

## 보행하중의 매개변수 분석 및 모형화 Parameter Analysis and Modeling of Walking Loads

이 동 근\*      김 기 철\*\*      최 균 효\*\*\*  
Lee, Dong-Guen      Kim, Gee-Cheol      Choi, Kyun-Hyo

### ABSTRACT

The floor vibration aspect for building structures which are in need of large open space are influenced by the interrelation between natural frequency and working loads. Structures with a long span and low natural frequency have a higher possibility of experiencing excessive vibration induced by dynamic excitation such as human activities. These excessive vibrations make the residents uncomfortable and the serviceability deterioration. Need formulation of loads data through actual measurement to apply walking loads that is form of dynamic load in structure analysis. The loads induced by human activities were classified into two types. First type is in place loads. the other type is moving loads. A series of laboratories experiments had been conducted to study the dynamic loads induced by human activities. The earlier works were mainly concerned to parameters study of dynamic loads.

In this paper, the walking loads have been directly measured by using the measuring plate in which two load cells were placed, the parameters, the load-time history of walking loads, and the dynamic load factors have been analyzed. Moreover, the shape of the harmonic loads which were gotten by decomposition the walking loads have been analyzed , and the walking loads modeling have been carried out by composition these harmonic loads derived by functional relation.

### 1. 서 론

낮은 고유진동수를 가지는 장경간 구조물의 경우 바닥판에 가해지는 보행하중이나 기계하중 같은 동적하중으로 인하여 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이러한 진동은 사용자에게 불쾌감을 주어 건물의 사용성에 크게 영향을 미치게된다. 동적하중의 한 형태인 보행하중을 구조물 해석에 적용하기 위해서는 실제 계측 하중을 사용해야하나 실험을 통한 하중데이터의 계측이 곤란하다. 그러므로 필요한 보행하중의 생성을 위한 하중데이터의 정식화가 필요하다.

보행하중에 관한 기존연구<sup>1),2)</sup>에서는 동적하중의 매개변수와 하중형상에 대한 분석이 주된 연구분야였다. 구조물에 가해지는 보행하중은 이동하면서 가해지는 동적하중과 재자리에서 가해지는 동적하중으로 구분 할

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정

\*\*\* 성균관대학교 건축공학과 석사과정

수 있다. 본 논문에서는 두 개의 로드셀이 장착된 계측 플레이트를 이용하여 바닥판에 가해지는 보행하중을 직접 계측하여 보행하중에 영향을 미치는 매개변수에 따른 보행하중의 형상과 동적하중계수를 분석하였다. 그리고 단위 보행하중의 분해를 통해 나타나는 조화하중을 성분별로 분석하고 일정한 함수관계를 유도 함으로써 다양한 진동수별 보행하중을 모형화 하였다.

## 2. 보행하중의 계측 및 하중-시간이력 분석

보행하중에 대한 기존의 연구<sup>7)</sup>에서 하중형상에 영향을 미치는 매개변수인 보행속도, 표면조건, 보행자세, 신발조건 등에 대한 평가와 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 주요한 매개변수인 보행속도에 대하여 하중-시간이력을 계측하여 분석하였다.

### 2.1 보행하중의 계측

그림 1과 같이 플레이트의 중앙에 두 개의 로드셀을 설치하여 왼발과 오른발에 의한 보행하중을 계측하였다. 플레이트와 로드셀 사이는 약간의 간격을 두어 계측 플레이트 움직임에 의한 영향을 배제하였고 플레이트 높이를 로드셀과 같게 하여 일정하게 보행할 수 있도록 하였다. 보행자가 보행속도를 일정하게 하기 위하여 metronom을 사용하였다. 각각의 보행자에게서 1.3Hz부터 2.6Hz까지 0.1Hz씩 증가시키며 3회씩 42회의 데이터를 계측하여 총 670개의 하중데이터를 얻었다. 서로 다른 보행속도에서의 계측 전에 보폭을 측정하여 로드셀의 간격조절에 이용하였다.

