

보행하중을 받는 구조물의 효율적인 진동해석 Efficient Vibration Analysis of the Structures Subjected to Walking Loads

김 기 철*
Kim, Gee-Cheol

이 동 근**
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Structures with a long span have a higher possibility of experiencing excessive 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.

1. 서론

현대 건축물의 구조시스템은 고층화, 대 공간화 되어감에 따라 고강도 재료와 강재의 사용이 증가하면서 부재의 크기가 작아지고 있으며 칸막이 벽과 같은 비구조재의 사용이 감소함으로써 감소효과가 크게 줄어들고 있다. 주차장, 버스터미널, 스타디움, 집회공간과 같이 낮은 고유진동수를 갖는 장경간 건축물에서는 저속 차량의 이동하중이나 보행자의 보행하중과 같은 동적하중에 의해 과도한 진동의 발생할 수 있으며 이러한 진동은 건축물의 이용자에게 불쾌감을 일으켜 건축물의 사용성에 심각한 영향을 주게된다.

이동하중을 받는 골조구조물의 진동해석⁶⁾과 차량이나 열차의 운행에 의한 인접구조물의 동적해석에 대한 많은 연구가 있었으나 보행하중에 대한 연구는 미비한 실정이다. 구조물에 가해지는 보행하중의 일반적인 적용 방법은 분할된 요소의 절점을 따라 절점하중으로 가하는 것이다. 그러나 이러한 해석모델은 보행하중을 절점에만 가해야하는 제한적인 문제점을 가지고 있어 보폭 수만㎝ 절점을 생성시켜야 하며 보폭이 변하거나 절점 이외에 하중이 작용할 경우 해석모델을 수정해야하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 보행하중에 대한 계측과 분석을 통하여 보행하중의 동적특성을 분석하였으며 계측한 보행하중을 예제구조물에 적용하였다. 그리고 보행하중에 의한 구조물의 진동해석을 위하여 구조물에 가해지는 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환하는 방법을 제안하였으며 제안된 등가의 절점하중을 이용하여 구조물의 진동해석을 수행하였다.

* 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정

** 정 회 원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 보행하중의 계측 및 분석

보행하중과 같이 사람의 움직임으로 야기되는 동적하중에 대한 많은 연구가 있었으나^{1),2),3)} 본 연구에서는 사람의 움직임으로 야기되는 동적하중 중에서 가장 일반적인 보행하중을 로드셀(load cell)을 이용하여 직접 계측하고 분석하였다.

2.1 보행하중의 계측

보행하중에 대한 기존의 많은 연구에서 보행하중의 주요 매개변수인 보행속도, 몸무게, 성별, 바닥 조건 등에 대한 평가와 분석이 있었다. 본 연구에서는 보행하중의 주요 매개 변수 중에 하나인 보행속도에 따른 보행하중을 계측하고 분석하였다.

2.1.1 Platform

하중 계측을 위하여 그림 1과 같이 platform 중앙에 로드셀을 장착하여 보행하중을 직접 계측하였다. Platform의 크기는 길이 5400mm, 너비 900mm로 하였으며, 두께는 24mm로 로드셀의 두께와 같게 하여 보행에 지장이 없도록 제작하였다. Platform을 길게 하여 실험대상자가 로드셀을 밟기 전에 일정한 보폭을 유지할 수 있도록 하였으며 로드셀과 platform을 분리하여 platform의 움직임이 보행하중 계측에 영향이 주지 않도록 하였다.

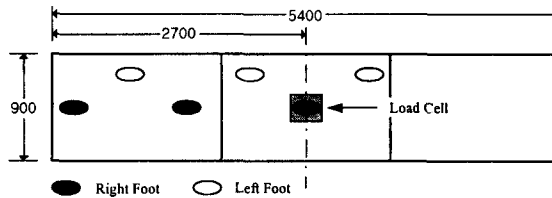


그림 1. 계측 platform

2.1.2 계측장비

직접적인 하중 계측을 위하여 로드셀, 전송기, A/D변환기 등을 사용하였다. 보행하중과 같은 동적하중의 계측에서는 계측 장비의 샘플링 속도와 분해도가 하중 데이터를 수집하는데 중요 요소가 된다. 본 연구에 사용된 A/D변환기는 보행하중 계측에 충분한 분해능력과 샘플링 속도를 가지고 있는 것으로 데이터 분해능력은 12비트이며 초당 최대 200,000개의 데이터를 샘플링 할 수 있다.

