

경기장 관람석의 효율적인 진동해석

Efficient Vibration Analysis of Stadium Stands

김기철† 이동근*

Kim, Gee-Cheol Lee, Dong-Guen

(논문접수일 : 2001년 8월 9일 ; 심사종료일 : 2002년 3월 4일)

요지

고강도 재료의 사용과 시공기술의 발달로 경기장 관람석이 장경간화 유연화 되어 구조물의 고유진동수가 매우 낮아지고 있다. 경기장 관람석구조물은 사람의 율동적인 움직임에 의하여 공진 또는 공진과 유사한 거동이 일어날 수 있으므로 진동에 대한 구조물의 안전성 및 사용성에 대한 검토가 요구된다. 경기장 관람석의 효과적인 설계를 위해서는 경기장 관람석에 가해지는 동적하중에 대한 분석과 경기장 관람석의 거동에 대한 정확한 분석이 있어야 한다. 경기장 관람석에 가해지는 동적하중은 매우 다양하며 수식적으로 표현하기가 쉽지 않기 때문에 계측한 동적하중을 적용하는 것이 바람직하다. 그리고 관요소로 이루어진 경기장 관람석의 정확한 진동해석을 위해서는 구조물을 조밀하게 나누어야 하기 때문에 해석시간이 길어지게 된다. 또한 경기장 전체 구조물의 진동해석이 있어서 경기장 전체 구조물을 세분화하여 모델링하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 절점 수가 매우 많아지므로 절점수가 제한되어 있는 상용프로그램으로는 해석이 불가능할 수도 있다.

본 연구에서는 경기장 관람객의 여러 가지 움직임에 의하여 야기되는 다양한 동적하중을 계측하여 분석하였다. 그리고 관요소로 이루어진 경기장 관람석의 동적특성을 비교적 잘 표현할 수 있으면서도 절점을 줄일 수 있는 효과적인 해석방법을 제안하였다. 제안된 방법의 정확성과 효율성을 살펴보기 위하여 경기장 관람석의 진동해석을 수행하였다.

핵심용어 : 경기장 관람석, 공진, 관람객의 움직임, 진동해석

Abstract

Recently, the use of the high strength materials and development of construction techniques have resulted in more flexible and longer spanning in the stadium systems. So the natural frequency of stadium structures are became low. Stadium stand could be led to significant dynamic response as like resonance due to spectator rhythmical activities. The accurate analysis of dynamic behavior of stadium systems and the precise investigation of the dynamic loads on stadium structures are demanded for effective design. It is desirable to apply measured dynamic loads created by spectator activities because these dynamic loads are not easy to express numerical formula. As the floor mesh of stadium stand is refined, the number of divided elements increases in numerical analysis. the rise of the number of elements makes the numbers of nodal points increased and numerous computer memory required. So it is difficult to analysis refine full model of stadium structures by using the commercial programs.

In this study, the various dynamic loads induced by spectator movements are measured and analyzed. And a new modeling method that reduce the nodal points are introduced. Vibration analysis of stadium stands is executed to inspect accuracy and efficiency of proposed method in this paper.

Keywords : stadium stand, resonance, spectator rhythmical activities, vibration analysis

† 책임저자, 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 박사과정수료
전화: 031-290-7574; Fax: 031-290-7570
E-mail: beat67@dreamwiz.com

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

· 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에
보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

사람이 매우 활발하게 움직이는 경기장의 관람석이나 무대의 바닥판 구조물은 고강도 재료의 사용과 시공 기술의 발달로 장경간화되고 유연화되어 구조물의 고유진동수가 낮아지고 있다. 따라서 이러한 구조물에서는 관람객의 움직임에 의하여 공진 또는 공진과 유사한 거동이 일어날 수 있으므로 진동해석을 통한 구조물의 안전성에 대한 검토 및 사용성에 대한 평가가 요구된다.

경기장 관람석의 정확한 진동해석을 위해서는 관람객의 움직임에 의하여 야기되는 실제적인 동적하중을 적용하여야 하며 관람석 구조물을 조밀하여 나누어 진동해석을 수행하여야 한다. 그러나 관람객의 움직임에 의한 동적하중을 수식적으로 표현하기가 쉽지 않기 때문에 동적효과를 고려한 정적하중이나 간단한 주기하중으로 가정하여 가하는 것이 일반적이다.^{1)~3)} 그러나 이러한 하중을 적용할 경우 그 응답이 관람객의 움직임에 의한 구조물의 실제적인 응답과 다르게 나타날 수 있다. 그러므로 경기장 관람석의 정확한 진동해석을 위해서는 계측한 실제 동적하중을 적용하는 것이 바람직하며 이러한 동적하중에 대한 분석이 있어야 할 것이다. 그리고 판요소로 구성된 경기장 관람석구조물을 조밀하게 나누어야 동적해석을 수행할 경우에 절점수가 많아져 해석시간이 길어지게 된다. 또한 경기장의 전체 관람석 구조물의 진동해석에 있어서, 경기장 전체 구조물을 세분화하여 모형화하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 절점 수가 매우 많아지므로 절점수가 제한되어 있는 상용프로그램으로는 해석이 불가능할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 경기장 관람객의 여러 가지 움직임에 의하여 야기되는 다양한 동적하중을 계측하고 분석하여 진동해석을 위한 동적하중으로 사용하고자 한다. 그리고 판요소로 이루어진 경기장 관람석의 동적특성을 비교적 잘 표현할 수 있으면서도 절점수를 줄일 수 있는 모형화방법을 제안하여 효율적인 진동해석을 수행하고자 한다.