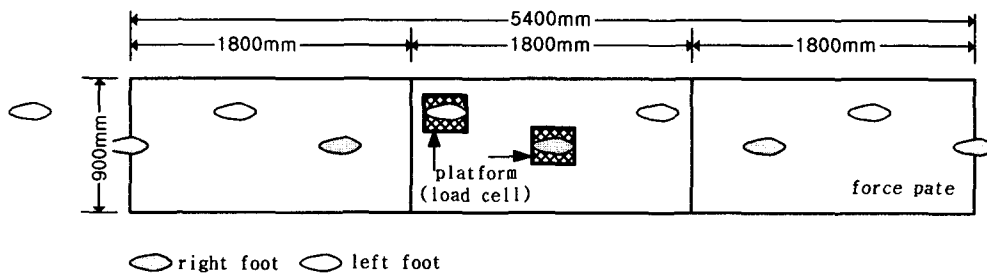


그림 1 계측 플레이트

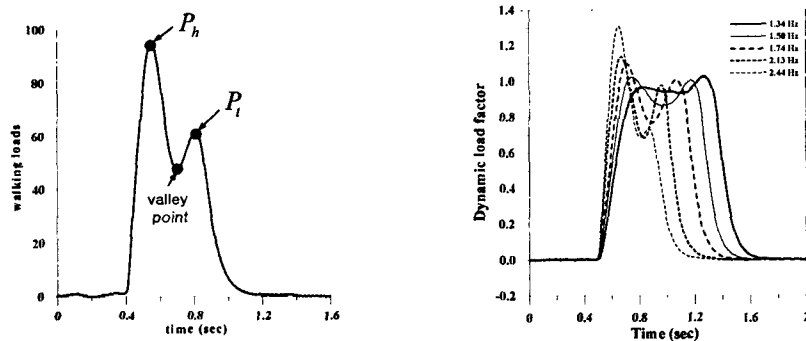
### 2.2 단위 보행하중의 하중-시간이력 분석

보행하중의 계측에 앞서 보행자의 몸무게와 보폭을 측정하여 하중분석을 위한 기초자료로 사용하였다.

표 1 보행자의 몸무게

보행자	성별	몸무게(kg)	보행자	성별	몸무게(kg)
A	남자	67	I	남자	68
B	남자	82	J	남자	72
C	남자	70	K	남자	70
D	남자	68	L	남자	68
E	남자	69	M	남자	102
F	남자	64	N	여자	53
G	남자	70	O	여자	55
H	남자	68	P	여자	57

보행하중에 영향을 주는 매개변수는 오른발/왼발, 보행속도, 바닥판 표면조건, 신발조건, 보행자세, 성별, 몸무게 등이 있으나 하중의 양상에 지배적인 영향을 미치는 요소는 보행속도이다. 본 실험에서는 보행속도에 따른 단위 보행하중을 계측하고 분석하였다. 보행하중을 계측하는 가장 일반적인 방법은 단위보행하중을 하중-시간이력의 형태로 계측하는 것이다. 보행하중에 대한 하중-시간이력은 몸무게(static load)에 대한 동적하중의 비인 동적하중계수(dynamic load / static load)로 나타내었다. 그림 2(a)를 보면 하중계측시 일반적으로 발뒤꿈치의 바닥판 접촉(heel impact)에 의해서 나타나는 정점  $P_h$ 와 발가락의 바닥판 접촉(toe-lift up)에 의해서 발생하는 정점  $P_t$ , 두 개의 정점이 나타남을 알 수 있다. 보행속도에 따라  $P_h$ 와  $P_t$ 값이 변하게 되며 최대 정점 값과 valley point값과의 차이도 변하게 된다.



(a) 단위 보행하중 형상

(b) 각 진동수별 보행하중 형상

그림 2 보행 진동수별 하중양상

그림 2(b)는 보행진동수별 하중-시간이력의 변화양상을 나타낸 것이다. 보행속도가 빨라질수록 정점  $P_t$ ,  $P_h$ , valley point값이 변화함을 알 수 있다. 각각의 보행자에 대한  $P_h$ 의 변화양상은 그림 2(b)와 같이 보행속도의 증가할수록 커지는 것을 볼 수 있다.  $P_t$ 의 변화양상은 보행속도에 반비례하여 그 크기가 줄어드는 경향을 보이고 있다. valley point의 동적하중계수 또한 보행속도에 반비례하여 줄어드는 것을 볼 수 있다.

### 3. 단위 보행하중의 분해

보행하중과 같이 사람의 움직임에 의해 야기되는 동적하중은 보행속도에 영향을 받는 주기하중으로 생각할 수 있으며 보행하중은 보행진동수에 대한 조화하중으로 분해할 수 있다. 본 연구에서는 푸리에 변환을 사용하여 하중을 분해하였다.

