

바닥판 진동해석을 위한 보행하중의 모형화

Modeling of Walking Loads for Floor Vibration Analysis

김기철†

최균호*

이동근**

Kim, Gee-Cheol

Choi, Kyun-Hyo

Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2001년 10월 23일 ; 심사종료일 : 2002년 1월 3일)

요지

보행하중을 받는 바닥판 구조물의 진동해석을 위해서 일반적으로 계측한 보행하중을 적용하거나 Bachmann의 보행하중식을 사용하게 된다. 다양한 매개변수의 영향을 받는 보행하중은 계측이 쉽지 않으며, Bachmann 보행하중식은 보행진동수가 2.0Hz와 2.4Hz로 제한적이기 때문에 다양한 보행진동수에 따른 보행하중을 적용하기가 곤란하다. 따라서 보행하중을 받는 구조물의 진동해석을 위해서 보행하중의 매개변수 분석과 다양한 보행진동수에 적용이 가능한 보행하중의 모형화가 필요하다. 본 논문에서는 로드셀이 장착된 계측 플레이트를 이용하여 바닥판에 가해지는 보행하중을 직접 계측하고 매개변수를 분석하였다. 그리고 푸리에 변환을 이용하여 계측한 보행하중을 다양한 진동수를 가지는 조화하중으로 분해하였다. 분해과정을 거쳐 얻은 조화하중의 계수들을 보행진동수에 대한 일정한 함수관계로 유도하여 보행하중을 모형화하였다. 본 논문에서 제안한 보행하중식을 이용하면 다양한 보행진동수에 따라 다르게 나타나는 보행하중을 구조물의 진동해석에 용이하게 적용할 수 있다.

핵심용어 : 보행하중, 보행진동수, 푸리에 변환, 조화하중

Abstract

In General, the measured loads and load-time function suggested by Bachmann for walking are used for vibration analysis of structures subjected to footstep loads. It is not easy to measure walking loads because they are influenced by various parameters. Therefore, it is needed to model the walking loads that can be applied to structure analysis. Parameter study is used for the walking loads having various walking frequency for vibration analysis of structures under walking loads. In this study, walking loads were measured directly by using a force plate within two load cells, and the parameters of the walking loads were analyzed. The measured walking loads are decomposed into harmonic loads by using the Fourier series. Functional relationship between the walking frequency and the Fourier coefficients can be derived from the coefficients of harmonic loads obtained by the decomposition process, and the walking loads were formulated. It is possible to apply the generated walking loads easily or conveniently by the proposed equation to the analysis of a structure subjected to walking loads.

Keywords : walking loads, walking rates, fourier transformation, harmonic loads

† 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정
전화: 031-290-7574; Fax: 031-290-7570
E-mail: beat-67@dreamwiz.com

* 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

· 이 논문에 대한 토론을 2002년 6월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

일반적으로 건축구조물은 보와 바닥판의 처짐과 진동을 제한함으로써 건물의 사용성을 확보하게 된다. 집회용 건물, 쇼핑몰, 대형사무실 등과 같이 바닥판 구조물이 장경간화 되어 있는 건축물은 일반적으로 바닥판 진동의 고유진동수가 낮게 나타나며 보행하중이나 기계하중 같은 동적하중에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 진동은 사용자에게 불편감을 주어 건물의 사용성에 크게 영향을 미치게 된다. 기존의 보행하중에 관한 연구는 보행하중의 매개변수와 하중형상에 대한 분석이 대부분이었으며 구조물 해석을 위한 보행하중의 적용에 관한 연구는 미비한 실정이다. Bachmann의 경우¹⁾ 푸리에계수에 의한 보행하중식을 제안하였으나 2.0Hz와 2.4Hz로 제한된 것이었고 최근 Bishop의 연구에서는²⁾ 다양한 보행속도에 대한 푸리에 계수의 변화양상에 대해서만 언급하였다. 여러 매개변수에 의하여 영향을 받는 보행하중은 계측이 쉽지 않다. 따라서 동적하중의 한 형태인 보행하중을 구조물 진동해석에 적용하기 위해서는 계측한 보행하중의 분석과 다양한 보행속도에 대해서 적용할 수 있는 보행하중식의 정식화가 필요하다.

본 논문에서는 두 개의 로드셀이 장착된 계측 플레이트를 이용하여 바닥판에 가해지는 보행하중을 직접 계측하여 보행하중에 영향을 미치는 매개변수에 따른 보행하중의 형상과 동적하중계수를 분석하였다. 그리고 보행하중을 푸리에 변환하여 구한 조화하중을 성분별로 분석하고, 보행진동수에 대하여 푸리에 계수관계를 유도함으로써 다양한 진동수에 대하여 적용이 가능한 모형화 방법을 제안하였다. 모형화된 보행하중의 타당성을 검증하기 위하여 모형화된 보행하중과 계측된 보행하중을 예제 구조물의 진

동해석에 적용하여 예제 구조물의 진동응답을 비교 분석하였다.

2. 보행하중의 계측 및 매개변수 분석

보행하중의 동적특성에 영향을 미치는 주요 매개변수로는 보행속도, 바닥판 표면조건, 보행자세, 신발종류, 오른발/왼발, 성별, 몸무게 등을 생각할 수 있으며 본 연구에서는 이러한 매개변수들에 대한 보행하중의 양상을 분석하였다.^{3),4)}

2.1 보행하중의 계측

보행하중의 계측을 위하여 그림 1과 같이 너비 900mm 길이 5400mm의 계측 플레이트를 제작하였다. 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 충격에 의한 추가하중이 발생하지 않도록 하였다. 보행자의 보행속도를 일정하게 유지하기 위하여 일정한 시간간격으로 음향을 발생시키는 메트로놈을 사용하였다. 각각의 보행자에 대하여 보행진동수를 1.3Hz부터 2.6Hz까지 0.1Hz씩 증가시키며 각각의 보행속도에 대하여 3회씩 개인별 42회의 데이터를 계측하여 총 670개의 데이터를 얻었다. 보행속도에 따라서 보폭이 달라질 수 있으므로 계측 전에 보폭을 측정하여 로드셀의 간격을 조절하였다. 보행자의 성별의 비는 남자 대 여자를 13:3으로 하였으며 보행하중의 계측에 앞서 보행자의 몸무게와 보폭을 측정하여 보행하중의 분석을 위한 기초자료로 사용하였다. 표 1은 보행자의 몸무게를 나타낸 것으로 몸무게가 53kg에서부터 102kg까지

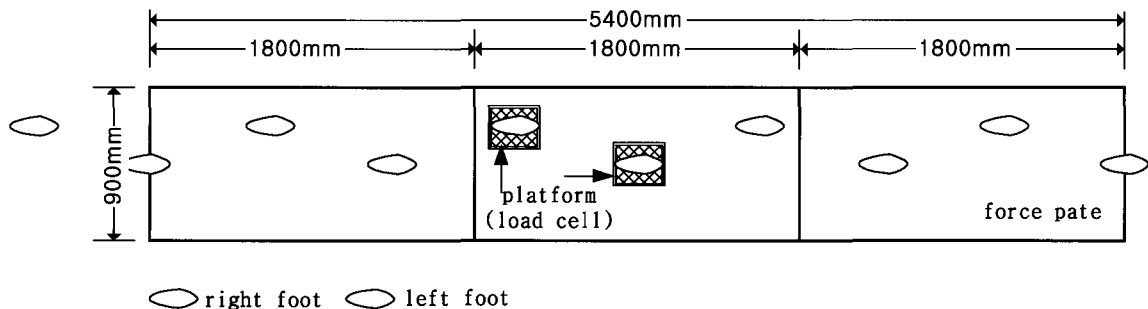


그림 1 계측 플레이트

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

다양하게 분포하고 있다. 보행하중에 대한 하중-시간 이력은 몸무게(static load)에 대한 동적하중(dynamic loads)의 비인 동적하중계수(dynamic load factor)로 나타내었다. 매개변수에 분석을 위한 하중계측은 상황 별 조건을 부여하여 별도의 계측을 시행하였다.