2.2 보행하중의 분석

보행속도에 따른 보행하중을 하중-시간 이력으로 계측하여 다음 그림 2와 같이 동적하중계수(동적하중/몸무게)로 나타내었다. 보행에 의한 동적하중은 일반적으로 두 개의 정점(peak)성분을 가지고 있으며 첫 번째 정점은 발의 뒤꿈치(heel)의 충격에 의해 나타나는 성분이며 두 번째 정점은 발가락(toe lift-up)의 바닥판 접촉에 의해 나타나는 성분이다.

느린 걸음에 대한 하중-시간 이력을 살펴보면 동적하중이 몸무게의 근처까지 서서히 증가 몸무게 주위에서 약간 변화가 있다가 점점 줄어들고 있음을 볼 수 있으며 정점부근에서 하중의 변화가 거의 없이 평평한 것을 볼 수 있다. 보통 걸음에 대한 하중-시간 이력은 몸무게보다 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 걸음과 비슷한 양상을 보이지만 하중의 변화가 보통 걸음에 비하여 급속히 변화한다. 빠른

걸음에 의한 동적하중은 최고 값(peak value)과 최저 값(valley value)이 다른 보행하중과 달리 매우 많이 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

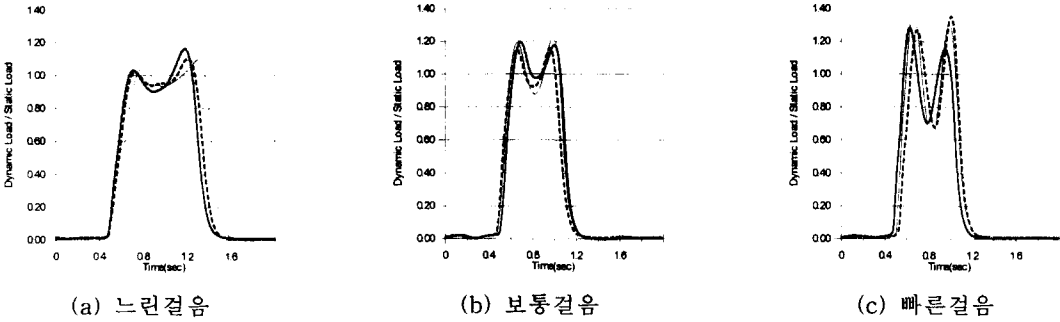


그림 2. 보행속도에 따른 보행하중(하중-시간 이력)

3. 부재하중의 등가절점하중으로 치환

요소 내부에 작용하는 부재하중을 형상함수를 이용하여 등가의 절점하중으로 치환할 경우 요소의 자유도에 따라 등가의 절점하중이 결정된다.

3.1 보 요소 부재하중의 등가절점하중으로 치환

절점당 1개의 연직 자유도와 1개의 회전 자유도를 갖는 보 요소 내부의 임의의 지점에 작용하는 부재하중(P_l)을 요소를 이루는 두 절점 i 와 j 의 연직하중(P_i, P_j)과 모멘트하중(M_i, M_j)으로 치환하면 식 (1)과 같다.

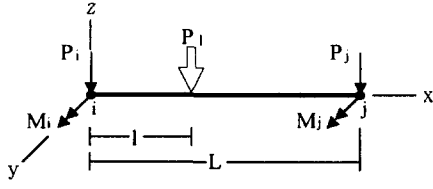


그림 3. 휨 요소의 등가절점하중

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

위 식을 형상함수를 이용하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$M_i = \frac{-P_l l (L-l)^2}{L^2} \tag{2-b}$$

