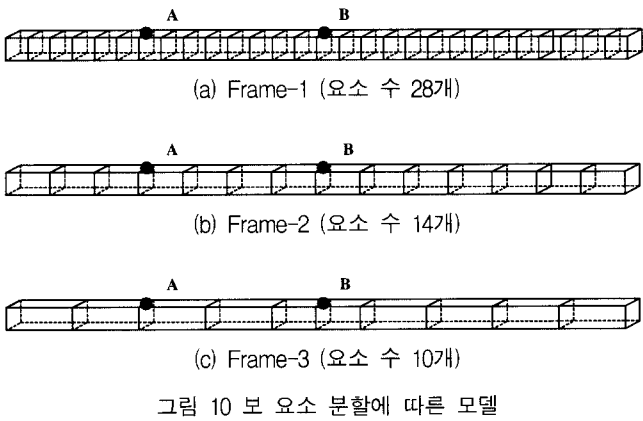


그림 11 Plate 예제구조물

frame-1, 보쪽에 2배로 분할한 frame-2, 1경간의 보 전체 길이를 골조 구조물의 연직 진동해석에 필요한 최소 요소 수인 4개로 분할한 frame-3으로 구분하였다. 보행하중을 그림 13과 같이 세 가지로 하여 2층 중앙부 보에 화살표 방향으로 가하였다.

4.1.2 바닥판 구조물

보행하중에 의하여 야기되는 바닥판 진동의 해석을 위한 예제구조물은 그림 11과 같이 가로 900cm, 세로 500cm, 높이 400cm의 2층 구조물로 바닥판의 두께는 15cm이다. 부재의 단면은 표 4와 같으며 재료는 콘크리트이다. 바닥판 예제구조물의 요소 분할에 따른 모델은 그림 12와 같이 보폭만큼 절점을 생성시킨 plate-1 (12×08)과, 단변방향으로 동적해석에 필요한 최소 요소 수인 4개로 분할한 plate-2 (06×04)로 하였다.<sup>(7)</sup>

표 3 골조 예제구조물의 부재단면 크기

탄성계수		2.1×10E5(kgf/cm <sup>2</sup> )
밀도		2.4(tonf/m <sup>3</sup> )
프와송 비		0.167
부재명		단면 크기(mm)
기둥	C <sub>1</sub>	400×700
	C <sub>2</sub>	600×700
보	G <sub>1</sub>	350×750
	G <sub>2</sub>	300×600
	G <sub>3</sub>	300×900
	G <sub>4</sub>	450×750
	B <sub>1</sub>	350×750

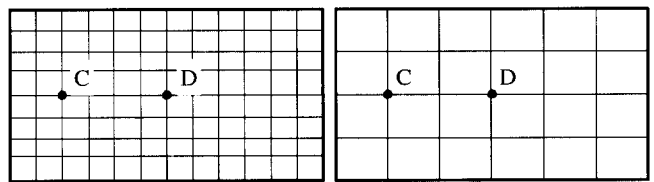


그림 12 바닥판 요소분할에 따른 모델

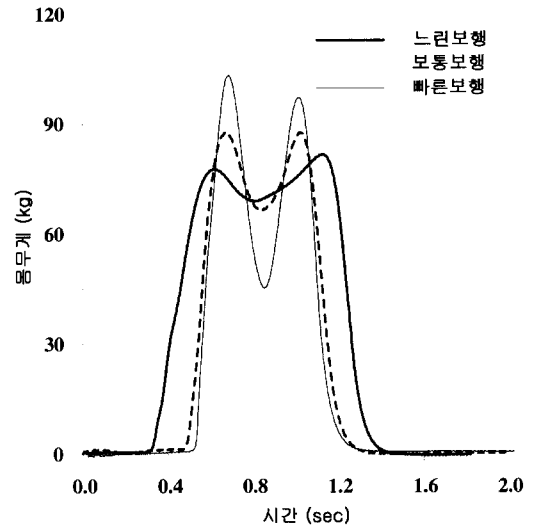


그림 13 가진 보행하중

표 4 바닥판 예제구조물의 부재 크기

탄성계수		2.1×10E5(kgf/m <sup>2</sup> )
밀도		2.4(tonf/m <sup>3</sup> )
프와송 비		0.167
부재명		단면 크기 (mm)
기둥	C <sub>1</sub>	400×600
	C <sub>2</sub>	600×600
보	G <sub>1</sub>	400×750
	G <sub>2</sub>	400×900

보행하중은 2층 바닥판에 화살표 방향으로 그림 13과 같이 세 가지 하중을 가진하였다.