2.2 매개변수 분석

2.2.1 오른발/왼발

보행자의 보행습관에 따라 오른발과 왼발의 보행하중이 차이가 나타날 수 있으므로 두 개의 로드셀을 사용하여 오른발과 왼발의 보행하중을 각각 계측하였다. 그림 2는 구두를 신은 보행자의 오른발과 왼발에 의한 보행하중-시간이력을 나타낸 것으로 카펫을 깎 플레이

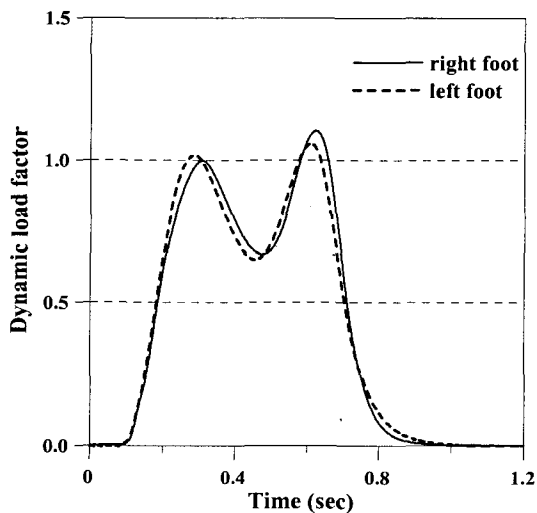
트에서 보행하중을 계측한 것이다.

보행자의 보행습관에 따라 오른발과 왼발의 보행하중이 약간 다르게 나타나지만 그 차이가 아주 미비한 것을 볼 수 있다. 따라서 보행하중에 대한 주요 매개변수가 되지 못하는 것으로 판단된다.

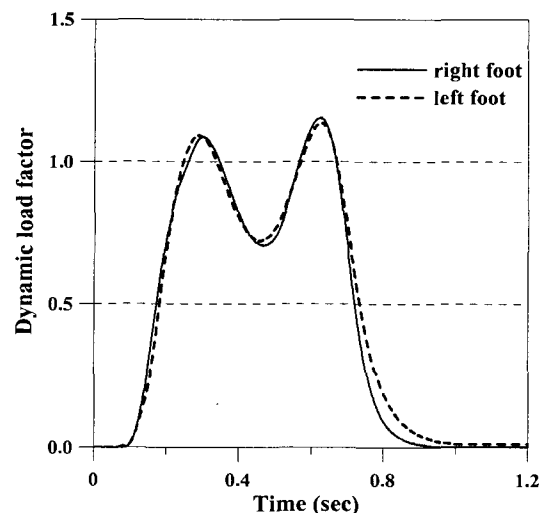
2.2.2 보행속도

보행속도를 느린걸음(1.0Hz이하), 보통걸음(1.0~2.0Hz), 빠른걸음(2.0Hz이상)의 세 가지로 구분하여 구두를 신고 걸을 때 발생하는 동적하중을 계측하였다. 두 개의 로드셀로부터 동적하중이 계측되는 시간을 측정하여 보행 진동수는 구할 수 있으며 또한 일정 거리에 대한 걸음 수를 도달시간으로 나누어서 구할 수 있다.

보행진동수가 1.0Hz의 느린보행에 대한 하중-시간이력을 살펴보면 동적하중계수가 1.0이 되는 지점까지 서서히 보행하중이 증가하는 것을 볼 수 있다. 정점에서 하중의 변화는 거의 나타나지 않는다. 따라서 동적하중 효과는 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 보통걸음의 경우를 살펴보면 보행하중은 첫 번째 정점까지 증가하였다가 약간 감소한 후 다시 두 번째 정점까지 증가하게 된다. 전체적으로 말안장 모양의 형태를 띄게 되며 동적효과가 약간 나타난다. 보행진동수가 2.0Hz 이상인 빠른보행의 경우에는 보행속도가 빠를수록 하중-시간이력형상이 하나의 정점을 가지는 뿔걸음 형태로 바뀌어 가며 말안장형태의 골 깊이가 깊어진다. 그림 3



(a) 보행자 A



(b) 보행자 B

그림 2 오른발/왼발에 의한 하중-시간이력

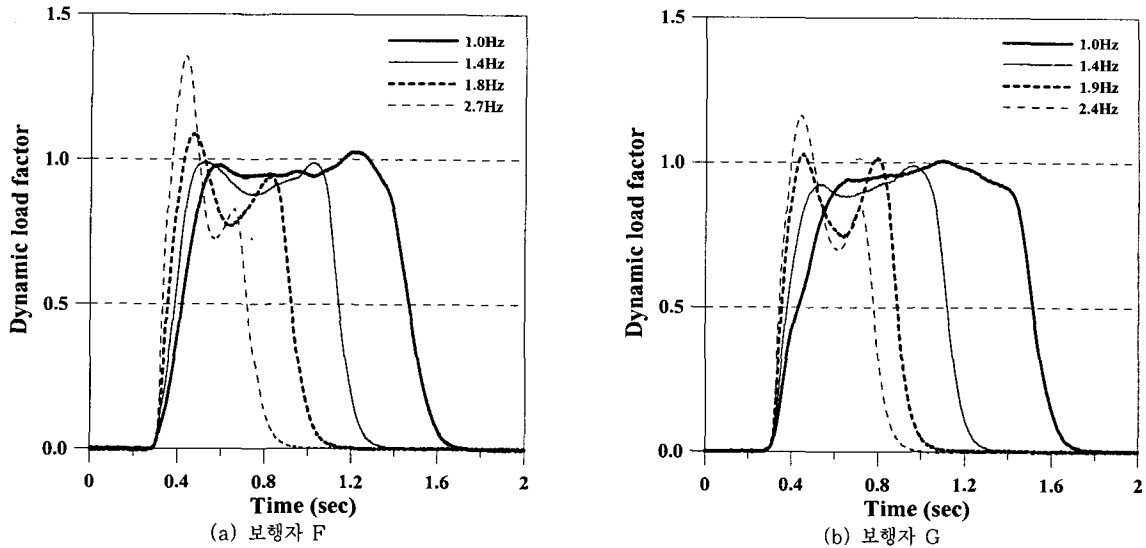


그림 3 보행속도에 따른 하중-시간이력

에서 볼 수 있듯이 보행속도에 따라서 보행하중-시간이력이 매우 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 보행속도는 보행하중에 대한 중요한 매개변수가 되는 것으로 판단된다.

2.2.3 바닥판 표면조건

바닥판 표면조건에 따른 보행하중의 변화를 분석하기 위하여 일상생활에 사용되는 카펫을 플레이트에 설치

하고 보행하중-시간이력을 계측하였다.

그림 4는 구두를 신은 보행자를 대상으로 바닥표면 조건에 따른 하중-시간이력을 오른발과 왼발에 대하여 동시에 나타낸 것이다. 카펫의 유무에 따라서 보행하중이 약 $\pm 3\%$ 차이가 난다. 이 차이는 보행속도에 의한 차이와 비교하여 볼 때 아주 미소하다 할 수 있다. 따라서 바닥판 표면조건은 보행하중에 대한 주요 매개변수가 되지 못한 것으로 판단된다.

