

바닥판의 보행하중에 대한 실험적 연구 A Study on the Walking Loads Subjected to Floor Slabs

김 기 철*
Kim, Gee-Cheol

이 동 근**
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Building structures which are in need of large open space make the damping effect of the structures decrease greatly. Assembly and office buildings with a lower natural frequency have a higher possibility of experiencing excessive vibration induced by human activities. These excessive vibration make the residents uncomfortable and the serviceability deterioration. The loads induced by human activities were classified into two types. First type is in place loads as like jumping, foot stamping and body bouncing. The other type is moving loads as like walking, running and dancing. 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 as like activity type, weight, sex, surface condition of structure and etc.

In this paper, we have measured directly the walking loads by using the platform. And we have evaluated and analyzed load-time history of walking loads. One of the most important parameter is pacing rate (walking speed) in the walking loads. The difference between the maximum value and minimum value of walking loads depends on the walking speed.

1. 서론

건축물의 사용 목적에 따라서 넓은 공간이 요구되는 집회용 건축물이나 사무용 건축물에서 바닥판 진동은 주로 기계의 작동이나 사람의 움직임 등에 의해서 발생한다. 기계의 작동에 의해서 발생하는 동적하중은 하중의 주기 및 가진위치가 비교적 명확한데 비하여 사람의 움직임으로 야기되는 동적하중은 하중의 주기와 가진위치가 일정치 않은 경우가 많다. 일반적으로 사람의 움직임에 의하여 야기되는 동적하중은 제자리 뛰기, 발구르기, 몸의 반동과 같이 한 자리에 가해지는 동적하중과 걷기, 달리기, 춤추기 등과 같이 이동하면서 가해지는 동적하중으로 분류할 수가 있다. 이러한 하중에 대한 기존의 연구^{1),3)}에서는 가속도나 변위의 계측을 통하여 간접적으로 동적하중을 계측하였으며 동적하중의 주요 매개변수들에 대한 평가와 분석이 있었다.

본 논문에서는 로드셀(load cell)이 장착된 계측판(platform)을 이용하여 바닥판에서 발생할 수 있는 가장 일반적인 진동원인 보행하중을 직접 계측하고 보행하중의 주요 매개변수들에 의한 보행하중의 양상과 동적하중계수를 분석하였다.

* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 연구원

** 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 보행하중의 계측과정 및 주요장비

2.1 보행하중의 계측과정

보행하중의 계측은 그림 1과 같이 계측판, 전송기, A/D변환기, 컴퓨터와 같은 시스템을 이용하여 계측하였다. 계측판을 이용하여 직접 계측한 보행하중은 매우 미소한 아날로그 데이터이므로 이를 적절하게 증폭시켜 A/D변환기로 전송한다. 전송된 데이터를 A/D변환기를 이용하여 디지털 데이터로 변환시켜 컴퓨터에 저장한다.

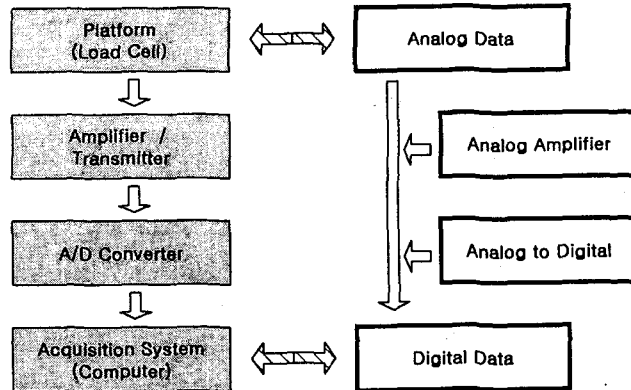


그림 1. 보행하중의 계측과정

2.2 계측 도움판(force plate)

보행자가 계측판(platform)을 밟기 전에 일정한 보폭을 유지할 수 있도록 계측 도움판의 중앙에 계측판을 설치하였다. 계측 도움판의 크기는 길이 5400mm, 너비 900mm로 하였으며, 두께는 24mm로 계측판의 두께와 같게 하여 보행에 지장이 없도록 하였다. 계측판과 도움판을 분리하여 도움판의 움직임이 하중 계측에 영향이 주지 않도록 하였으며, 도움판의 표면 조건을 다양하게 할 수 있도록 하였다. 계측판을 도움판의 중앙에서 설치하여 보행자의 오른발과 왼발에 의한 하중-시간 이력을 계측할 수 있도록 하였다.