#### 3.1 하중분해기법 (Fourier Transform)<sup>3)</sup>

계측한 하중-시간이력 값을 가지고 조화하중별로 적분을 실시하여 식(1),식(2),식(3)과 같이 세 가지 값을 구한다.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos(n \frac{2\pi}{T} t) dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin(n \frac{2\pi}{T} t) dt \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 우리가 구하고자 하는 조화성분의 차수이며  $T$ 는 계측하중의 전체시간,  $t$ 는 계측하중의 시간간격을 나타낸다. 위에서 구한 각각의 값을 식(4)에 대입하면 각각의 조화성분을 구할 수 있다.

$$F_n(t) = a_n \cos(n \frac{2\pi}{T} t) + b_n \sin(n \frac{2\pi}{T} t) = A_n \sin(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n) \quad (4)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$$

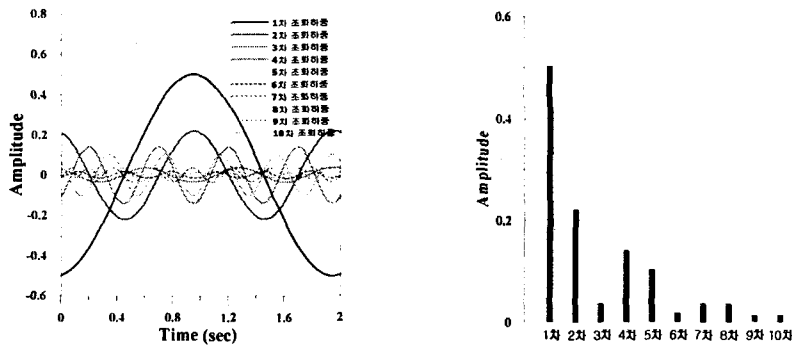
여기서  $A_n$ 은 조화성분의 진폭이며  $\varphi_n$ 는 위상각이 된다.

식 (5)를 이용하여 분해된 각각의 조화성분을 다시 조합하여 계측한 본래의 하중과 비교 분석한다.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \frac{2\pi}{T} t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n \frac{2\pi}{T} t) \quad (5)$$

### 3.2 조화하중의 분석

단위보행하중을 푸리에 변환시키면 보행진동수의 정수배에 해당하는 여러 개의 조화하중으로 분해된다.



(a) 진동수 성분별 조화하중

(b) 조화하중의 진폭

그림 3 조화하중 성분과 각 성분의 진폭

본 연구에서는 10차 조화하중까지 분해를 실시하였다. 그림 3(b)를 보면 8차 이후의 조화하중은 진폭이 매우 작으므로 하중-시간이력에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 앞에서 분해한 조화하중 성분을 각각 단계별로 다시 합성하여 계측한 본래의 하중과 비교 분석하였다. 그림 4는 1차 조화하중 성분으로부터 6차, 7차, 8차 조화하중 성분까지 합성한 결과를 나타내고 있다. 6차, 7차 조화하중까지의 합성은 원래의 하중성분과 약간의 차이가 나타나고 있으나 8차 조화하중까지 합성한 것은 본래의 하중과 거의 차이가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이는 푸리에 변환을 통해 구한 조화하중 성분의 진폭과 관련된 것으로 9차이상의 조화하중 성분은 그 진폭이 매우 작아 전체 하중형상에 영향을 주지 못함을 나타낸다.