2. 관람객의 움직임에 의한 동적하중

경기장 관람석의 합리적인 진동해석을 위해서는 경기장 관람석에 실제로 작용하는 동적하중을 계측하여 적용하는 것이 타당하다. 동적하중 계측에 앞서 경기장 관람객의 움직임 종류에 대하여 분석하였으며 관람객

에 의하여 야기되는 동적하중을 로드셀을 이용하여 계측하였다. 관람객의 움직임으로 야기되는 하중은 충격하중과 주기하중으로 분류할 수 있다. 관람객의 율동적인 움직임은 조화하중의 특성을 가지고 있으며 이러한 조화하중의 진동수가 경기장 관람석의 고유진동수에 근접하게 되면 공진 발생의 가능성이 매우 높아진다.

2.1 일시적인 충격하중

관람객의 갑작스런 일어섬, 갑작스런 앉음, 갑작스런 제자리뒹 등은 하중이 구현되는 시간이 매우 짧기 때문에 일시적인 충격하중의 형태로 나타난다.⁴⁾ 그림 1은 관람석에서 발생할 수 있는 일시적인 하중의 형태로 피실험자가 관람석에서 앉았다 일어설 때 발생하는 동적하중을 나타낸 것이다. 일시적인 동적하중은 그림 1과 같이 발(foot)과 둔부(hip) 두 부분으로 나뉘어서 나타나므로 두 개의 로드셀을 이용하여 발과 둔부에서 하중을 계측하였다.

A영역은 피실험자가 발 쪽에 있는 로드셀에 올라 설 때 발생하는 동적하중으로 몸무게가 발 쪽의 로드셀로 전부 옮겨간다. B영역은 피실험자가 발 쪽의 로드셀에 올라 서있는 상태이다. C영역은 피실험자가 서 있다가 갑자기 앉을 때 야기되는 동적하중으로 발 부분의 하중이 영에 가깝게 나오며 둔부의 로드셀에 대부분의 하중이 실리는 것을 볼 수 있다. 약간의 충격 효과로 동적하중이 몸무게 보다 크게 나오며 앉기 직전에 하중이 몸무게 보다 약간 줄어드는 것을 볼 수 있다. D영역은 피실험자가 앉아있는 상태로 대부분의 하중이 둔부로 전달되며 발 쪽에는 체중이 거의 실리지 않는다. 마지막 E영역은 피실험자가 앉아 있다가 갑자기 일어설 때 발생하는 동적하중이다. 갑자기 일어서며 뛰기 때문에 충격효과가 매우 크게 나타난다. 첫 번째 정점은 일어설 때의 충격효과로 발생하는 것이며 두 번째 정점은

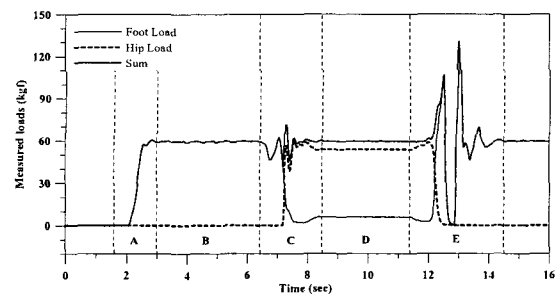
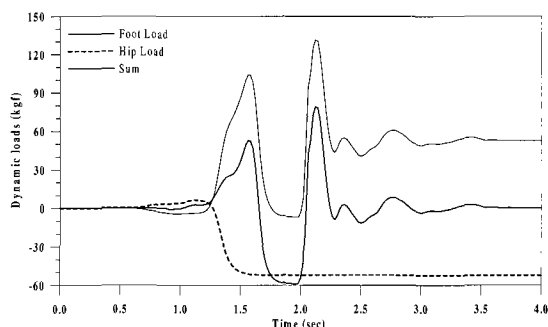
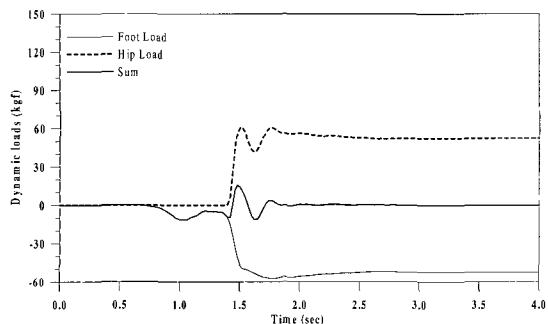