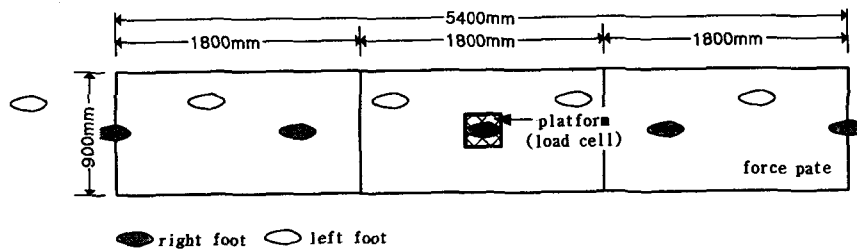


그림 2. 계측 도움판 (force plate)

2.3 주요 계측장비

보행하중 계측에 필요한 주요장비는 계측판, 전송기, A/D변환기 등이며 로드셀이 내장되어 있는 계측판으로부터 보행하중을 직접 계측하였다. 보행하중과 같이 사람의 움직임에 의하여 야기되는 동적하중의 계측에 있어서 가장 중요한 것은 샘플링 속도(sampling rate)와 분해도(resolution)이다. 본 실험에서는 보행하중 계측에 충분한 샘플링 속도와 분해도를 갖는 장비를 사용하였다.

2.3.1 계측판(platform)

보행하중의 계측을 위한 계측판은 슬립형으로 압축형 로드셀이 장착되어 있으며 크기는 가로 300mm, 세로 300mm, 두께 25mm이다. 유효 계측하중은 400kg이며 최대 600kg까지 계측할 수 있다.

2.3.2 데이터 전송기

본 실험에 사용한 데이터 전송기는 로드셀 전용 데이터 전송기로 증폭기가 필요 없이 데이터 전송이 가능한 것이다. 데이터 전송 시 입력전압의 급증에 의한 오류를 방지할 수 있도록 완충장치(surge absorber)가 내장되어 있다.

2.3.3 A/D변환기

보행하중의 아날로그 데이터를 디지털 데이터로 변환하는 장치는 보행하중 계측에 충분한 분해능력과 샘플링 속도를 가지고 있는 것으로 데이터 분해능력은 12비트이며 초당 최대 200,000개의 데이터를 샘플링 할 수 있다.

3. 보행하중에 대한 매개변수

보행하중 계측 이전에 100여명의 보행자를 상대로 성별, 몸무게, 보폭 등을 조사하여 보행하중 분석을 위한 기초 자료로 사용하였다. 남녀 비율을 7:3정도로 하였으며, 표 1은 보행자의 몸무게와 보폭으로 몸무게는 50kg~89kg, 보폭은 58.74cm~90.14cm까지 다양하게 분포하고 있다. 보행하중에 영향을 주는 주요 매개변수는 보행속도, 바닥판 표면조건, 오른발/왼발, 신발의 종류, 성별, 몸무게 등이 있다.

3.1 보행속도(보행진동수)

보행속도는 느리게, 보통, 빠르게 세 가지로 구분하여 보행하였으며 15m의 거리에 대한 보폭 수와 도달시간을 측정하여 보행자의 보폭과 보행속도를 계측하였다. 보행하중의 평가에 있어서 중요한 매개변수인 보행 진동수는 보행자의 보폭에 관계없이 나타나고 있으며 본 실험에서의 보행자 보행진동수는 Bachmann²⁾이 제시한 보행진동수보다 유사하게 나오고 있다.

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				

3.2 바닥판 표면 조건

보행하중이 작용하는 바닥판의 표면은 최종적으로 카펫(carpet), 모노튠(vinyl tile), 목재 마루 또는 시멘트 모타르 등으로 마감하게 된다. 본 실험에서는 상대적으로 부드러운 카펫과 딱딱한 모노튠에 대한 보행하중을 각각 계측하여 바닥판 표면조건에 따른 보행하중의 양상을 분석하였다.