### 4.1.3 보행하중

몸무게 72kg의 보행자가 75cm의 보폭으로 느리게 보행할 때, 보통 속도로 보행할 때, 빠르게 보행할 때 발생하는 동적하중을 각각의 예제구조물에 가하였다. 그림 13은 세 가지 보행속도에 의한 단위보행하중의 하중-시간이력을 나타낸 것으로 보행속도가 빠를수록 뒤꿈치 충격과 발가락의 바닥 판 접촉에 의한 충격하중 효과가 크기 때문에 보행하중의 진폭이 크게 나타나고 있다.

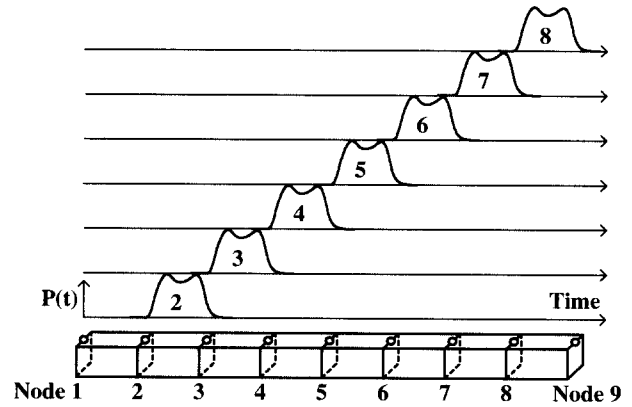


그림 14 시간지연 절점하중

### 4.2 등가절점하중에 의한 구조물의 응답

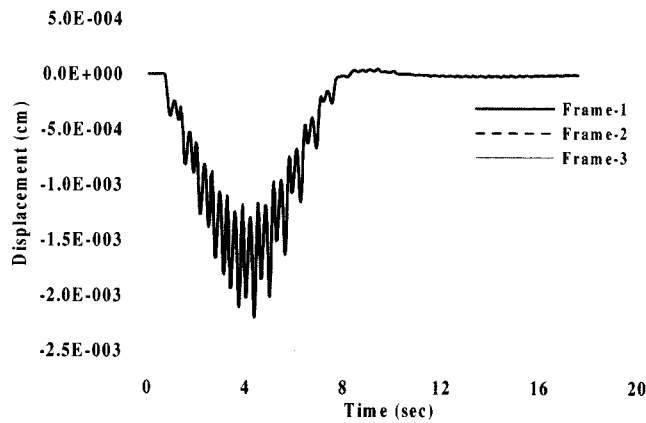
시간지연을 갖는 절점하중의 가진방법은 보폭 수만큼 생성시킨 절점에 보행속도에 따라 야기되는 지연시간을 각각의 단위 보행하중에 할당하여 가하면 된다. 그림 14는 시간지연을 갖는 절점하중의 예를 나타낸 것이다.

그림 15는 시간지연을 갖는 절점하중과 모멘트하중을 고려한 등가의 절점하중에 의한 예제 구조물의 응답을 나타낸 것이다. 시간지연을 갖는 절점하중과 등가의 절점하중에 의한 골조 예제구조물의 변위응답이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 절점 B에서 변위응답의 부호가 시간에 따라 다르게 나타나는 것은 첫 번째 경간과 세 번째 경간에 보행하중이 가해질 때 보행하중을 받는 경간의 휨 영향이 절점 B가 있는 중앙부 경간으로 전달되기 때문이다. Plate 예제구