그림 1 일시적인 동적하중



(b) 갑자기 일어설 때



(a) 갑자기 앉을 때

그림 2 관람객이 갑자기 앉거나 일어설 때 발생하는 동적하중

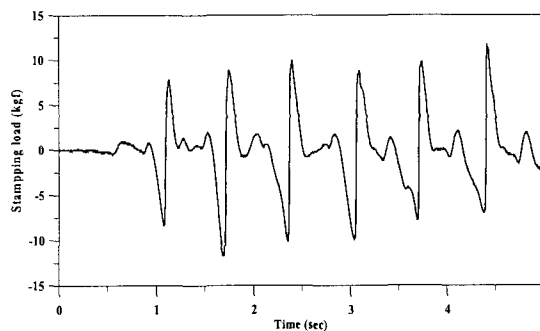
떨 때 발생한 충격하중이다. 그리고 하중이 몸무게 보다 작게 나오는 부분은 피실험자가 떨 때 하중이 중력 방향의 반대로 작용하기 때문이다.

그림 2는 관람객이 갑자기 앉거나 일어설 때 발생하는 동적하중에서 피실험자의 몸무게를 제거하여 충격 효과에 의한 동적하중을 분석하기 위한 것이다. 갑자기 앉을 때는 충격하중이 둔부에서 발생하며 충격효과가 미비한 것을 볼 수 있다. 피실험자가 갑자기 일어설 때 발생하는 충격하중은 발에서 발생하며 충격효과에 의한 동적하중이 몸무게의 두 배 정도로 나타난다.

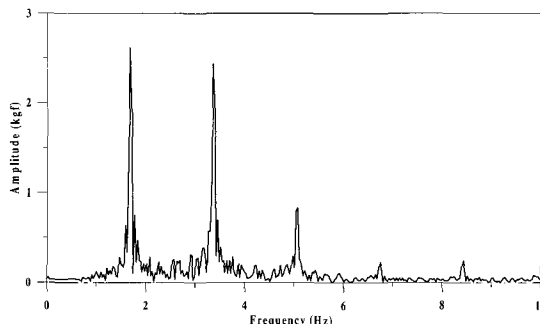
2.2 연속적인 주기하중

관람객의 움직임 중에서 걷기, 상체 흔들기, 발구르기, 제자리 뛰기 등은 하중의 양상이 연속적이며 이러한 연속 하중은 주기적인 동적하중과 비주기적인 동적하중으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 다양한 연속하중 중에서 구조물에 보다 심각한 영향을 줄 수 있는 주기적인 연속 하중을 계속하였다. 메트로놈에 의하여 만들어지는 주기적인 신호에 맞추어 피실험자가 움직이도록 하였다.

경기장 관람객은 응원의 한 형태로 북소리나 어떠한



(a) 발구르기에 의한 하중(시간영역)



(b) 발구르기에 의한 하중(진동수영역)

그림 3 관람객이 서서 발구를 때 발생하는 동적하중

신호에 맞추어 서서 발을 구르는 경우가 있다. 그림 3은 피실험자가 서서 한발을 고정하고 다른 한발을 구를 때 발생하는 동적하중을 나타낸 것이다. 발구름의 진동수는 1.7Hz로 메트로놈을 이용하여 주기적인 신호를 주었다. 발구름에 의한 동적하중은 연속적인 충격하중의 양상과 비슷하지만 하중 진동수의 정수배에서 진폭이 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 4차 이상의 조화하중 성분은 매우 작게 나타나고 있다.

그림 4(a)와 (b)는 상체를 앞뒤로 흔들 때 야기되는 동적하중을 나타낸 것이다. 상체를 앞으로 한번 뒤로 한번 흔들기 때문에 기본 진동수는 0.7Hz이다. 상체를 앞으로 기울일 때 상체의 기울임이 뒤로 기울일 때보다 크기 때문에 동적하중이 크게 나타난다. 그림 4(c)와 (d)는 상체를 좌우로 흔들 때 발생하는 동적하중을 나타낸 것이다. 상체를 좌우로 흔들 때는 좌우로 흔들 때보다 기울임이 작기 때문에 동적하중이 작게 나오고 있다. 상체를 왼쪽으로 한번 오른쪽으로 한번 흔들기 때문에 기본 진동수가 2.0초이다. 하중의 진동 특성이 좌우 구분 없이 나타나므로 상체를 앞뒤로 흔들 때는 경우와 다르게 기본 진동수가 1.0Hz로 나타나고 있다.