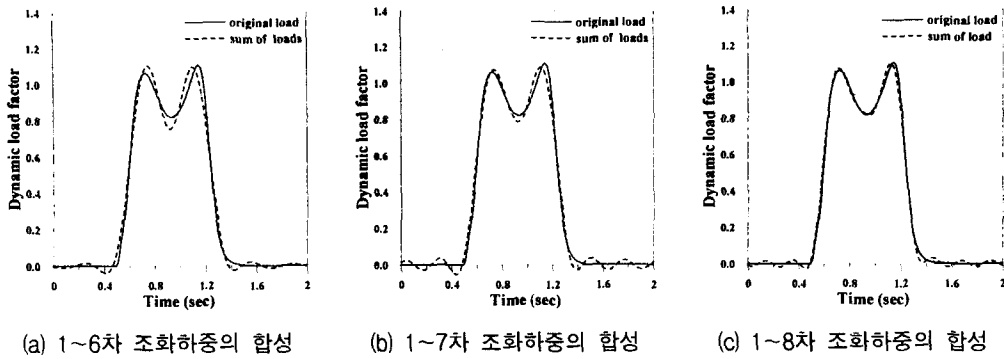


그림 4 보행자 H 차수별 조화하중 성분의 합성

#### 4. 단위 보행하중의 모형화

##### 4.1 조화하중 관계식

앞 장에서 분석해 본바와 같이 단위 보행하중은 여러개의 조화하중 성분으로 분해가 가능하며 이러한 조화성분들은 보행속도에 대하여 일정한 함수관계를 가지게된다. 본 논문에서는 이러한 계수들의 관계식을 바탕으로 진동수에 따른 단위 보행하중을 모형화 하였다. 본 논문에서는 앞장의 분석결과를 기초로 8차 조화하중까지의 관계식을 유도하였다.

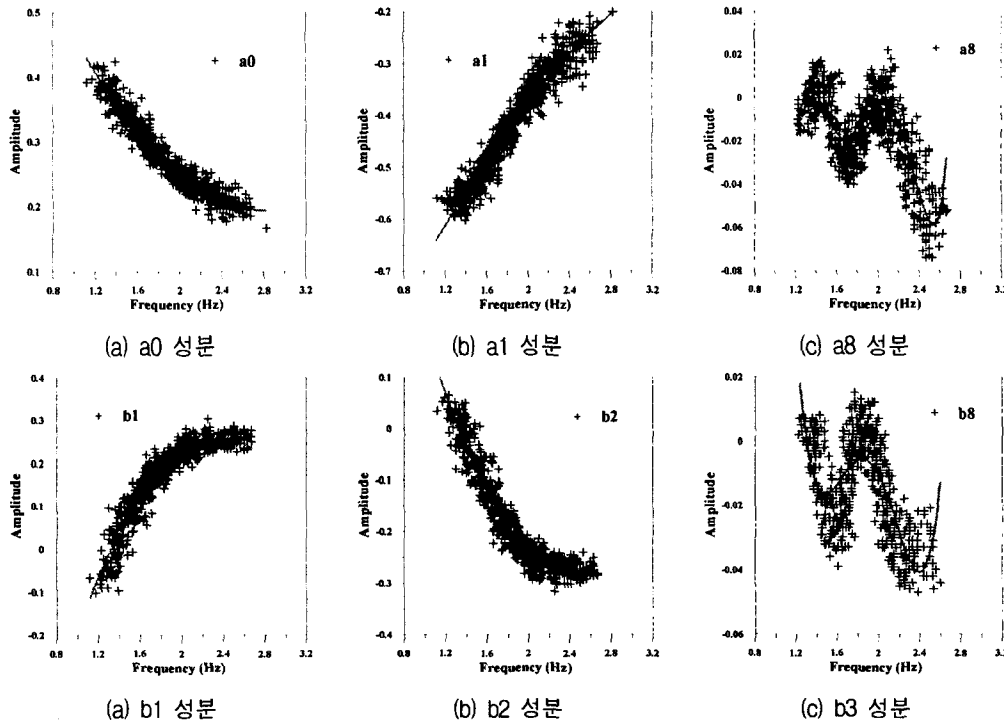


그림 5  $a_n$ ,  $b_n$ 의 진동수별 분포

표 2 계수별 함수 관계식

$y = AX^5 + BX^4 + CX^3 + DX^2 + EX + F$													
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
$a_0$	0	0	0	0.078	-0.447	0.831		0	0	0	0	0	0
$a_1$	0	0	0	-0.054	0.469	-1.1	$b_1$	0	0	0	-0.237	1.121	-1.071
$a_2$	0	0	0.283	-1.797	3.51	-1.97	$b_2$	0	0	0	0.232	-1.122	1.081
$a_3$	0	0	-0.171	1.248	-2.793	1.999	$b_3$	0	0	0	-0.073	0.402	-0.444
$a_4$	0	0	-0.093	0.301	-0.025	-0.411	$b_4$	0	0	0.506	-3.043	5.96	-3.725
$a_5$	0	-0.788	6.449	-19.252	24.695	-11.461	$b_5$	0	0	-0.361	2.298	-4.718	3.052
$a_6$	0	0.566	-4.722	14.354	-18.77	8.936	$b_6$	0	0	0.252	-1.629	3.332	-2.164
$a_7$	0	-0.32	2.712	-8.374	11.154	-5.428	$b_7$	0	-0.684	5.13	-14.114	16.923	-7.454
$a_8$	1.084	-10.399	39.197	-72.556	65.926	-23.524	$b_8$	0	0.491	-3.756	10.571	-12.978	5.859