3.3 오른발과 왼발

보행자의 보행습관에 따라 오른발(right)의 보행하중과 왼발(left)의 보행하중이 다르게 나타날 수 있으므로 본 실험에서는 오른발과 왼발에 대한 보행하중을 각각 계측하여 보행하중의 분석을 위한 매개 변수로 사용하였다.

3.4 신발종류

보행자가 착용한 신발의 종류에 따라 보행하중이 다르게 나타날 수 있으므로 본 실험에서는 가장 일반적인 구두(oxford)와 운동화(sports shoes)에 대한 보행하중을 각각 계측하여 신발종류에 따른 보행하중을 분석하였다. 이외에도 몸무게, 성별 등 여러 가지 매개변수가 있으나 본 실험에서는 위에서 언급한 매개변수만을 사용하여 보행하중을 분석하였다.

4. 보행하중의 계측 및 분석

일반적으로 사람의 움직임은 크게 두 가지로 제자리에서 움직이는 것과 이동하며 움직이는 것으로 구분되며 보행에 의한 동적하중은 가진형태에 따라 이동보행과 제자리보행으로 구분할 수 있다. 본 실험에서는 단위 보행하중의 계측과 연속 보행하중의 계측을 위하여 각각 이동보행과 제자리보행에 의한 보행하중을 계측하였다.

4.1 단위 보행하중

4.1.1 보행속도에 따른 보행하중

운동화를 신은 보행자의 걸음걸이를 느린 걸음, 보통 걸음, 빠른 걸음으로 구분하여 오른발에 의한 보행하중을 계측하였다. 바닥판 조건은 카펫로 하였다. 그림 3은 보행속도에 따른 하중-시간이력을 몸무게에 대한 동적하중의 비인 동적하중계수(dynamic load/static load)로 나타낸 것이다.

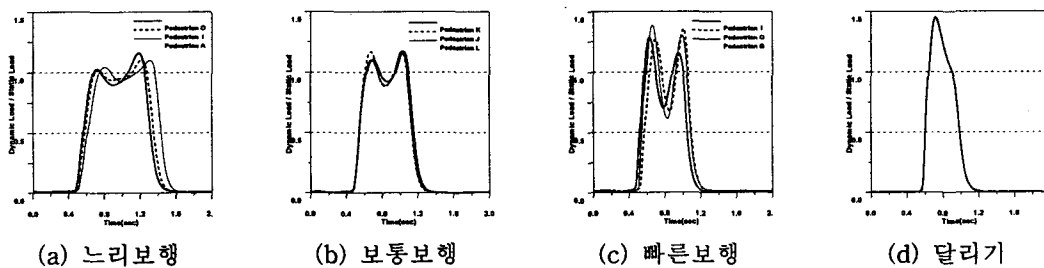


그림 3. 보행속도에 따른 보행하중

보행에 의한 동적하중은 일반적으로 두 개의 정점(peak) 성분을 가지고 있다. 첫 번째 정점은 발의 뒤꿈치 충격(heel impact)에 의해서 나타나는 성분이며 두 번째 정점은 발가락의 바닥판 접촉(toe-lift up)에 의해서 나타나는 성분이다.

그림 3의 느린 걸음에 대한 하중-시간이력을 살펴보면 동적하중이 몸무게의 근처까지 서서히 증가 몸무게 주위에서 약간 변화가 있다가 점점 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 정점부근에서 하중의 변화가 거의 없이 평평한 것을 볼 수 있다. 보통걸음에 대한 하중-시간이력은 정적하중보다 큰 정점까지 급속히 증가하다 약간 떨어지다 한번 더 정점에 이르다 점점 줄어드는 말안장의 모양을 가지고 있다. 빠른 걸음의 하중양상은 충격하중과 같이 하나의 정점만을 가지는 경우와 다른 하나는 보통 걸음의 양상과 비슷하지만 하중의 변화가 급속하여, 보행 동적하중의 최대 값(peak point)과 최소 값(valley point)의 차이 다른 보행하중과 달리 매우 많이 나는 것을 볼 수 있다.