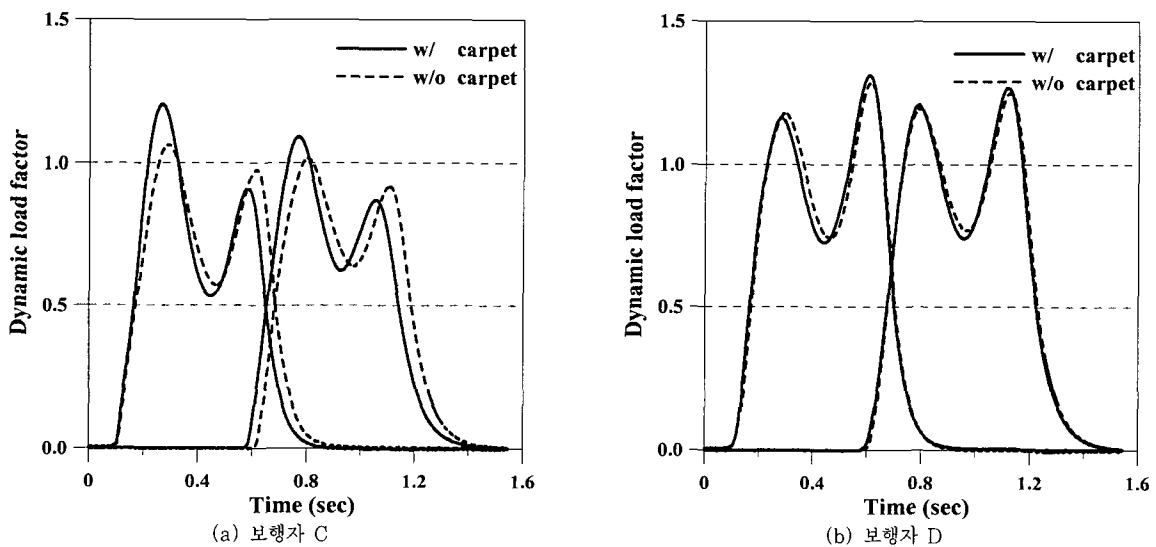


그림 4 바닥판 표면조건에 따른 하중-시간이력

2.2.4 신발조건

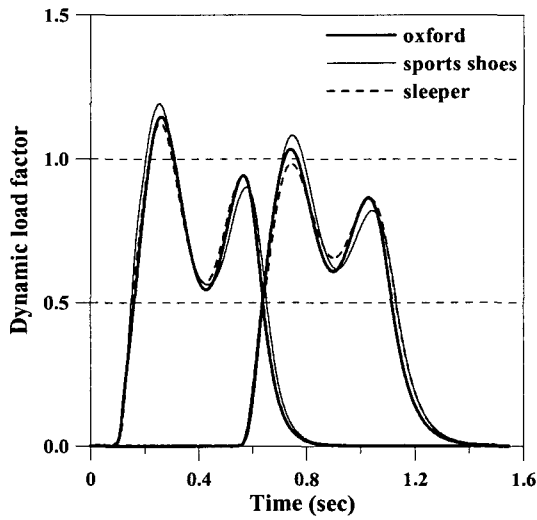
보행하중에 영향을 주는 매개변수 중 보행자의 신발 조건을 들 수 있다. 본 실험에서는 신발조건에 따른 보행하중의 양상을 분석하기 위해 구두, 운동화, 슬리퍼 각각의 경우에 대해서 보행하중-시간이력을 계측하였다.

신발이 부드러울수록 동적하중이 작게 나올 것으로 예측하였으나 그림 5와 같이 신발조건에 따른 보행하중-시간이력을 살펴보면 신발의 종류에 관계없이 보행

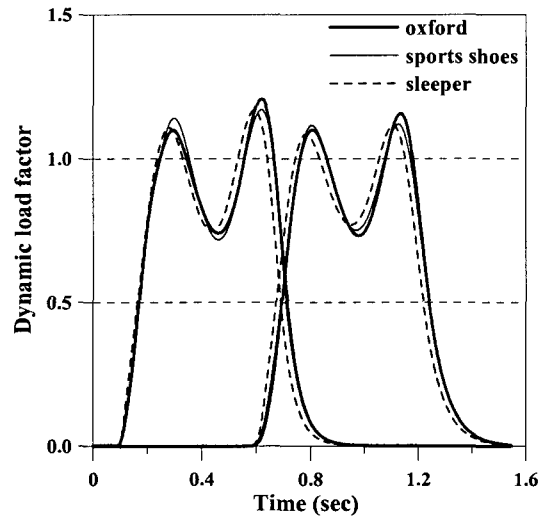
속도가 같으면 보행하중-시간이력의 양상이 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 신발의 종류는 보행하중에 대한 주요 매개변수가 되지 못하는 것으로 판단된다.

2.2.5 보행자세

보행자의 보행습관에 따라서 상체를 앞으로 기울이거나 상체를 뒤로 기울여 걷는 경우가 있다. 보행자세에 따른 보행하중을 분석하기 위하여 상체를 앞이나 뒤

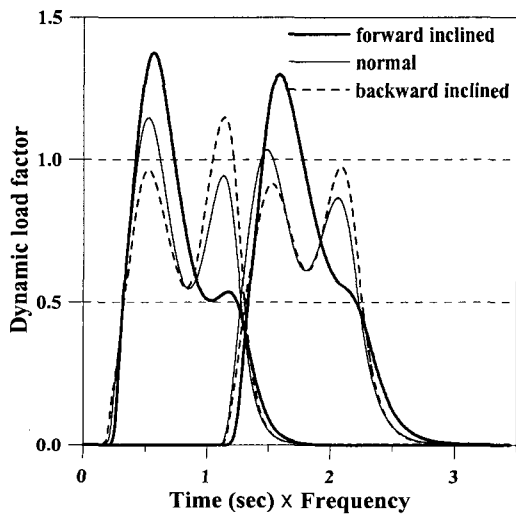


(a) 보행자 E

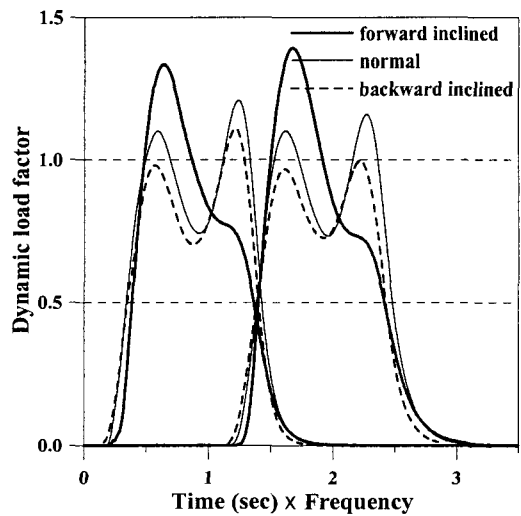


(b) 보행자 D

그림 5 신발종류에 따른 하중-시간이력



(a) 보행자 C



(b) 보행자 F

그림 6 보행자세에 따른 하중-시간이력

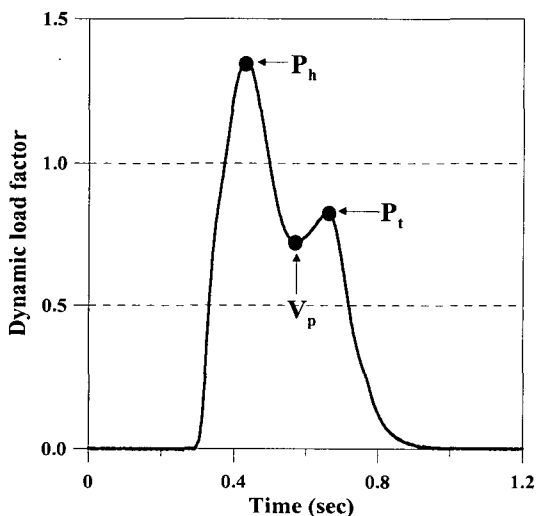
로 기울인 자세와 보통걸음 자세에 의한 보행하중-시간이력을 계측하였다. 보행자세에 따라서 보행속도가 다르게 나타날 수 있다. 따라서 보행자세에 따라 다르게 나타나는 보행주기를 같은 시간영역으로 표현하기 위하여 그림 6과 같이 시간에 보행진동수를 곱하여 보행하중-시간이력을 나타내었다.

두 개의 정점 값 중에서 발뒤꿈치에 의한 하중 값이 뒤로 기울인 자세에서는 작게 나타나고 앞으로 기울인 자세에서는 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 보행 속도에 의한 하중양상과 유사한 것으로 상체를 앞으로 기울이면 보행속도가 빨라진다. 따라서 보행자세는 하중의 양상에 영향을 주는 주요 매개변수라고 할 수 있다.

앞에서 분석한 결과를 바탕으로 보행하중에 가장 크게 영향을 주는 변수는 보행속도와 보행자세임을 알 수 있다. 그러나 상체를 앞이나 뒤로 기울여 걷는 자세는 보행속도와 관련되어 있으며 특별한 경우에 나타나는 보행자세이므로 일반적인 매개변수가 될 수 없을 것으로 판단된다.

2.3 보행속도에 따른 동적하중계수

보행하중은 일반적으로 발뒤꿈치의 바닥판 접촉(heel impact)에 의해서 나타나는 정점(P_h)과 발가락의 바닥판 접촉(toe-lift up)에 의해서 정점(P_t)가 나타나며 보행속도에 따라 P_h 와 P_t 값이 변하게 된다.



(a) 보행하중의 형상

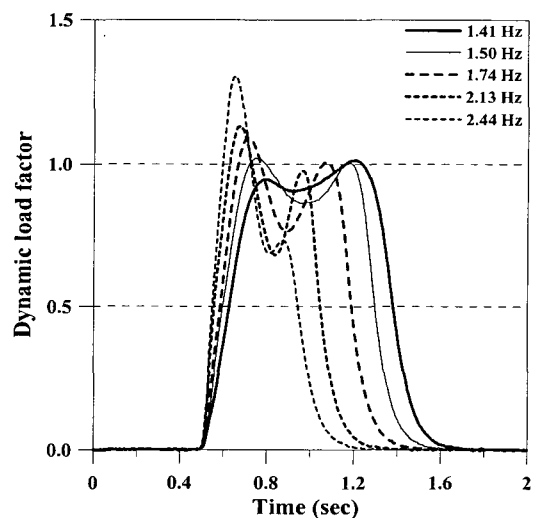
보행속도에 따른 P_h 의 변화양상은 그림 8(a)과 같이 보행속도가 증가할수록 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 8(b)와 그림 8(c)에서 V_p 와 P_t 의 동적하중계수가 보행속도에 반비례하여 그 크기가 줄어드는 경향을 보이고 있다. P_t 의 변화양상은 보행속도에 대하여 일관성이 약간 부족하지만 P_h 와 V_p 의 동적하중계수는 보행속도에 대하여 일관성 있는 기울기를 가지고 있다. 두 정점과 V_p 의 동적하중계수가 보행속도에 대하여 어느 정도 일관성 있는 기울기를 가지고 있으므로 일정한 함수로 표현이 가능하다. 이러한 관계식을 이용하여 임의의 보행속도에서 P_h 와 P_t 그리고 V_p 값을 구할 수 있으므로 보행속도에 따른 보행하중의 크기를 대략적으로 평가 할 수 있다.