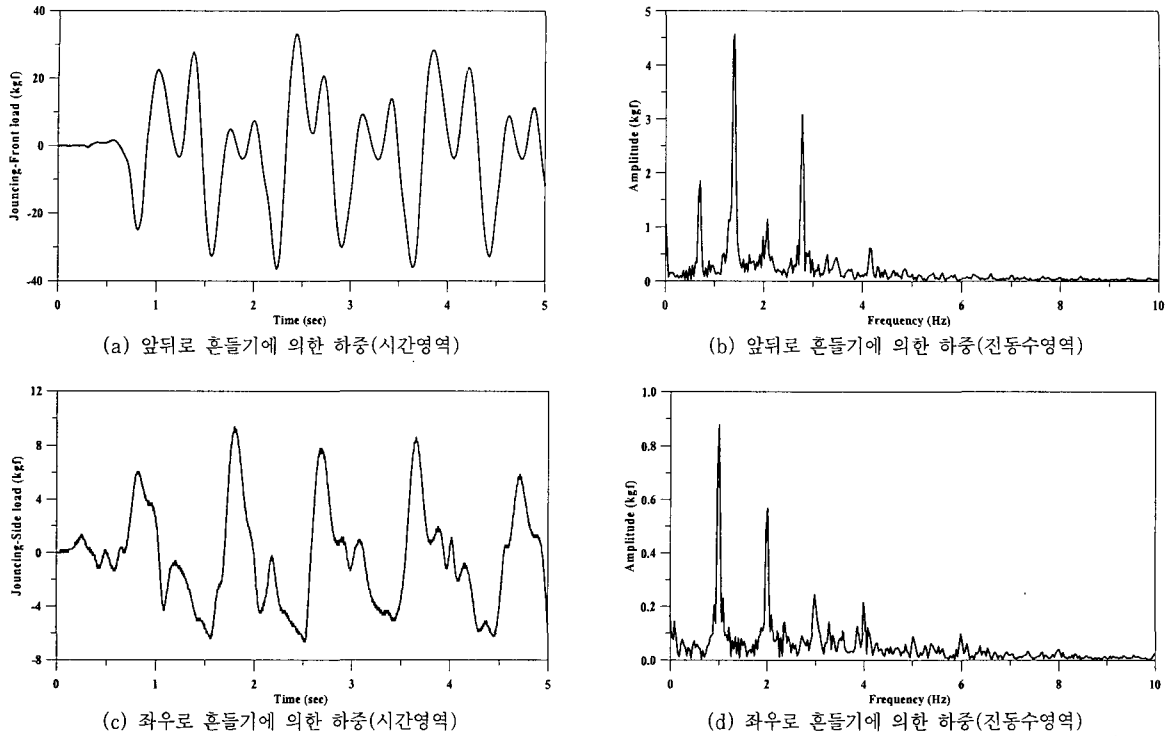


그림 4 관람객의 상체를 앞뒤(좌우)로 흔들 때 발생하는 동적하중

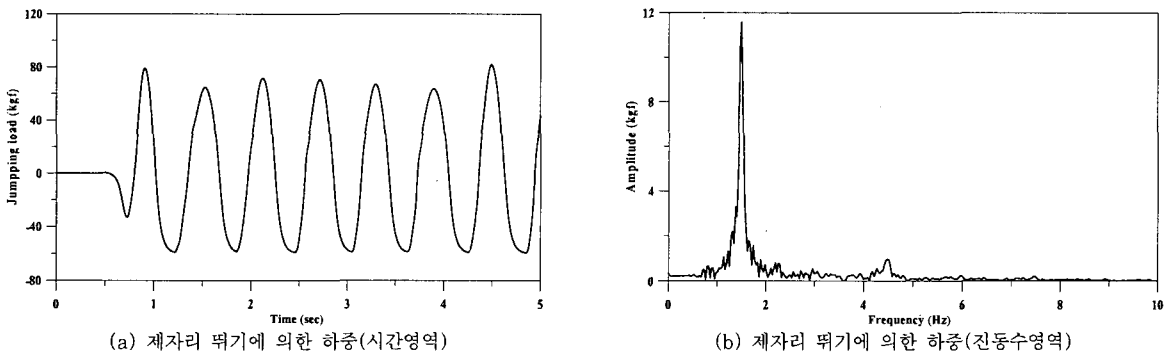


그림 5 제자리 뛸 때 발생하는 동적하중

관람객이 제자리서 주기적으로 뛸 때 그림 5(a)와 같은 동적하중이 나타나며 경기장에서 발생할 수 있는 동적하중 중에서 가장 큰 형태의 동적하중이다. 그림 5(b)에서 볼 수 있듯이 제자리 뛸 때 발생하는 동적하중은 하중의 기본진동수 성분에서 대부분을 차지하고 있으며 기본 진동수의 정수배에서 하중의 진폭이 거의 나타나지 않는다.

3. 관람객의 일시적인 움직임에 의한 경기장 관람석의 진동

경기장의 관람석에 작용하는 충격하중은 비교적 인 지강도가 작을 지라도 관람객 전체에 의하여 한순간에 작용할 수 있다. 따라서 관람객의 일시적인 움직임에 의하여 관람석의 진동이 매우 크게 발생할 수 있다.

3.1 경기장 관람석의 형태

경기장 관람석은 대부분이 프리캐스트 구조물로 공장에서 생산되어 품질이 우수하고 다양한 형태의 단면을 만들 수 있다. 또한 공장에서 생산된 관람석 스탠드를 현장에서 경사보나 내력벽에 철판으로 접합하여 시공하므로 공사기간을 단축할 수 있다.