보행자의 보행 습관에 따라 발가락의 접촉에 의한 동적하중이 발뒤꿈치의 충격에 의한 동

적하중보다 큰 경우도 있지만, 대부분의 보행 하중은 발뒤꿈치 충격에 의한 첫 번째 정점 성분이 발가락의 접촉에 의한 두 번째 성분보다 크게 나타나고 있다.

4.1.2 바닥판 표면의 조건에 따른 보행 하중

바닥판 표면 조건에 따른 보행하중을 분석하기 위하여 도움판에 카펫(carpet)과 모노륨(vinyl tile)을 깔아 각각의 보행하중에 대한 하중-시간이력을 계측하였다.

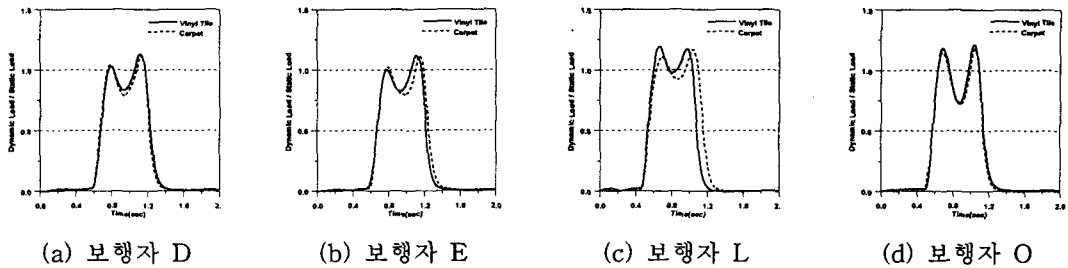


그림 4. 바닥판 표면조건에 따른 보행 하중

그림 4는 구두를 신은 보행자의 오른발에 의한 보행하중으로 바닥판 표면조건에 따른 보행하중의 하중-시간이력을 나타낸 것이다. 바닥판에 카펫을 설치하는 경우의 보행하중이 약간 더 작게 나오기는 했으나 바닥판에 모노륨을 설치하는 경우의 보행하중과 거의 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 바닥판의 표면조건은 보행하중에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

4.1.3 오른발과 왼발에 따른 보행하중

보행자의 보행습관에 따라 오른발과 왼발에 의한 보행하중이 다를 수 있으므로 오른발과 왼발에 대한 보행하중의 하중-시간이력을 각각 구분하여 계측하였다.

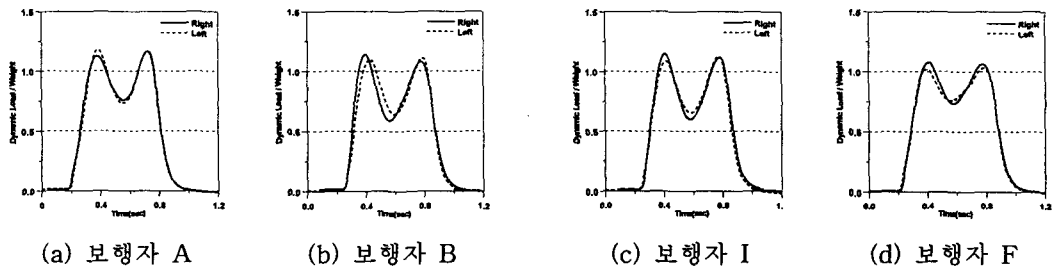


그림 5. 오른발과 왼발에 따른 보행 하중

그림 5는 구두를 신은 보행자의 오른발과 왼발에 대한 보행하중을 하중-시간이력을 나타낸 것으로 바닥판 조건은 카펫으로 하였다. 보행자의 보행습관에 따라 오른발과 왼발의 보행하중이 약간 다르게 나타나지만 보행속도에 의한 차이와 비교하여 그 차이가 아주 작은 것을 볼 수 있다.