3. 보행하중의 분해

보행하중과 같이 사람의 움직임에 의하여 발생하는 동적하중은 주기하중으로 생각할 수 있으며 보행하중은 보행진동수에 대한 조화하중으로 분해할 수 있다. 본 연구에서는 푸리에 변환을 이용하여 계측 보행하중을 분해하였다.

3.1 하중분해기법

동적하중을 분해하는 방법에는 여러 가지가 있으나



(b) 보행속도별 보행하중의 형상

그림 7 보행진동수에 따른 보행하중의 형상

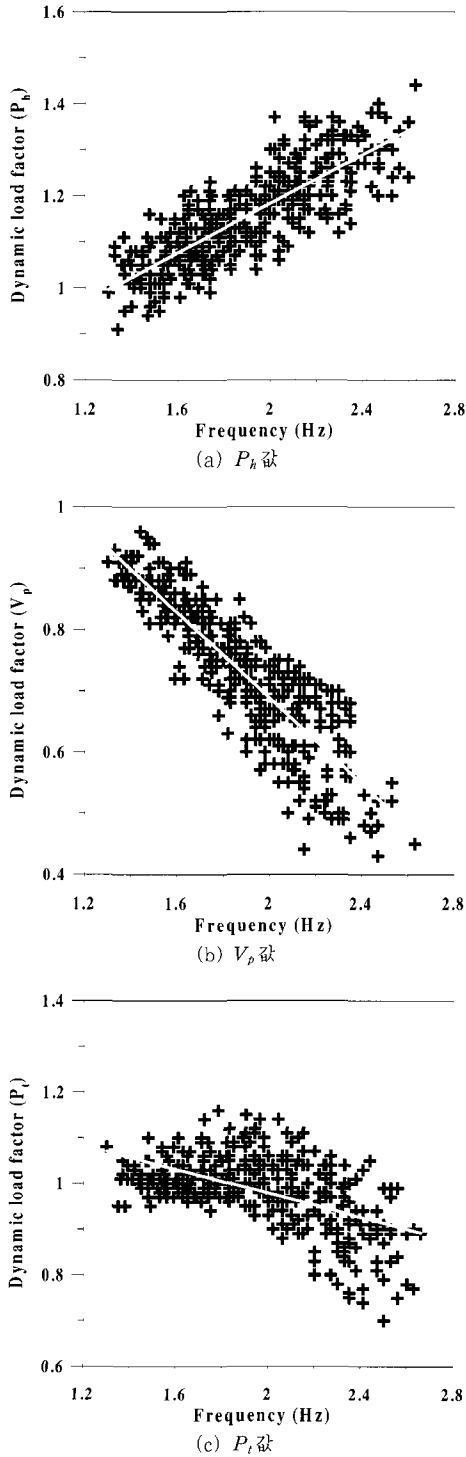


그림 8 보행속도에 따른 P_h , V_p , P_t 값의 변화

본 논문에서는 가장 일반적인 방법인 푸리에 변환을 이용하여 계측 보행하중을 분해하였다. 계측한 보행하중-시간이력의 데이터를 가지고 조화성분별로 적분하여 식(1), 식(2), 식(3)과 같이 조화하중 계수를 구한다.

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

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

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

여기서 n 은 구하고자 하는 조화성분의 차수이며 $F(t)$ 는 계측된 보행하중이다. 위에서 구한 각각의 값을 식(4)에 대입하면 각각의 조화성분별 동적하중을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_n(t) &= a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) + b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t\right) \\ &= A_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n\right) \end{aligned} \quad (4)$$

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

여기서 A_n 은 조화성분의 진폭이며 φ_n 는 위상각이 된다.

분해된 각각의 조화성분별 동적하중을 식(5)를 이용하여 차수별로 다시 조합하면 계측한 본래의 하중과 비교가 가능하다.

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

3.2 조화하중의 분석

보행하중은 보행진동수의 정수배에 해당하는 여러 개의 조화하중으로 분해할 수 있다. 본 연구에서는 계측한 보행하중을 10차 조화하중까지 분해하였다. 그림 9(a)는 조화성분별 동적하중을 나타낸 것이다. 그림 9(b)는 조화하중의 진폭을 나타낸 것으로 10차 이후의 조화하중은 진폭이 상대적으로 작으므로 전체적인 하중-시간이력에 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

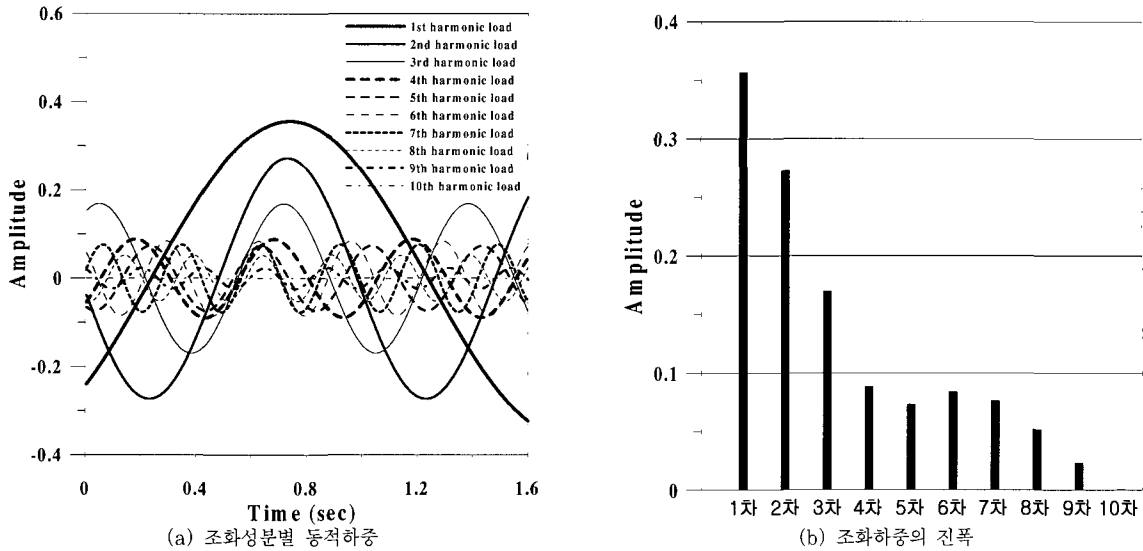


그림 9 조화성분별 동적하중과 진폭

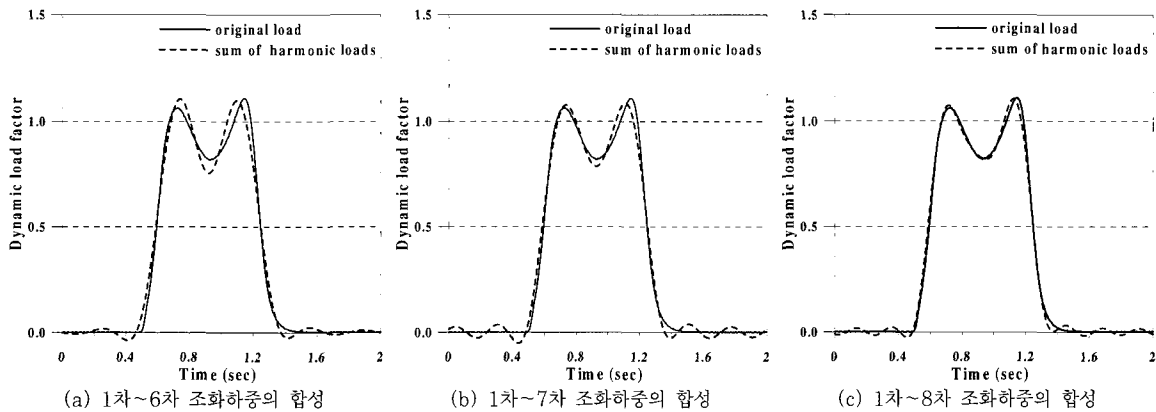


그림 10 차수별 조화하중 성분의 합성

분해한 조화하중 성분을 각각 단계별로 다시 합성하여 계측한 본래의 하중과 비교 분석하였다. 그림 10은 1차 조화하중 성분부터 6차, 7차, 8차 조화하중 성분까지 합성한 것이다. 그림 10(a), (b)와 같이 6차, 7차 조화하중까지의 합성은 원래의 하중성분과 약간의 차이가 나타나고 있으나 그림 10(c)과 같이 8차 조화하중까지 합성하여 만든 동적하중은 계측한 본래의 보행하중과 거의 차이가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이는 조화하중으로의 변환을 통해 구한 조화하중 성분의 진폭과 관련된 것으로 8차 조화하중 성분까지 합성하면 본래의 보행하중을 충분히 표현할 수 있음을 의미한다.