$$P_j = \frac{P_l l^2 (3L-2l)}{L^3} \tag{2-c}$$

$$M_j = \frac{P_l (L-l) l^2}{L^2} \tag{2-d}$$

3.2 MZC사각형 요소 부재하중의 등가 절점하중으로 치환

3.2.1 MZC사각형 요소

본 연구에 사용한 쉘 요소는 평면 응력요소와 판의 휨 요소를 결합하여 사용하였으며 판의 휨 요소는 Melosh, Zienkiewicz와 Cheung에 의하여 개발된 MZC사각형요소를 사용하였다. MZC사각형요소는 절점당 하나의 연직변위와 두 개의 회전변위를 가지고 있으며 절점 i 의 연직변위(w_i), x축 회전변위($-\frac{\partial w_i}{\partial y}$), y축 회전변위($-\frac{\partial w_i}{\partial x}$)를 만족시키는 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 $\xi_0 = \xi_i\xi$, $\eta_0 = \eta_i\eta$ 는 i 절점에서의 ξ , η 를 나타낸다.

3.2.2 등가의 절점하중으로 치환

MZC사각형 요소의 자유도는 각각의 절점에 하나의 연직 자유도와 두 방향의 회전자유도로 고려되기 때문에 판 내부에 작용하는 부재하중을 그림 4와 같이 각각의 절점에 하나의 연직방향 성분과 두 개의 회전방향 성분을 갖는 등가의 절점하중으로 나타낼 수 있다.

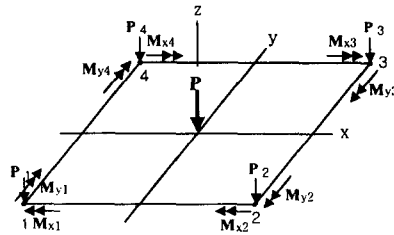


그림 4. MZC 사각형요소의 등가 절점하중

형상함수를 이용하여 요소 내부하중을 식 (4)와 같이 등가의 절점하중으로 치환할 수 있다.

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

여기서 P_i , M_{xi} , M_{yi} 는 각각 절점 i 의 연직하중, x축 모멘트하중, y축 모멘트하중을 의미한다.

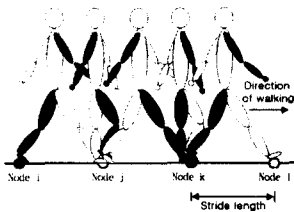
$$P_i = \left\{ \frac{1}{8} (1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(2 + \xi_0 + \eta_0 - \xi^2 - \eta^2) \right\} P \quad (5-a)$$

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

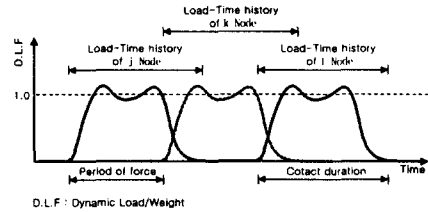
$$M_{yi} = \left\{ \frac{1}{8} a\xi_i(1 - \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \xi_0)^2 \right\} P \quad (5-c)$$

3.4 보행하중의 등가 절점하중으로 치환

일반적으로 구조물에 보행하중을 가하는 방법은 그림 5와 같이 보폭만큼 절점을 생성시켜 시간지연을 갖는 절점하중으로 가한다.⁴⁾ 그러나 이러한 모델은 보폭 수만큼 절점을 생성시켜야 하므로 해석시간이 많이 소요되며 보폭이 변하는 경우 다시 모델링하여야 하는 문제점을 가지고 있다.



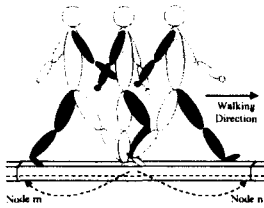
(a) 절점 보행하중



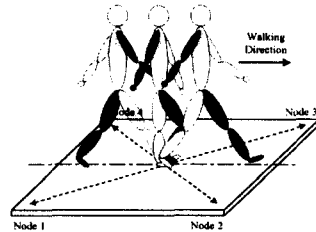
(b) 시간지연을 갖는 보행하중

그림 5. 시간지연 보행하중의 적용

그림 6과 같이 절점이외에 가해지는 보행하중은 요소를 이루는 절점들에 대한 등가의 절점하중으로 치환하여 적용할 경우 보폭에 관계없이 구조물을 모델링할 수 있으며 적절하게 요소수를 줄임으로서 해석시간을 줄일 수 있다.