4.1.4 신발종류에 따른 보행하중

보행하중의 매개 변수 중에 하나인 보행자의 신발종류에 따른 보행하중의 양상을 분석하기 위하여 구두와 운동화에 대한 보행하중의 하중-시간이력을 각각 계측하였다.

그림 6은 구두와 운동화에 대한 보행하중의 하중-시간이력을 나타낸 것으로 신발의 종류에 따라 보행하중의 양상과 크기가 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. 따라서 신발의 종류는 보행하중에 대한 중요한 매개변수가 되지 못하는 것으로 판단된다.

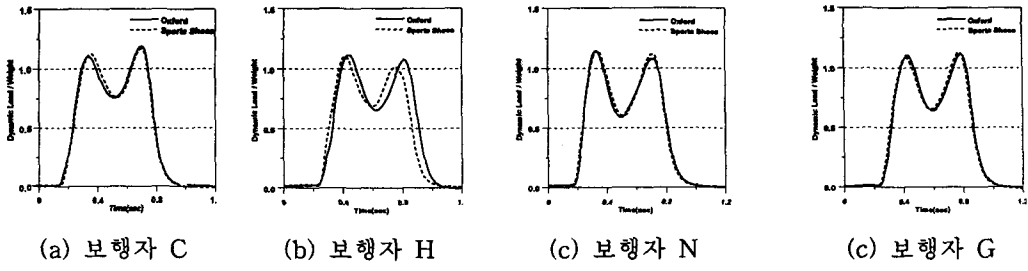


그림 6. 신발종류에 따른 보행 하중

보행하중에 영향을 주는 주요 매개변수는 보행속도, 바닥판 표면조건, 오른발/왼발, 신발의 종류 등 여러 가지가 있으나 보행하중의 하중-시간이력 양상에 가장 큰 영향을 주는 매개변수는 보행속도인 것을 알 수 있다.

4.2 연속 보행하중

바닥판에 가진되는 사람의 움직임에 의한 동적하중은 걷는 경우, 뛰는 경우, 달리는 경우 등 여러 가지가 있으나 일반적으로 보행하중의 형태가 대부분이며 연속 보행하중은 보행진동수에 대한 조화하중으로 나타난다. 제자리 연속 보행하중은 단위 보행하중의 중복으로 나타나며 그림 7~9에 제자리 연속 보행하중에 대한 시간영역과 진동수영역에서의 동적하중계수를 보행속도에 대하여 나타내었다. 연속 보행하중은 단위 보행하중에 대한 기본진동수의 정수배인 1차, 2차, 3차 조화성분에서 지배적인 성분이 나타나며 1차 조화성분의 대역에서 가장 큰 진폭을 가지고 있음을 볼 수 있다.

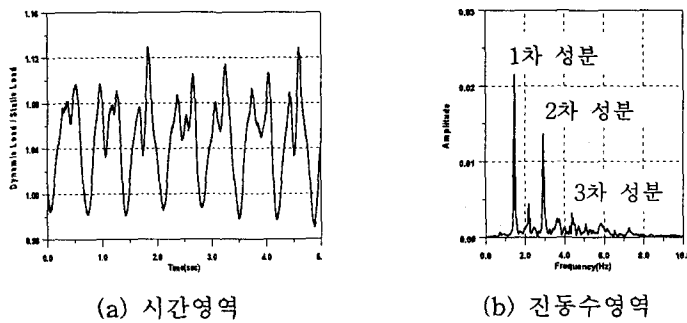


그림 7. 느린 걸음의 제자리 연속 보행하중

그림 7은 느린 속도의 제자리 연속 보행하중에 시간영역과 진동수영역에서의 동적하중계수를 나타낸 것으로 기본 진동수가 1.46Hz이므로 기본 진동수의 정수배인 1.46Hz, 2.92Hz, 4.38Hz에서 지배적인 진동수 성분이 나타나고 있다. 기본 진동수의 1/2배의 진동수 성분에서도 약간 크게 나오고 있음을 볼 수 있다.