4. 보행하중의 모형화

계측한 보행하중은 조화하중으로 분해가 가능하며 이러한 조화하중은 보행진동수에 따라서 일정한 함수 관계를 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 관계식을 가지고 보행진동수에 따른 보행하중을 모형화 하였다.

4.1 조화하중 관계식

그림 11과 그림 12는 조화하중 변환으로 구한 계수 a_n 과 b_n 의 진동수별 분포를 나타낸 것이다. 조화하중 계수는 식 (1), 식(2) 그리고 식(3)을 이용하여 구한

것이다. 조화하중 계수 a_n 과 b_n 은 9차 이후의 조화성분에서 보행진동수에 따라서 이산하여 나타나므로 일정한 함수관계를 파악하기가 곤란하고 3장에서 언급한 바와 같이 8차 조화성분까지 합성하면 본래의 보행하

중과 유사하게 나타나므로 9차 이후의 조화성분은 보행하중의 모형화에서 제외하였다. 그림 11과 그림 12에서 나타낸 조화하중 계수와 보행진동수와의 관계를 함수식으로 표현해보면 표 2와 같다. 조화성분의

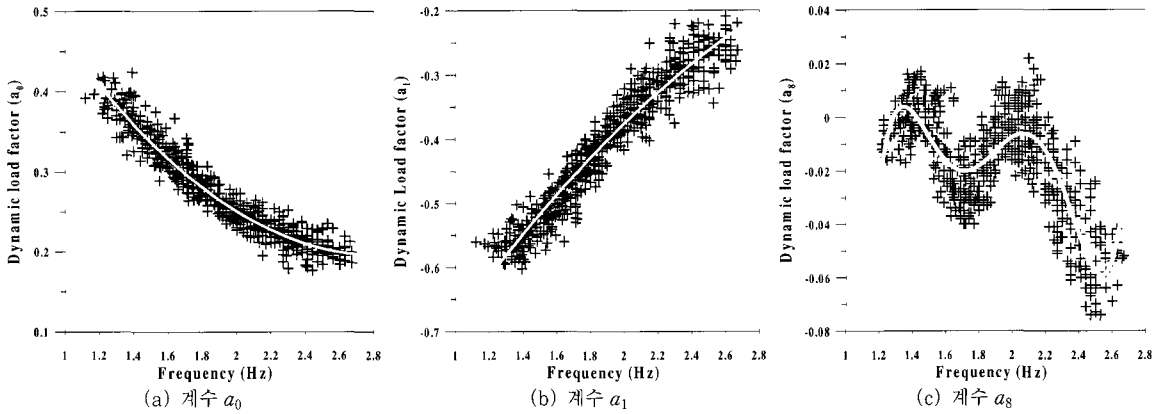


그림 11 a_n 의 진동수별 분포

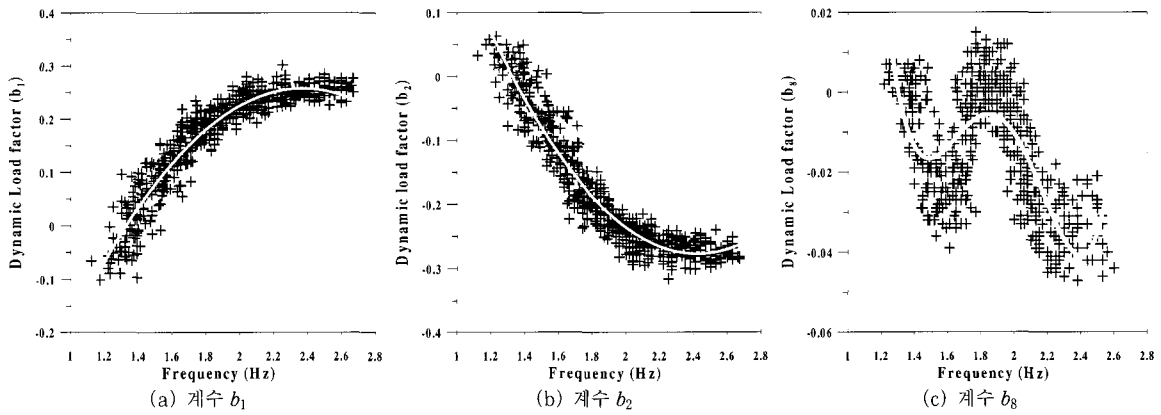


그림 12 b_n 의 진동수별 분포

표 2 보행진동수에 대한 a_n , b_n 의 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	0.000	0.000	0.000	0.078	-0.447	0.831	-	-	-	-	-	-	
a_1	0.000	0.000	0.000	-0.054	0.469	-1.100	b_1	0.000	0.000	0.000	-0.237	1.121	-1.071
a_2	0.000	0.000	0.283	-1.797	3.510	-1.970	b_2	0.000	0.000	0.000	0.232	-1.122	1.081
a_3	0.000	0.000	-0.171	1.248	-2.793	1.999	b_3	0.000	0.000	0.000	-0.073	0.402	-0.444
a_4	0.000	0.000	-0.093	0.301	-0.025	-0.411	b_4	0.000	0.000	0.506	-3.043	5.960	-3.725
a_5	0.000	-0.788	6.449	-19.252	24.695	-11.461	b_5	0.000	0.000	-0.361	2.298	-4.718	3.052
a_6	0.000	0.566	-4.722	14.354	-18.770	8.936	b_6	0.000	0.000	0.252	-1.629	3.332	-2.164
a_7	0.000	-0.320	2.712	-8.374	11.154	-5.428	b_7	0.000	-0.684	5.130	-14.114	16.923	-7.454
a_8	1.084	-10.399	39.197	-72.556	65.926	-23.524	b_8	0.000	0.491	-3.756	10.571	-12.978	5.859

차수가 낮을 경우 분포형태가 저차 함수형태를 보이지만 조화성분의 차수가 높아질수록 고차함수의 형태로 나타내고 있으며 이러한 현상은 구조물의 응답에 영향을 주게 된다. 표 2의 함수관계를 이용하여 임의의 보행 진동수를 가지는 보행하중을 모형화할 수 있다.

4.2 보행하중의 모형화

보행진동수에 대한 조화하중의 함수관계식을 이용하여 만든 보행하중의 타당성을 검토하기 위하여 1.3Hz 부터 2.4Hz까지 다양한 보행하중을 생성하고 이들을 계측 보행하중과 비교하였다.

그림 13은 모형화된 보행하중과 계측된 보행하중의 보행진동수에 따른 하중-시간이력의 변화 양상을 나타낸 것이다. 계측된 보행하중의 경우 보행진동수가 증가할수록 P_h 값이 증가를 하며 P_t 와 valley point 값은 감소하게 되는데 이는 모형화된 보행하중의 경우에도 있어서도 같은 양상을 보이고 있다.

그림 14는 진동수가 1.4Hz, 1.8Hz, 2.1Hz, 2.4Hz인 모형화 보행하중의 하중-시간이력과 계측 보행하중의 하중-시간이력을 비교한 것이다. 느린걸음인 1.4Hz에서는 전체적인 분포는 비슷하나 모형화된 하중의 경우 P_h , P_t , valley point 값이 명확하게 나타나고 있다. 보통걸음인 1.8Hz와 빠른걸음인 2.1Hz인 경우에는 전체적인 양상과 P_h , P_t , valley point 값이 유사하게

나타난다. 매우 빠른걸음인 2.4Hz의 경우에는 모형화 보행하중과 계측 보행하중의 P_h , P_t , valley point 값이 다소 차이가 나게 되는데 이는 보행속도가 빨라질수록 크게 나타나는 충격효과를 보행하중의 모형화 과정에서 제대로 표현하지 못하기 때문이다. 모형화된 보행하중이 가지는 공통적인 특징은 하중의 시작부근과 종료부근에서 조화하중 성분이 나타난다는 것이다. 이는 앞에서 언급한 9차 이후의 조화하중성분을 고려하지 않아 나타나는 것이다. 9차 이후의 조화하중성분을 고려하지 않고 진동해석을 수행할 경우 진동응답의 전체적인 양상에는 영향을 미치지 않으나 하중이 가해지는 시작부근과 종료부근에서 응답이 약간 다르게 나올 수 있다.