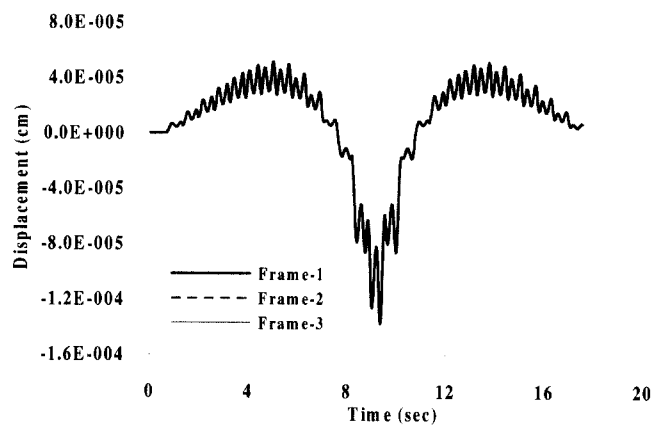
조물은 분할된 요소의 수에 따라서 고유진동수 등과 같은 구조물의 동적특성이 약간 다르므로 변위응답에 있어서 미소한 차이를 보이고 있다. 절점 B와 절점 D에서의 변위응답은 예제구조물의 중앙부 변위응답이므로 변위 응답의 양상이 좌우 대칭으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

### 4.3 모멘트하중 고려에 따른 구조물의 응답

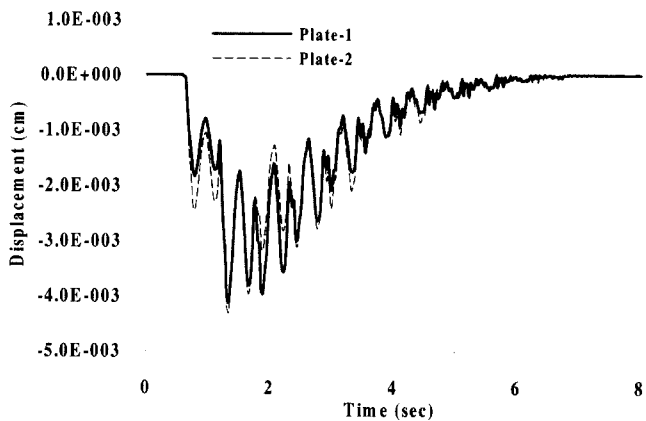
보행하중을 회전 자유도를 고려한 등가절점하중과 회전 자유도를 고려하지 않은 등가절점하중으로 가하여 예제 구조물의 변위응답을 비교 분석하였다.