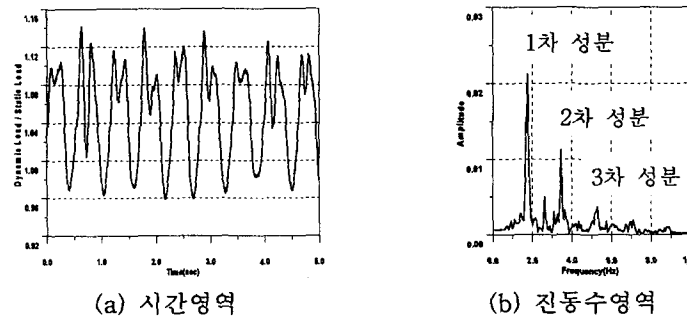
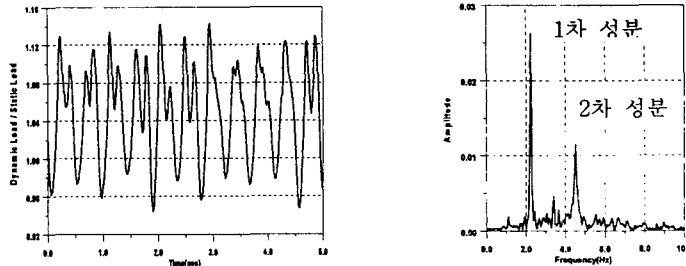


그림 8. 보통 걸음의 제자리 연속 보행하중

그림 8은 보통속도의 제자리 연속 보행하중의 시간영역과 진동수 영역에서의 동적하중계수로 기본진동수가 1.77Hz이므로 기본 진동수의 정수배인 3.54Hz와 5.31Hz에서 2차, 3차 조화 진동수성분이 나타나고 있다. 4차 이상의 진동수 성분은 진폭이 매우 작을 것을 볼 수 있다.



(a) 시간영역 (b) 진동수영역

그림 9. 빠른걸음의 제자리 연속 보행하중

그림 9는 빠른 속도의 연속 보행하중의 시간영역과 진동수 영역에서의 동적하중을 나타낸 것으로 기본 진동수가 2.25Hz이므로 그의 정수배인 4.50Hz에서 2차 조화 진동수 성분이 나타나고 있으며 기본 진동수의 3배인 6.75Hz에서는 지배적인 진동수 성분으로 나타나지 않고 있다. 빠른보행에서 1차 조화성분의 진폭이 느린보행과 보통보행에서 1차 조화성분의 진폭보다 크게 나오는 것을 볼 수 있다.

4.3 보행하중에 대한 최대 동적하중계수

보행하중의 하중-시간이력을 살펴보면 발뒤꿈치와 발가락의 영향으로 인하여 하중의 정점이 한 개 또는 두 개로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 정점은 보행속도에 따른 동적 거동에 의하여 나타나는 것으로 동적하중의 크기를 평가하는데 이용된다. 아래 표 2은 보행자의 몸무게에 대한 최대정점의 동적하중을 비로써 나타낸 것이다. 보행속도와 보행자의 몸무게에 대한 동적하중계수는 1.06~1.35까지 다양하게 나타나고 있다. 최대 동적하중계수는 몸무게보다는 보행속도에 의하여 크게 영향을 받고 있음을 볼 수 있다.

표 2. 동적하중 계수

몸무게(kg)	느린 걸음	보통 걸음	빠른 걸음	몸무게(kg)	느린걸음	보통걸음	빠른걸음
89	1.09	1.17	1.24	65	1.10	1.14	1.28
84	1.07	1.11	1.23	63	1.07	1.17	1.29
80	1.12	1.18	1.26	62	1.10	1.17	1.26
78	1.10	1.16	1.23	55	1.13	1.18	1.28
74	1.11	1.18	1.25	52	1.12	1.17	1.27
72	1.06	1.08	1.27	51	1.10	1.15	1.26
70	1.12	1.21	1.35	50	1.14	1.19	1.34
66	1.11	1.18	1.28	평균	1.10	1.16	1.27

4.4 보행하중의 조화하중 성분

보행하중과 같이 사람의 움직임에 의해 야기되는 동적하중은 움직임 속도에 의하여 영향을 받는 주기하중으로 생각할 수 있으며 보행하중은 보행진동수에 대한 조화하중으로 분해할 수 있다. 그림 10은 속도에 따른 보행하중을 1차, 2차, 3차 조화하중으로 분해한 것이다.