(a) 보 요소 등가 절점하중



(b) MZC 요소 등가 절점하중

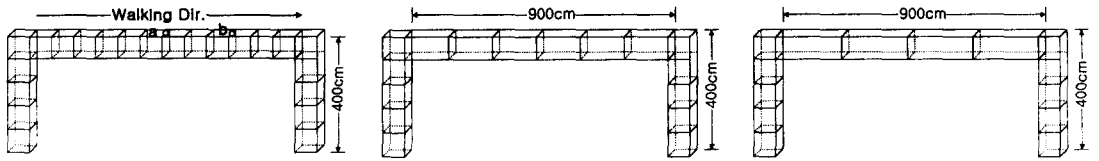
그림 6. 등가 보행하중의 적용

4. 보행하중을 적용한 예제 구조물의 해석

4.1 수치해석을 위한 예제 구조물

4.1.1 골조 구조물

보행하중을 적용하기 위한 골조 구조물은 길이 900cm, 높이 400cm로 구조물의 재질은 콘크리트이다. 보 부재의 단면은 70cm×40cm로 하였다. 예제 구조물의 분할은 그림 7과 같이 보폭수 만큼 분할한 Model B-1(요소수12개), 보폭에 2배로 분할한 Model B-2(요소수6개), 보 전체 길이를 4개로 분할한 Model B-3(요소수4개)로 하였다.

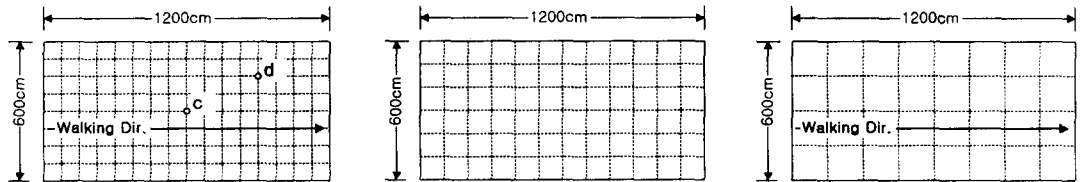


(a) Model B-1 (요소수:12개) (b) Model B-2 (요소수:6개) (c) Model B-3 (요소수:4개)

그림 7. 골조 구조물

4.1.2 Plate 구조물

Plate 예제 구조물은 변장비가 2.0인 1200cm×600cm의 구조물로 두께는 15cm이다. 구조물의 재질은 콘크리트로 하였다. 예제 구조물의 분할은 그림 8과 같이 보폭만큼 절점을 생성시킨 Model P-1(16×08), 1m 간격으로 분할한 Model P-2(12×06), 단변을 4개로 분할한 Model P-3(08×04)로 하였다.

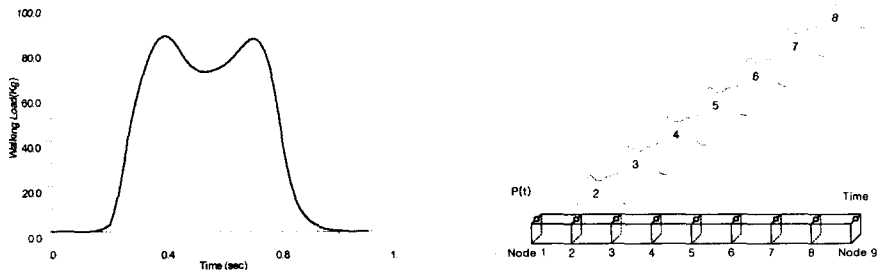


(a) Model P-1 (Mesh:16×08) (b) Model P-2 (Mesh:12×06) (c) Model P-3 (Mesh:08×04)

그림 8. Plate 구조물

4.1.3 보행하중

예제 구조물에 가해지는 보행하중은 몸무게 72Kg, 보폭 75cm인 사람이 1.6Hz의 보통걸음으로 보행할 때의 보행하중을 시간지연을 갖는 절점하중과 등가의 절점하중으로 적용하였다. 그림 9 (a)는 단위보행하중을 나타낸 것이며 그림 9 (b)는 시간 지연을 갖는 절점하중의 가진방법을 나타낸 것이다.