5. 예제 구조물의 진동해석

5.1 예제 구조물

보행하중을 받는 바닥판 구조물의 진동해석을 위한 예제 구조물은 그림 15(a)와 같이 길이 1,200cm, 폭 1,200cm, 높이 800cm의 2×2경간 2층 구조물로 바닥판 두께는 18cm로 하였다. 구조부재의 재질은 콘크리트이며 부재단면의 크기는 표 3과 같다. 몸무게 70kgf의 보행자가 그림 15(b)와 같이 예제 구조물의 2층을 가로질러 보행할 때 발생하는 동적하중을 적용하였다.

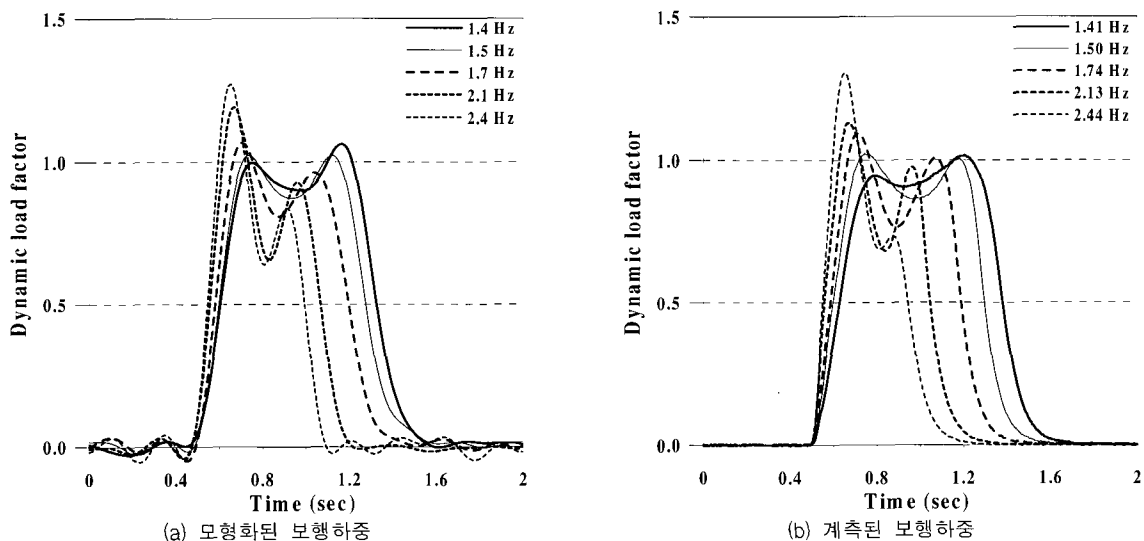


그림 13 모형화 보행하중과 계측 보행하중

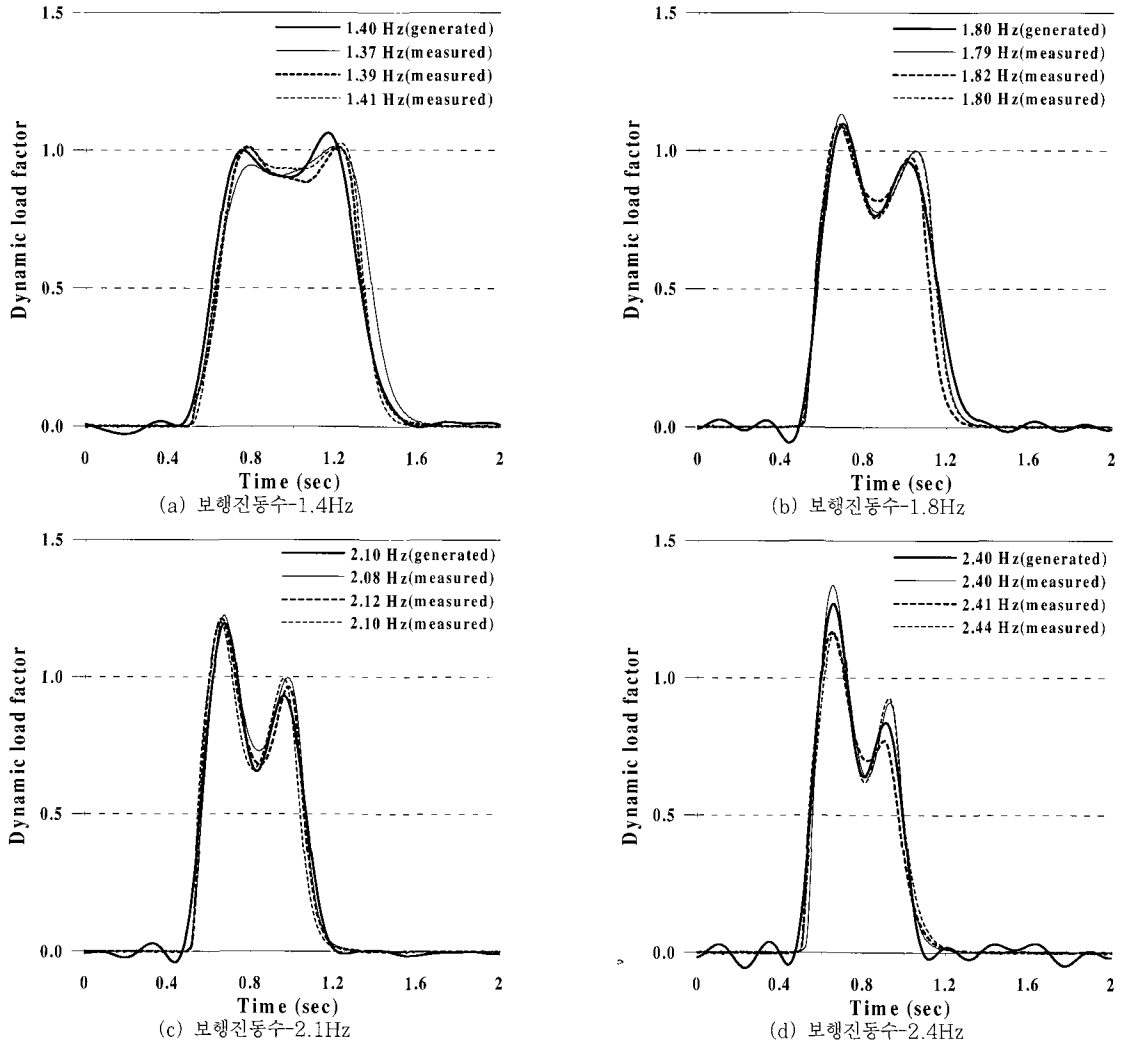
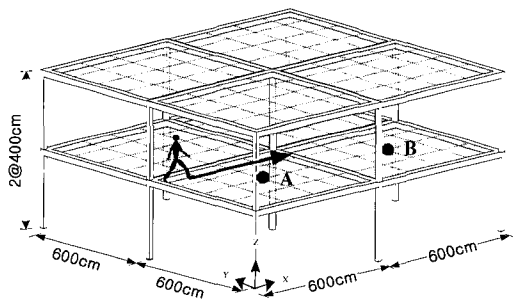
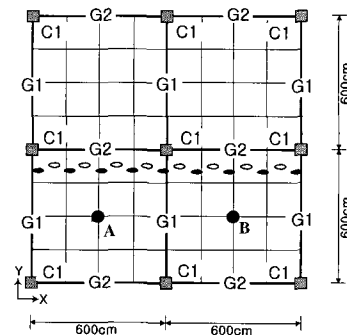


그림 14 보행진동수에 따른 모형화된 보행하중과 계측된 보행하중



(a) 예제 구조물



(b) 예제 구조물의 2층 평면

그림 15 예제구조물

표 3 예제 구조물의 부재단면

부재명		단면크기(cm)
기둥	C1	40×40
보	G1	40×60
	G2	40×60

5.2 보행하중의 적용방법

구조물에 보행하중을 적용하는 일반적인 방법은 그림 16(a)와 같이 보폭만큼 절점을 생성시켜 시간지연을 가지는 절점하중의 형태로 가하는 것이다. 이러한 모델은 보폭이 변할 경우 구조물을 다시 모형화해야 하며 또한 절점 수가 많아지므로 해석시간이 많이 소요된다. 그림 16(b)와 같이 절점 이외에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하여 적용할 경우 보폭에 관계없이 구조물을 모형화할 수 있으며 절점 수를 줄임으로 해석시간을 줄일 수 있다.