스탠드의 좌석은 그림 6과 같이 1단 또는 2단으로 이루어져 있으나 1단으로 이루어진 것이 대부분이다. 일반적으로 수평 판의 두께는 12cm상이며 수직 판은 수평 판 두께의 두 배정도 된다. 스탠드는 길이 7m이상의 장경간으로 구조물의 고유진동수가 비교적 낮게 나타난다. 낮은 고유진동수를 갖는 스탠드는 사람의 움직임에 의하여 공진이 발생할 수 있으며 또한 구조물의 감쇠비가 작아 관람객의 율동적인 움직임에 의하여 과

도한 진동이 발생할 수 있다.⁵⁾

3.2 일시적인 동적하중을 받는 경기장 관람석의 진동해석

경기장 관람석에서 발생하는 연속적인 하중은 일반적으로 발이 있는 한 지점에 하중이 작용하지만 갑자기 일어서거나 갑자기 앉을 때 발생하는 일시적인 충격하중은 발과 둔부 두 부분으로 나뉘어서 나타난다.

예제구조물의 크기는 그림 7(a)와 같으며 단부 경계조건은 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 단부의 세 지점이 철판으로 경사보에 간단하게 정착되어 있다. 따라서 해석모델의 단부 조건은 두 지점을 단순지지 조건으로 하였으며 나머지 한 지점에 대하여 연직방향의 자유도

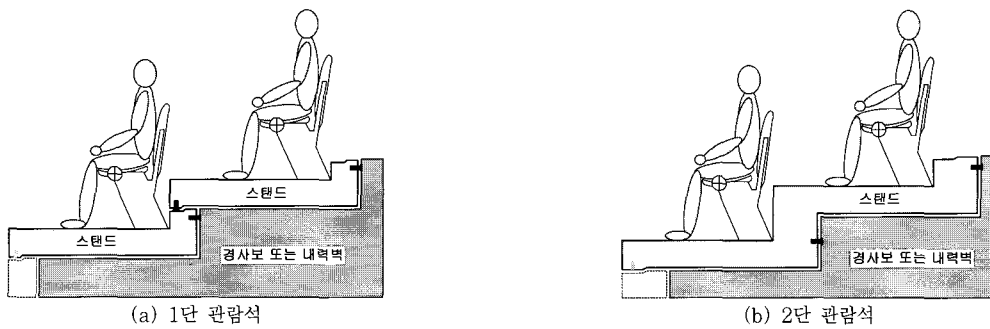
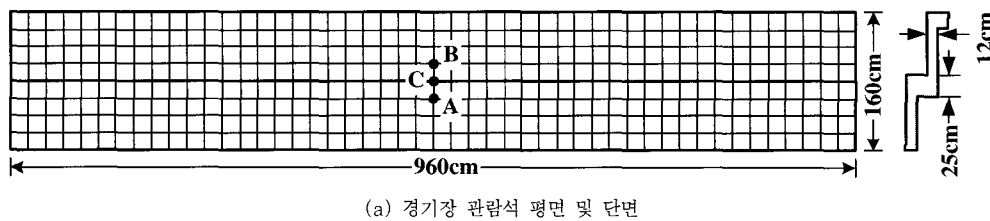


그림 6 관람석 형태



(a) 경기장 관람석 평면 및 단면

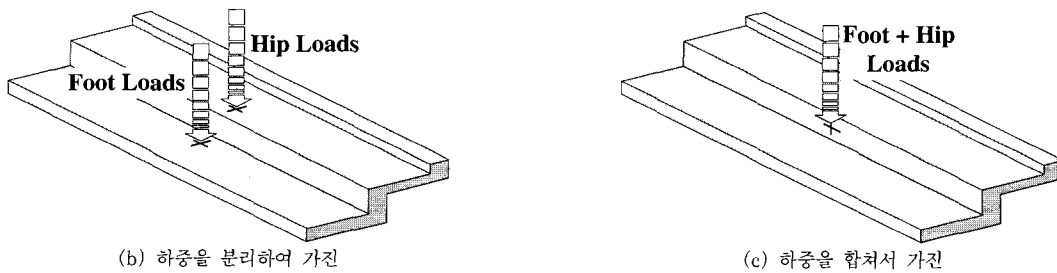
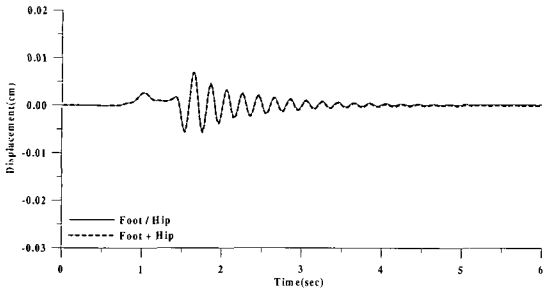
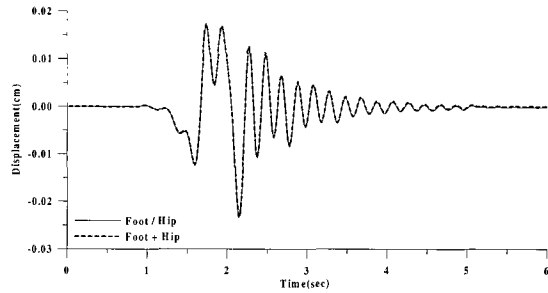