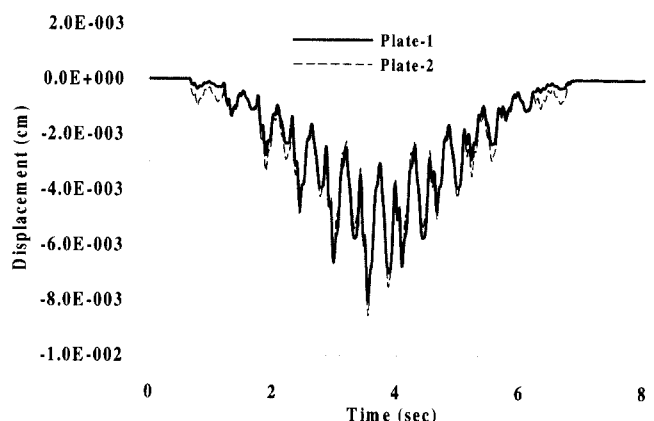
(a) 절점 A 변위응답



(b) 절점 B 변위응답



(c) 절점 C 변위응답



(d) 절점 D 변위응답

그림 15 등가의 절점하중과 시간 지연 절점하중에 의한 구조물의 응답

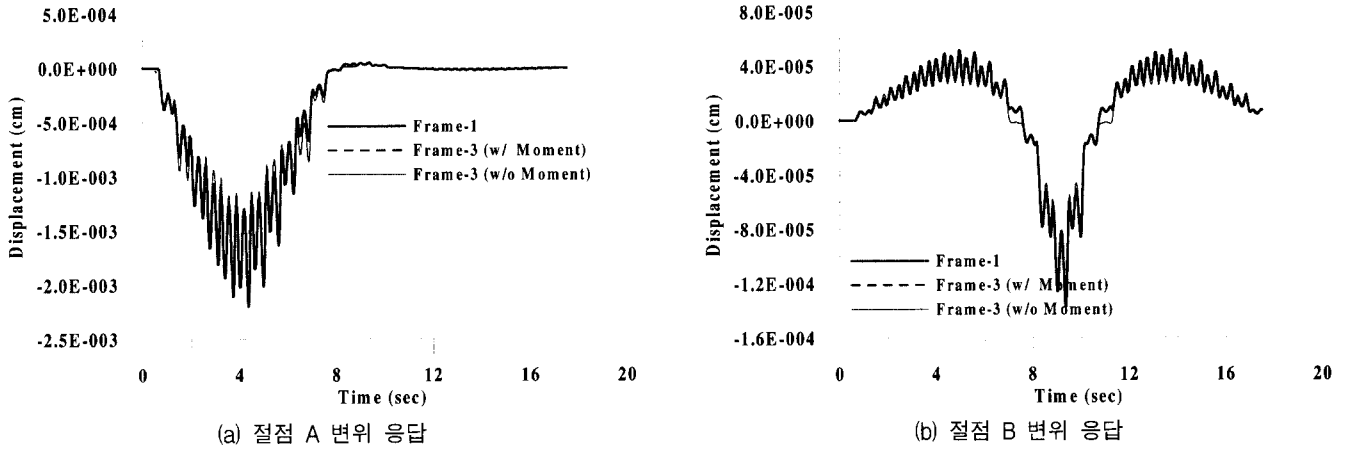


그림 16 모멘트하중을 고려한 구조물의 응답

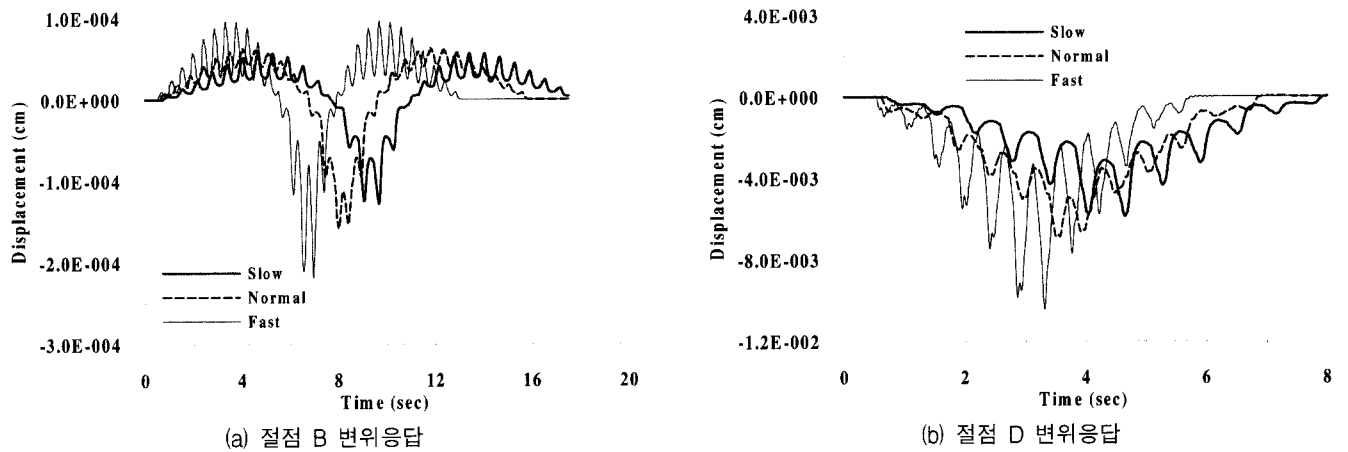


그림 17 보행속도에 따른 구조물의 응답

시간지연 절점하중에 의한 예제구조물의 응답과 등가의 절점하중으로 연직하중만을 고려하여 가한 예제구조물의 응답이 그림 16에서 볼 수 있듯이 약간의 차이가 나고 있으나 연직하중과 모멘트하중을 모두 고려한 등가의 절점하중을 가한 예제구조물의 응답은 시간지연 절점하중의 응답과 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 구조물의 변형이 연직자유도뿐만 아니라 회전 자유도의 영향을 받고 있기 때문이다. 따라서 보 요소에 내부에 작용하는 보행하중을 등가의 보행하중으로 치환할 때 연직자유도는 물론 회전자유도를 고려한 등가의 보행하중으로 표현하는 것이 보다 적절하리라 판단된다. 또한 판 요소에 작용하는 보행하중을 등가의 보행하중으로 가할 때는 연직자유도와 두 방향의 회전자유도를 고려하여 치환한 등가의 절점하중으로 가하는 것이 보다 적절하리라 판단된다.

#### 4.4 보행속도에 따른 구조물의 응답

보행속도에 따른 예제구조물 변위응답을 비교 분석하기 위하여 보행속도에 따라 다르게 발생하는 보행하중을 frame-3 모델과 plate-2 모델에 각각 가하였다. 보행속도는 다음과 같이 slow는 1.5Hz의 느린 보행, normal은 1.8Hz의 보통보행, fast는 2.2Hz의 빠른 보행으로 구분하였다.

그림 17은 보행속도를 다르게 하여 보행하중 가한 구조물의 변위 응답으로 응답의 전체적인 양상은 보행속도에 관계 없이 비슷하게 나타나지만 보행하중이 보행속도에 따라 다르게 나타나므로 응답의 크기가 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 앞서 2장의 보행하중의 분석에서 알 수 있듯이 보행속도가 빠를수록 보행하중의 진폭이 크게 나타나므로 보행속도가 빠를수록 예제구조물의 응답이 크게 나타나며 응답의 최대치가 발생하는 시간 또한 빨리 나타나는 것을 볼 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 구조물에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하는 방법을 제안하여 수치해석을 위한 예제구조물에 적용하였다. 그리고 구조물에 가해지는 보행하중을 직접 계측하고 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보행하중의 최대 값과 최소 값의 차이는 보행속도가 빠를수록 크게 나며 최대 동적하중계수는 보행속도에 따라 1.06~1.35까지 나타난다.