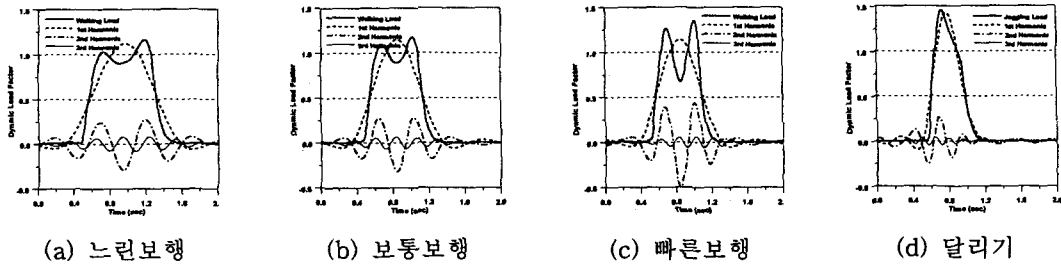


그림 10. 보행하중에 대한 조화하중

분해한 보행하중의 1차 조화성분은 몸무게를 나타내는 성분이며 보행하중의 양상은 2차 조화성분에 의해서 가장 큰 영향을 받는다. 2차 조화하중은 속도가 증가할수록 크게 나타나고 있으며 2차, 3차 조화하중은 보행진동수의 2배, 3배의 진동수를 가지고 있다. 달리는 경우의 동적하중은 보행하중과 다르게 1차 조화하중의 성분이 지배적이며 2차 조화하중 성분 중에서 뒤꿈치의 성분이 발가락에 의한 성분보다 매우 큰 것을 볼 수 있다. 보행하중의 전체적인 크기는 1차, 2차, 3차 조화성분에 대한 합으로 충분히 표현할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 바닥판의 일반적인 진동원인 보행하중을 직접 계측하고 주요 매개 변수들에 따른 보행하중의 양상과 동적하중계수를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 보행하중에 대한 매개변수 중에서 바닥판의 표면조건, 신발종류 등은 보행하중에 거의 영향을 주지 못하고 있으며 가장 큰 영향을 주는 매개 변수는 보행속도이다.

둘째, 제자리걸음에 의한 보행하중은 보행진동수뿐만 아니라 보행진동수의 2차, 3차 조화진동수에서도 지배적인 성분이 나타난다.

셋째, 보행하중의 동적하중계수는 보행속도에 따라서 다양하게 나타나며 보행속도가 빠를수록 크게 나타난다.

넷째, 보행하중의 하중-시간이력의 양상은 2차 조화성분에 의해서 가장 큰 영향을 받고 있으며 1차, 2차, 3차 조화성분으로 전체적인 보행하중을 표현할 수 있다.

보행하중을 받는 바닥판 슬래브의 동적해석에 있어서 실제적인 보행하중에 대한 데이터를 구하기가 쉽지 않기 때문에 이론적인 하중모델을 적용하는 경우가 많다. 이러한 하중모델을 제시하기 위해서는 본 논문에서 언급한 매개변수 이외의 여러 가지 매개변수에 대한 보행하중의 명확한 분석이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. Rainer, J. H. and Pernica, G (1986), "Vertical Dynamic Forces from Footsteps," Noise and Vibration Section, Division of Building Research, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, pp.12~21
2. Bachmann, H. et al, (1994), *Vibration Problem in Structures - Practical guideline*, Birkhauser, Verlag
3. Ebrahimpour, A. , (1987), *Modeling Spectator Induced dynamic Loads*, University of Idaho, Thesis for Ph. Dr.
4. 최원호, 김기철, 이동근, 1999. 4, "보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가," 대한건축학회 춘계학술발표회논문집, pp. 69~74
5. 김기철, 이동근, 2000. 10, "보행을 받는 구조물의 효율적인 진동해석," 한국지진공학회 추계학술발표회논문집