그림 7 일시적인 동적하중 가진방법



(a) 갑자기 앉을 때 C지점 변위응답



(b) 갑자기 일어설 때 C지점 변위응답

그림 8 일시적인 동적하중에 의한 경기장 관람석의 변위응답

를 구축시켰다. 그림 2(a)의 갑자기 앉을 때 발생하는 동적하중과 그림 2(b)의 갑자기 일어설 때 발생하는 동적하중을 가하였다. A지점에 발바닥에 의한 동적하중을 가하고 B지점에 둔부에 의한 동적하중을 가하였으며 발 부분의 하중과 둔부 부분의 하중을 합친 하중을 단면의 도심인 C지점에 가하여 응답을 비교 분석하였다.

그림 8(a)는 갑자기 앉을 때 발생하는 C지점의 변위응답이며 그림 8(b)는 갑자기 일어설 때 발생하는 C지점의 변위응답이다. 갑자기 일어설 때의 변위응답이 더 크게 나오는 것은 그림 2에서 알 수 있듯이 갑자기 일어설 때 발생하는 충격하중이 더 크기 때문이다. 관람객의 일시적인 움직임에 의한 경기장 관람석의 진동양상은 한 지점에 충격하중을 가하여 나타나는 진동양상과 유사하다. 따라서 그림 8(a)에서는 둔부의 동적하중이 변위응답에 지배적이며 그림 8(b)는 발 부분의 동적하중이 변위응답에 지배적이다. 그러므로 발과 둔부에 나뉘어서 나타나는 일시적인 충격하중을 두 지점에 나누어 가하였을 때 구한 변위응답과 한 지점에 합쳐서 가하였을 때 구한 변위응답이 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

4. 등가의 보요소로 치환한 경기장 관람석의 진동해석

경기장 관람석의 비교적 정확한 해석을 위해서는 판으로 이루어진 관람석을 매우 조밀하게 분할해야 한다. 조밀하게 분할된 관람석은 절점수가 매우 많아져 해석 시간이 길어지며 전체 경기장 관람석을 해석하는데 있어서 상용프로그램으로 해석이 불가능할 수도 있다. 따라서 경기장 관람석의 진동해석을 위해서는 절점 수를 효과적으로 줄일 수 있으며 비교적 정확한 응답을 얻을 수 있는 방법이 요구된다.

4.1 판요소로 이루어진 관람석의 등가 보요소 관람석으로 치환

경기장 관람석의 효율적인 동적해석을 위하여 판요소로 이루어진 관람석을 등가 보요소로 그림 9와 같이 치환한다. 경기장 관람석은 그림 9와 같이 x 축에 약간 기울어져 진동하며 강축의 단면강성이 약축에 열 배정도 된다.

등가의 보요소로 치환하는 방법은 다음과 같다.^{7),8)} 첫째, 판요소로 구성된 경기장 관람석을 등가의 보

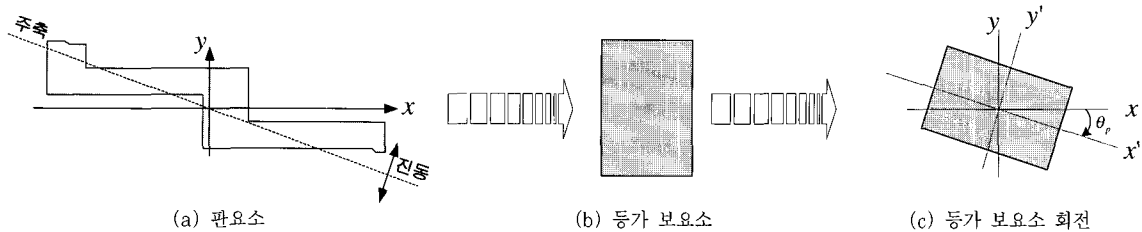


그림 9 등가 보요소로 치환 방법

요소로 치환하기 위하여 먼저 구조물의 단면특성을 구한다. 단면2차모멘트(I_x, I_y), 단면상승모멘트(I_{xy}) 및 비틀림상수(J)를 식(1)~식(4)를 이용하여 구한다.

$$I_x = \frac{ab^3}{12} + \int x^2 dA \quad (1)$$

$$I_y = \frac{ba^3}{12} + \int y^2 dA \quad (2)$$

$$I_{xy} = \int xy dA \quad (3)$$

$$J = \frac{ab^3}{3} \left(1 - 0.630 \frac{b}{a} + 0.052 \frac{b^5}{a^5} \right) \quad (a > b) \quad (4)$$