- 2) 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환시키는 새로운 방법을 제안함으로써 보행하중을 받는 구조물의 효율적인



진동해석이 가능하게 되었다.

- 3) 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환시킬 경우 모멘트 하중을 고려하는 것이 보다 적절하리라 판단된다. 추후 연구과제로는 보행하중에 대한 명확한 분석을 통하여 하중모델을 제시하고, 보행에 의한 구조물의 진동평가를 위해서 구조물의 진동해석에 의한 응답과 실제 진동 계측에 의한 응답의 비교 분석이 필요하리라 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 성균관대학교의 1999년도 성균학술연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Rainer, J. H. and Pernica, G., "Vertical dynamic forces from footsteps," *Noise and Vibration Section, Division of Building Research, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 1986, pp. 12-21*
2. Ebrahimipour, A., "Modeling Spectator Induced Dynamic Loads," Thesis for Ph. Dr., University of Idaho, 1987.
3. 김태호 "교통하중을 받는 구조물의 동적해석", 석사학위논문, 성균관대학교, 1998.
4. 최원호, 김기철, 이동근, "보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가", 대한건축학회 춘계학술발표회 논문집, 1999. 4, pp. 69-74.
5. 김기철, 이동근, "보행하중을 받는 구조물의 효율적인 진동해석", 한국지진공학회 추계학술발표회논문집, 2000. 9, pp. 159-166.
6. 김기철, 이동근, "바닥판의 보행하중에 대한 실험적 연구", 한국전산구조공학회 추계학술발표회논문집, 2000. 10, pp. 273-280.
7. Lee, D. G. and Kim, G. C., "Modeling of moving loads for analysis of floor vibration," *Proceedings of APCS 2000 conference, 2000. 10, pp. 869-879.*
8. William, W. Jr. and Paul, R. J., *Finite Elements for Structural Analysis*, Prentice Hall, 1984, pp. 205-209.