(a) 단위 보행하중

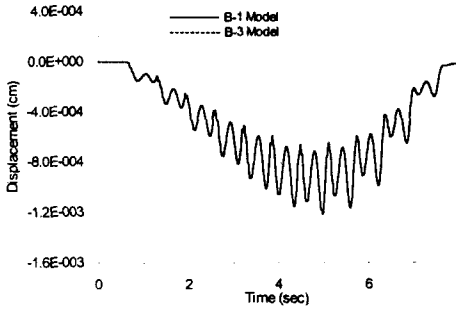
(b) 시간지연을 갖는 절점하중

그림 9. 단위 보행하중과 시간지연 절점하중

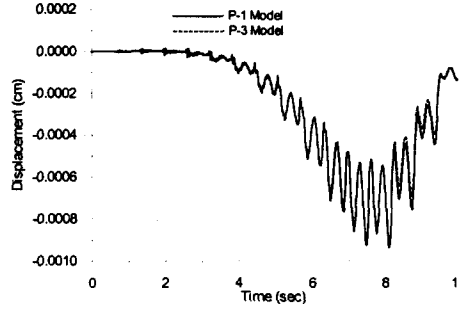
4.2 등가 절점하중에 의한 구조물의 응답

보행하중을 시간지연을 갖는 절점하중과 등가의 절점하중으로 가하여 예제 구조물의 응답을 비교 분석하였다.

시간지연을 갖는 절점하중으로 보행하중을 가한 골조 구조물의 변위응답과 등가의 절점하중으로 보행하중을 가한 골조 구조물의 변위응답이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. Plate 예제 구조물은 분할된 요소의 수에 따라서 고유진동수 같은 동적특성이 약간 다르게 나타나므로 변위응답에 있어서 미소한 차이를 보이고 있다.



(a) 절점 b 변위 응답



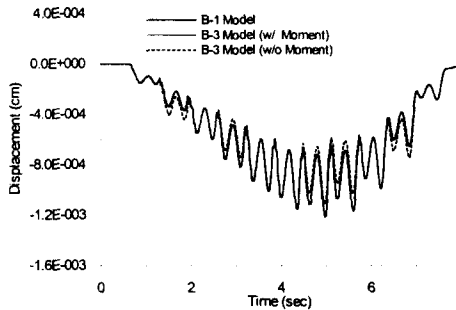
(b) 절점 d 변위 응답

그림 10. 절점하중과 등가의 절점하중에 의한 구조물의 변위 응답

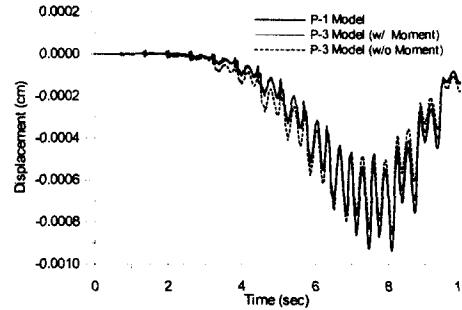
4.3 모멘트하중 고려에 따른 구조물의 응답

보행하중을 회전 자유도를 고려한 등가 절점하중과 회전 자유도를 고려하지 않은 등가 절점하중으로 가하여 예제 구조물의 변위 응답을 비교 분석하였다.

해석결과는 시간지연을 갖는 절점하중을 가한 예제 구조물의 응답이 연직하중만을 고려한 등가 절점하중으로 가한 예제 구조물의 응답과 약간의 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 등가의 절점하중으로 연직하중과 모멘트하중을 치환하여 가한 구조물의 응답은 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 구조물의 변형이 연직자유도뿐만 아니라 회전 자유도의 영향을 받고 있기 때문이다. 따라서 보 요소에 내부에 작용하는 부재하중을 등가의 절점하중으로 치환할 때 연직자유도는 물론 회전자유도를 고려한 등가의 절점하중으로 표현하는 것이 보다 적절하리라 판단된다. 그리고 판 요소 내부에 작용하는 부재하중을 등가의 절점하중으로 치환할 때는 연직자유도와 두 방향의 회전자유도를 고려한 등가의 절점하중으로 나타내는 것이 보다 적절하리라 판단된다.