둘째, 등가의 강성(I_1, I_2)과 등가의 질량을 갖는 보 요소로 치환한다. 주축에 대한 등가의 강성을 식(5)를 이용하여 구한다. 또한 등가의 이동질량은 단면적을 이용하여 구하며 등가의 회전질량강성모멘트(I_m)는 식(6)을 이용하여 구한다.

$$I_1, I_2 = \frac{I_x + I_y}{2} \pm \sqrt{\frac{I_x + I_y}{2} + I_{xy}} \quad (5)$$

$$I_m = I_0 + \int r^2 dm \quad I_0 = \frac{\rho ab}{12} (a^2 + b^2) \quad (6)$$

셋째, 주축이 x 축에 대하여 회전되어 있으므로 단면 2차모멘트(I_x, I_y)와 단면상승모멘트(I_{xy})를 이용하여 주축의 회전각(θ_p)을 구한다.

$$\tan 2\theta_p = -\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y} \quad (7)$$

4.2 관람석 구조물의 고유진동수 및 진동모드

판요소 이루어진 단위 경기장 관람석의 진동모드는 그림 10과 같다. 경기장 관람석은 일반적으로 장경간 구조물이므로 연직1차 모드가 낮게 나오며 저차 모드에서 비틀림에 의한 모드가 나타나고 있다. 연직모드는 1차, 3차, 6차 8차 모드이며 수평모드는 4차, 9차 모드이다. 2차, 5차, 7차 모드는 비틀림모드이다.

등가의 보요소로 치환한 경기장 관람석의 진동모드는 그림 11과 같다. 진동모드의 순서는 판으로 구성된 경기장 관람석의 진동모드와 9차 모드까지 같으며 교차모드에서 그 순서가 바뀌어 나타난다. 비틀림모드인 2차, 5차, 7차 모드는 보요소가 선부재이므로 모드형상에서 표현되지 않고 있다.