그림 5는 푸리에 변환시 나타나는 변수  $a_n$  과  $b_n$ 의 진동수별 분포를 나타낸다. 낮은 차수일 경우 분포 형태가 2차 함수형태를 보이지만 차수가 높아질수록 고차함수의 형태로 나타남을 알 수 있다. 8차 이상 조화 하중 성분은 이산을 하므로 일정한 함수관계를 파악하기가 곤란하다. 또한 8차 이상 성분의 진폭이 매우적으므로 8차이후의 변수는 고려대상에서 제외하였다. 표 2에서 각 계수별 함수관계를 나타내었다. 위의 함수관계를 바탕으로 임의의 보행 진동수를 가지는 보행하중을 모형화할 수 있다.

4.2 모형화된 하중의 비교분석

앞절에서 언급한 함수 관계식을 바탕으로 1.3Hz부터 2.4Hz까지 보행하중을 모형화하였다. 그림 6은 모형화 하중과 계측하중의 진동수별 변화 양상을 나타내고 있다.

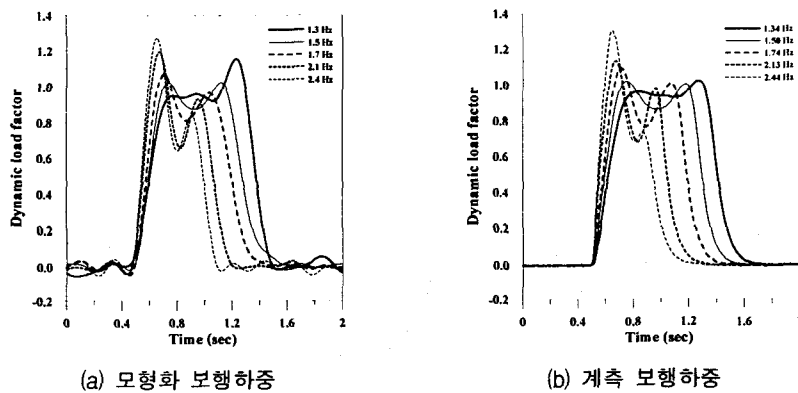


그림 6 모형화 보행하중과 계측 보행하중의 비교

계측하중의 경우 보행진동수가 증가 할수록  $P_h$ 값이 증가를 하며  $P_l$ 와 valley point 값은 감소를 하게 되는데 이는 모형화 하중의 경우에 있어서도 같은 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