(a) 절점 b 변위 응답



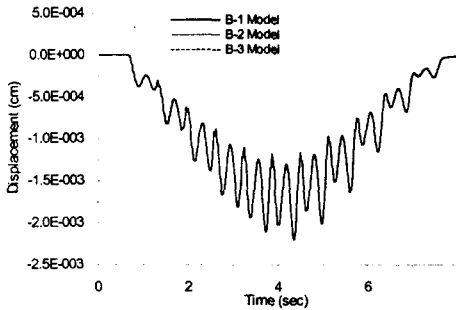
(b) 절점 d 변위 응답

그림 11. 모멘트하중 고려와 비 고려에 의한 구조물의 변위 응답

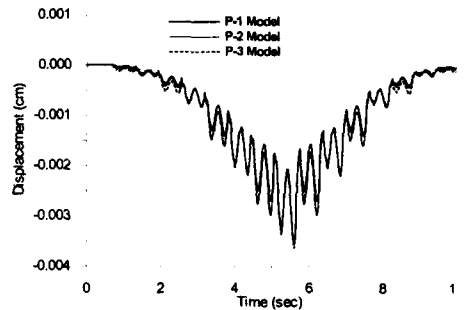
4.4 요소크기에 따른 구조물의 응답

요소의 크기를 달리하는 예제 구조물에 등가의 절점하중으로 치환된 보행하중을 가하여 구조물의 변위 응답을 비교 분석하였다.

보행하중을 연직자유도와 회전자유도를 고려한 등가의 절점하중으로 치환하여 가할 경우 요소의 크기에 관계없이 시간지연 절점하중을 가한 구조물의 응답과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 회전자유도를 고려하지 않은 등가의 절점하중을 가한 예제 구조물의 응답은 분할된 요소의 크기가 클수록 차이가 많이 나는 것을 볼 수 있다. 이는 분할된 요소의 크기가 클수록 등가로 치환되는 모멘트하중이 크기 때문이다.



(a) 절점 a 변위응답



(b) 절점 c 변위응답

그림 12. 요소 크기에 따른 구조물의 변위응답

5. 결론

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

- 1) 보행하중의 최대 값과 최소 값의 차이는 보행속도에 의해서 좌우되며 보행속도가 빠를수록 차이가 크게 난다.
- 2) 보행하중을 받는 구조물의 효율적인 진동해석을 위하여 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환시키는 새로운 적용방법을 제안하였다.
- 3) 보행하중을 등가의 절점하중으로 치환시킬 경우 모멘트하중을 고려하는 것이 보다 적절하리라 판단된다.

후후 연구과제로는 사람의 움직임으로 야기되는 여러 가지 동적하중의 계측 및 분석을 통하여 하중 모델을 제시하고 이러한 하중모델을 이용한 구조물의 진동해석과 실제 구조물의 진동 계측을 통한 비교 분석이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. H. Rainer, G. Pernica, (1986), "Vertical Dynamic Forces from Footsteps," *Noise and Vibration Section*, Division of Building Research, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, pp.12~21
2. Hugo Bachmann et al (1994), *Vibration Problem in Structures - Practical guideline*, Birkhauser, Verlag
3. Arya Ebrahimpour, (1987), *Modeling Spectator Induced Dynamic Loads*, University of Idaho, Thesis for Ph. Dr.
4. 최원호, 김기철, 이동근, "보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가," 대한건축학회 춘계 학술발표회논문집, 1999. 4, pp. 69~74.
5. 안상경, 김태호, 이동근, "건축구조물의 효율적인 연직진동 해석," 한국지진공학회 논문집, 제2권, 제2호, 1998. 6, pp. 23~34.
6. 김태호 "교통하중을 받는 구조물의 동적해석, 성균관대학교, 석사학위 논문, 1998