판요소내 임의의 위치에 하중이 작용하는 경우 그림 16(c)에서와 같이 MZC요소를 사용하여 절점당 하나의 연직하중과 두 방향의 모멘트 하중으로 치환을 하였다. 본 논문에서는 등가의 보행하중을 적용하여 예제 구조물의 진동해석을 수행하였다.^{5),6)}

예제 구조물에는 몸무게 70kg인 보행자가 1.4Hz, 1.8Hz, 2.1Hz, 2.4Hz로 각각 보행할 때 야기되는 모형화된 보행하중과 계측된 보행하중을 적용하였다. 모형화 보행하중은 제안된 하중식을 이용하여 생성하였으며 모형화 보행하중과 같은 보행속도를 가지는 계측보행하중을 해석에 적용하였다. 그림 17은 진동해석에 사용된 4가지 보행속도에 대한 모형화 보행하중과 계측 보행하중을 나타낸 것으로 모형화된 보행하중과 계측 보행하중의 미소한 차이를 볼 수 있다.

5.3 예제 구조물의 진동해석

몸무게 70kg의 보행자가 그림 15와 같이 2층 바닥판 구조물의 중앙을 다양한 보행속도로 가로질러 보행할 때 야기되는 보행하중을 모형화하여 진동해석에 적용하였다. 요소 분할은 그림 15(b)에서와 같이 8×8로 하였으며 모드중첩법을 사용하여 동적해석을 수행하였다. 동적해석시 고차모드의 영향을 알아보기위해 모든 자유도에 대해 full mode를 고려하였다. 그림 18은 A점과 B점에서의 보행속도별 변위응답을 나타낸 것이다. 변위응답의 양상이 전체적으로 유사하나 보행속도가 빠를수록 충격하중 효과가 커지므로 변위응답이 약간 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그림 19는 1.8Hz의 보행속도에 대하여 모형화된 보행하중과 계측된 보행하중을 적용하여 구한 예제 구조물의 A점과 B점의 변위응답을 나타낸 것이다. 모형화된 보행하중의 변위응답보다 계측된 보행하중의 변위응답 진폭이 약간 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 계측된 보행하중의 경우 모든 조화하중 성분이 포함되어있지만 모형화된 보행하중의 경우 8차 조화하중 성분까지 조합하여 적용하였기 때문이다. 그러나 변위응답의 전체적인 양상은 매우 유사하다. 그림 20은 변위응답을 FFT(Fast Fourier Transformation)한 것으로 하중진동수의 정수배에서 진폭이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 3장에서 언급한 바와 같이 9차 이후의 조화하중 성분이 매우 미비하게 나타나므로 변위응답을 FFT한 것에도 9차 이후의 성분이 상대적으로 매우 미비하게 나타나고 있다. 모형화 보행하중에 의한 변위응답은 9차 이후의 조화하중 성분을 포함하고 있지 않기 때문에 9차 이상의 고차진동수 성분에서 진폭이 거의 나타나지 않고 있다.

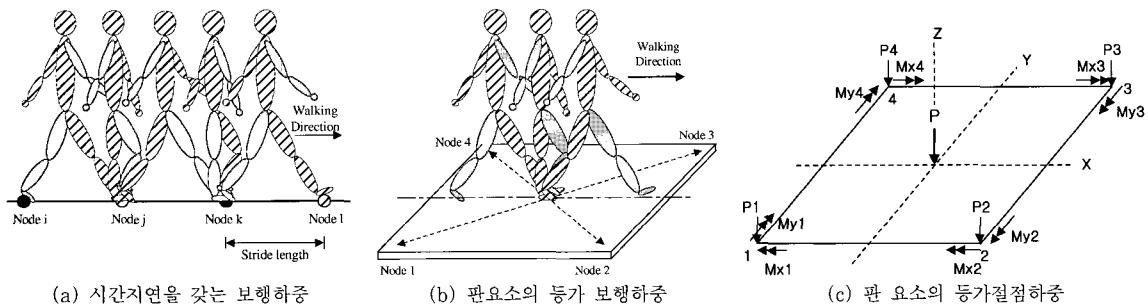


그림 16 등가 보행하중의 적용

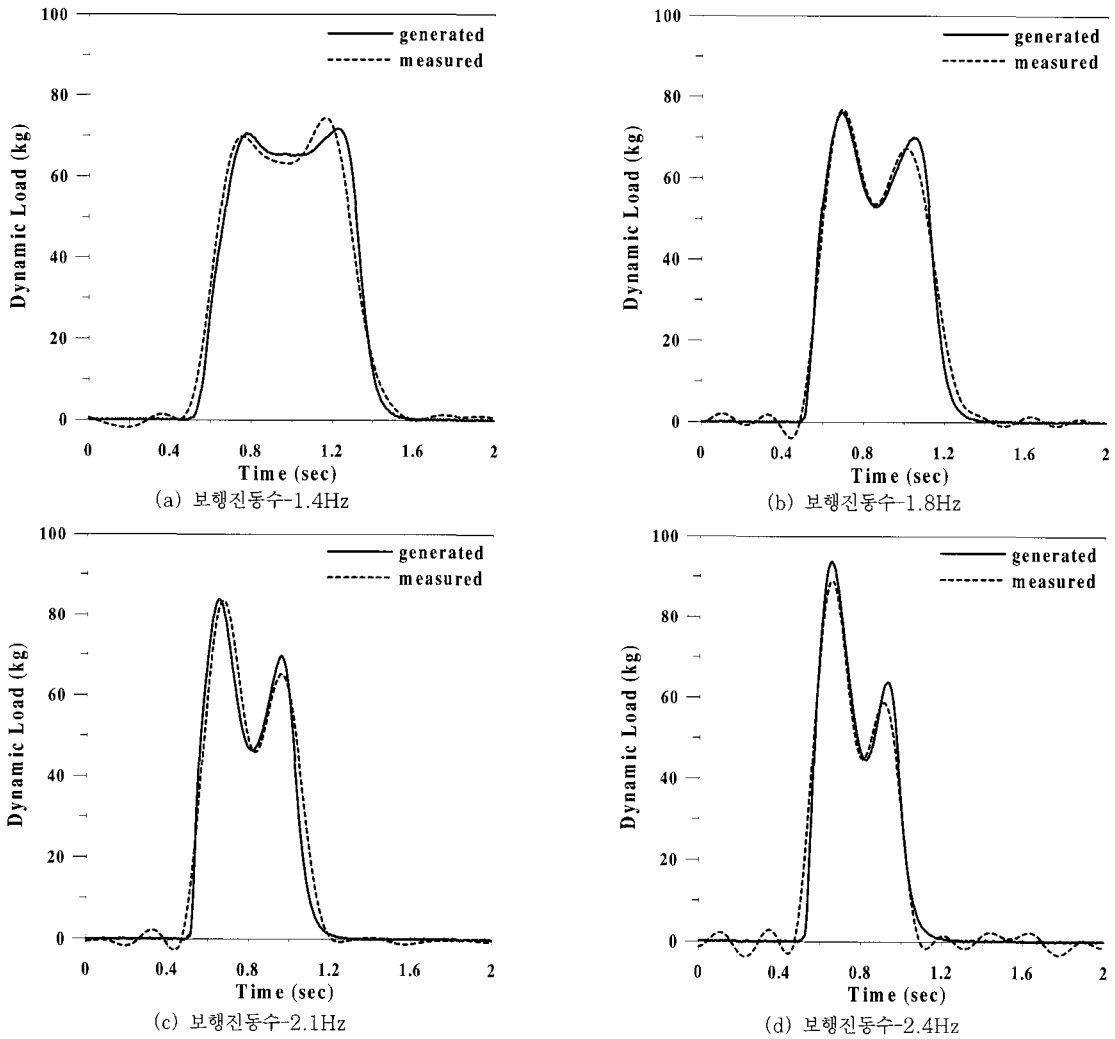


그림 17 해석에 적용된 보행하중

보행하중을 실제로 계측하기 위해서는 여러 가지 장비가 필요하며 다양한 매개변수에 의해서 영향을 받는 보행하중을 계측하기가 어렵기 때문에 보행하중을 받는 구조물의 진동해석에 실제 계측한 보행하중을 적용하기가 쉽지 않다. 그림 19와 그림 20에서 볼 수 있듯이 모형화 보행하중을 적용하여도 실제 계측한 보행하중을 적용하여 구한 예제 구조물의 응답과 유사한 응답을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 보행하중식을 이용하면 보행하중을 받는 구조물의 진동해석에 있어서 보행진동수에 따라 다르게 나타나는 보행하중의 적용이 가능하다.

6. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 바닥판의 일반적인 진동원 중의 하나인 보행하중을 직접 계측하여 보행하중에 영향을 주는 주요 매개변수들에 대하여 분석을 실시하였다. 그리고 계측한 보행하중을 조화하중으로 분해 및 합성하여 보행진동수에 따른 보행하중의 모형화 방법을 제안하였다. 계측 보행하중과 모형화 보행하중을 예제 구조물의 진동해석에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 보행하중에 영향을 주는 매개변수로는 신발,

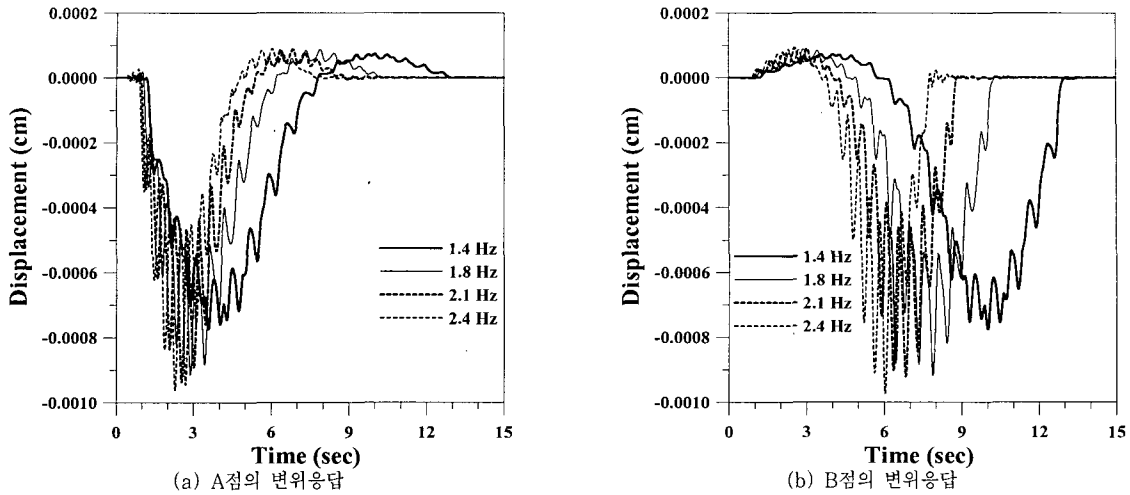


그림 18 보행속도별 모형화된 보행하중의 변위응답

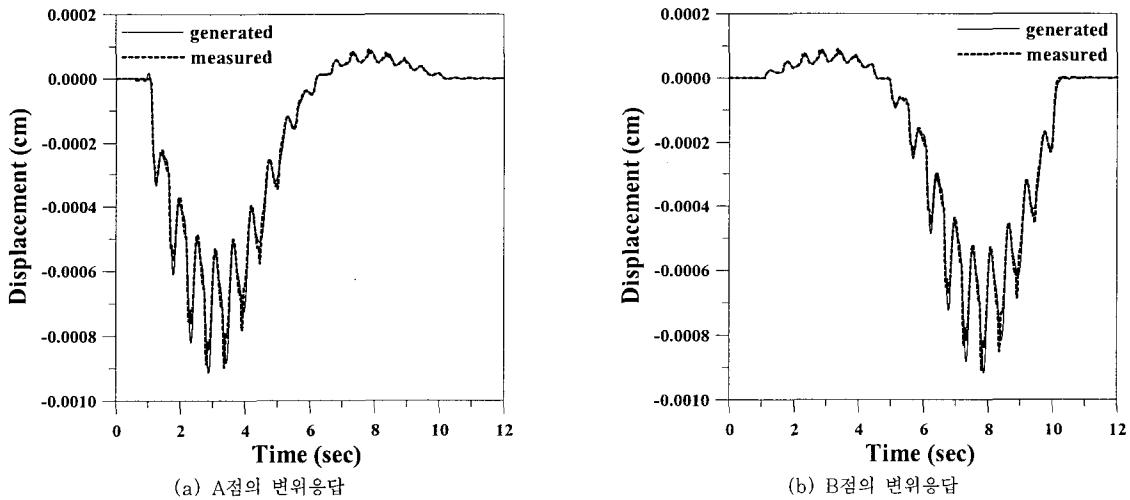


그림 19 보행하중이 가해지는 예제 구조물의 변위응답

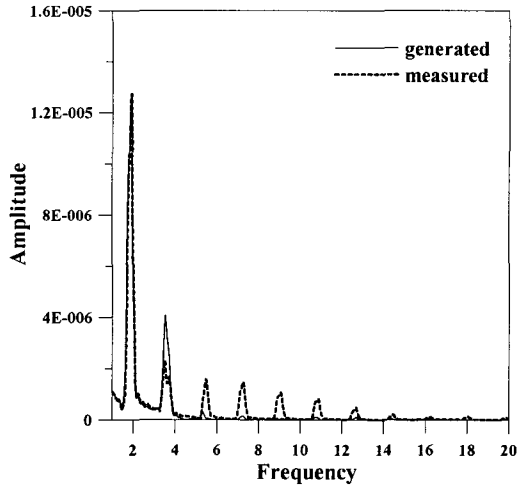
바닥조건, 오른발/왼발, 보행속도 등이 있으며 이러한 매개변수 중에서 보행속도가 보행하중의 크기와 하중-시간이력 양상에 가장 큰 영향을 준다.

둘째, 계측한 보행하중을 푸리에 변환을 이용하여 다양한 조화 하중성분으로 분해할 수 있으며 9차 이후의 조화하중 성분은 8차까지의 조화하중 성분에 비하여 상대적으로 작기 때문에 전체적인 보행하중-시간이력에 미치는 영향이 매우 미비하다.

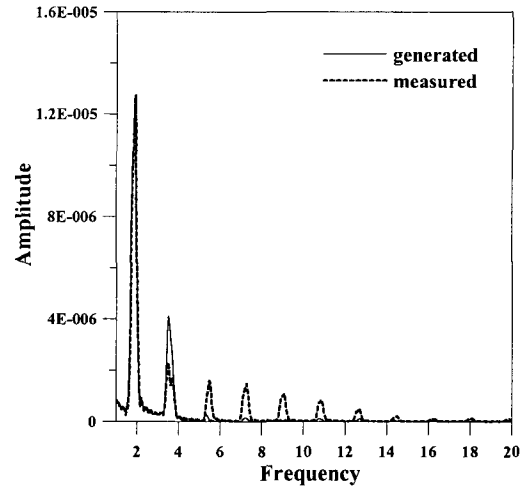
셋째, 각각의 조화하중 성분은 보행진동수에 대하여 일정한 함수관계를 가지므로 보행진동수에 따른 보행

하중의 모형화가 가능하다. 본 논문에서 제안한 보행하중식을 이용하면 보행진동수에 따라 다양하게 나타나는 보행하중을 진동해석에 용이하게 적용할 수 있다.

추후 연구과제로는 실제 구조물의 계측응답과 제안된 하중식을 적용한 구조물의 해석응답을 비교 분석하여 제안된 하중식의 검증이 필요하다. 그리고 사람의 움직임으로 야기되는 동적하중을 실제 구조물의 진동해석에서 손쉽게 적용할 수 있게 다양한 동적 하중식을 제안하는 것이 필요하리라 생각된다.



(a) A점 변위응답의 FFT



(b) B점 변위응답의 FFT

그림 20 보행하중이 가해지는 예제 구조물 변위응답의 FFT

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Bachmann, H. and Ammann, W., *Vibrations in Structures*, Structural Engineering Documents, 1987
2. Kerr, S. C. and Bishop, N. W. M., "Human Induced Loading on Flexible Staircases", *Engineering Structures*, No.23, 2001, pp. 37~45

3. 김기철, 이동근, "바닥판의 보행하중에 대한 실험적 연구," 한국 전산구조공학회 추계 학술발표회 논문집, 2000, pp.273~280
4. 최균효, 김기철, 이동근, "로드셀을 이용하여 계측한 보행하중의 분석," 대한건축학회 춘계 학술발표회 논문집, 2001, pp.219~222
5. Lee, D. G. and Kim, G. C., Modeling of Moving Loads or Analysis of Floor Vibration, *Proceedings of APCS 2000 conference*, 2000, pp.869~879
6. 김기철, 이동근, "보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제1호, 2001