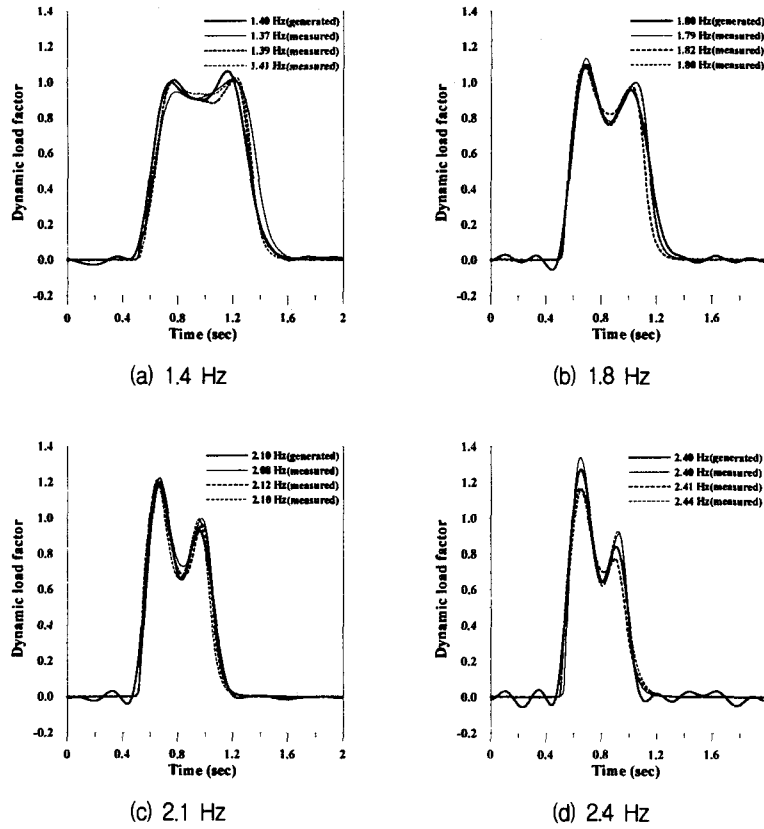


그림 7 보행 진동수별 모형화 하중과 계측하중의 비교

그림 7은 느린보행, 보통보행, 빠른보행의 대표적인 진동수 성분별 하중-시간 이력을 계측하중과 모형화하중으로 나누어 비교한 것이다. 느린걸음인 1.4Hz에서는 전체적인 분포는 비슷하나 모형화 하중의 경우  $P_t$  값이 명확하게 나타남을 알 수 있다. 보통걸음인 1.8Hz와 빠른걸음인 2.1Hz인 경우에는 전체적인 양상과  $P_h$ ,  $P_t$ , valley point값이 유사하게 나타난다. 매우 빠른걸음인 2.4Hz의 경우에는 모형화 하중과 계측하중간  $P_h$ ,  $P_t$ , valley point값이 다소 차이가 나게 되는데 이는 보행속도가 빨라질수록 보행자에 의한 충격효과가 커지게 됨으로 나타나는 현상이다. 모든 보행진동수 영역에서 모형화하중이 가지는 공통적인 특징은 하중의 시작점 이전과 끝점 이후에 조화하중 성분이 나타난다는 것이다. 이는 앞에서 언급한 8차 이후의 조화하중성분을 고려하지 않은 결과이며 8차 이후의 조화하중성분은 전체 하중형상에는 영향을 미치지 않지만 하중의 시작점 이전과 끝점 이후의 조화하중 성분에는 영향을 미침을 나타낸다.

## 5. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 바다판의 가장 일반적인 진동원인 보행하중에 대하여 직접 계측하고 보행하중에 영향을 주는 주요 매개변수들에 대해 분석을 실시하였다. 또한 보행속도에 따른 보행하중의 양상과 조화 하중성분으로

의 분해 합성을 통해 단위 보행하중을 모형화 함으로써 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

첫째, 보행하중에 대한 매개변수 중에서 하중형상에 영향을 크게 주는 매개변수는 보행진동수(보행속도)이다.

둘째, 보행하중을 푸리에 변환하여 여러 형태의 조화 하중성분을 얻을 수 있으며 각각의 조화하중 성분은 일정한 함수관계를 가지고 있다.

셋째, 9차 이후의 성분은 하중의 형상에는 영향을 미치지 못하므로 보행하중의 모형화시 8차 조화성분까지의 조합으로 계측 보행하중과 유사한 단위 보행하중을 얻을 수 있다.

모형화된 보행하중의 앞부분과 뒷부분에서 약간의 조화하중 성분이 나타나게 되는데 이 성분들은 구조물에 미치는 영향이 미소할 것으로 판단되며 모형화된 단위 보행하중을 실제 구조물 해석에 적용하여 계측된 보행하중의 해석결과와 비교해 봄으로써 그 타당성을 검증해 보아야 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2001년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Rainer, J.H. and Pernica, G., "Vertical Dynamic Forces from Footsteps," Noise and Vibration Section, Division of Building Research Council Canada, Ottawa, Canada, 1986, pp.12~21
2. Ebrahimpour, A. and Sack, R.L., "Modeling Dynamic Occupant Loads," Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 6, June, 1989, pp.1476~1496
3. Bachmann, H. and Ammann, W., Vibrations in Structures - Structural Engineering Documents, 1987
4. 김기철, 이동근, "바닥판의 보행하중에 대한 실험적 연구," 한국 전산구조공학회 추계 학술발표회 논문집, 2000. 10, pp.273~280
5. Kerr, S. C. and Bishop, N. W. M., "Human Induced Loading on Flexible Staircases," Engineering Structures, No.23, 2001, pp. 37~45
6. Lee, D. G. and Kim, G. C., "Modeling of Moving Loads or Analysis of Floor Vibration," Proceedings of APCS 2000 conference, 2000. 10, pp. 869~879
7. 최균효, 김기철, 이동근, "로드셀을 이용하여 계측한 보행하중의 분석," 대한건축학회 춘계 학술발표회 논문집, 2001. 4, pp.219~222