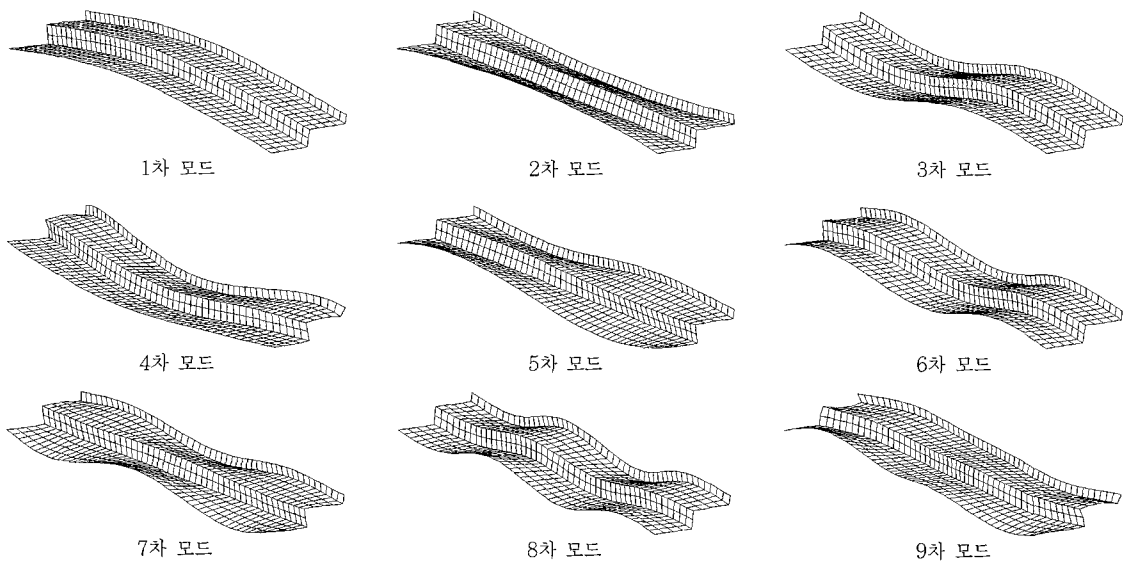


그림 10 판요소 관람석 구조물의 모드형상

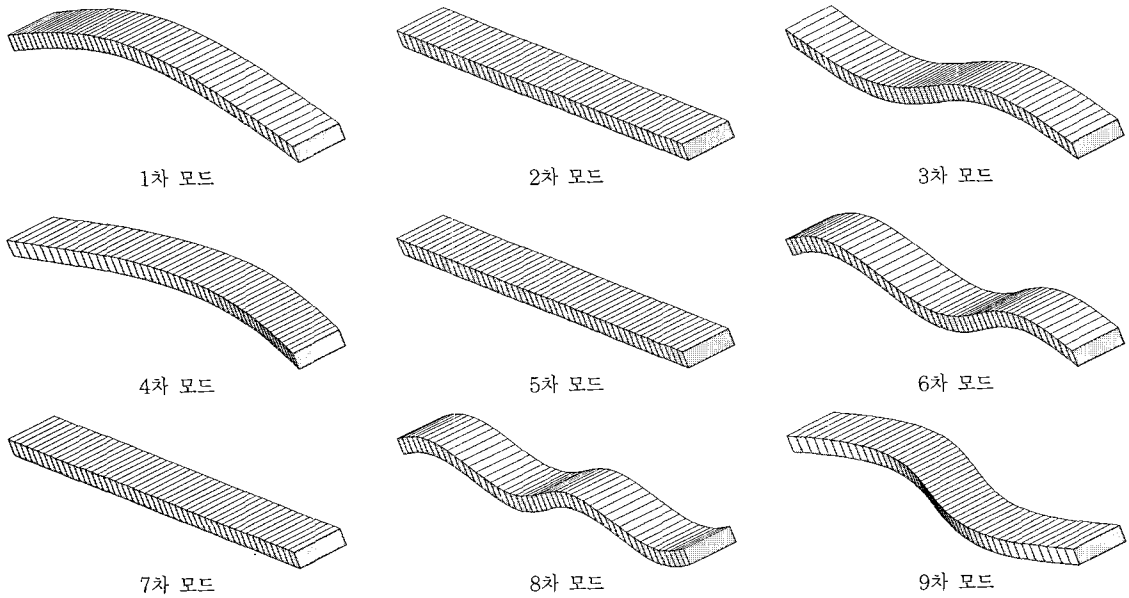


그림 11 등가 보요소 관람석의 모드형상

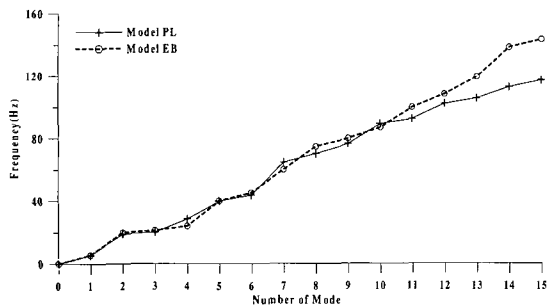


그림 12 경기장 관람석의 고유진동수

그림 12는 판요소와 등가의 보요소에 의한 경기장 관람석의 고유진동수 나타낸 것이다. Model PL은 판요소로 이루어진 관람석 예제모델로 절점수가 576개이며 Model EB는 등가의 보요소로 치환된 예제모델로 절점수가 48개이다. 그림 10과 그림 11에 나타낸

구조물의 진동모드와 그림 12에 나타낸 모델별 고유진동수를 살펴보면 구조물의 응답에 주요한 영향을 미치는 저차 모드에서는 진동모드와 고유진동수가 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 등가의 보요소로 이루어진 경기장 관람석의 동적특성이 판으로 구성된 실제 경기장 관람석의 동적특성을 비교적 잘 표현하고 있는 것을 볼 수 있다.

4.3 등가 보요소 관람석의 동적하중 가진방법

판요소로 구성된 경기장 관람석과 등가의 보요소로 치환한 경기장 관람석에 제자리 뒹과 발구름에 의한 연속적인 동적하중을 가하여 얻은 변위응답을 비교 분석하였다. 관람석 예제구조물의 크기와 단면은 그림 7과 같으며 2장에서 언급한 제자리 뒹과 발구름에 의한 동적하중을 그림 13의 ×지점에 가하였다. 제자리 뒹과

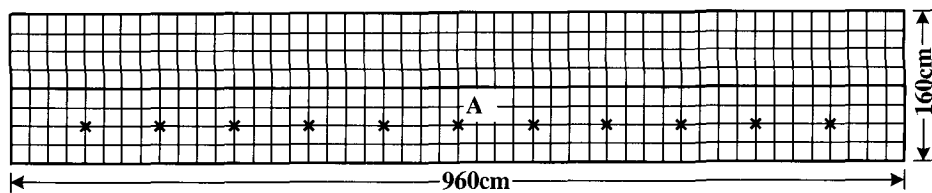


그림 13 연속적인 동적하중 가진 위치

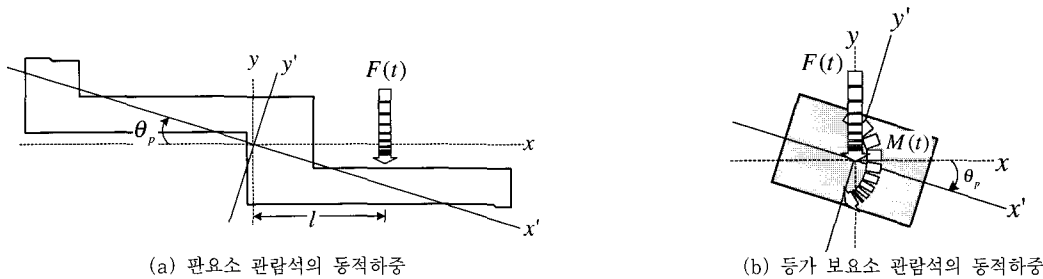


그림 14 등가 보요소 관람식의 동적하중 가진방법

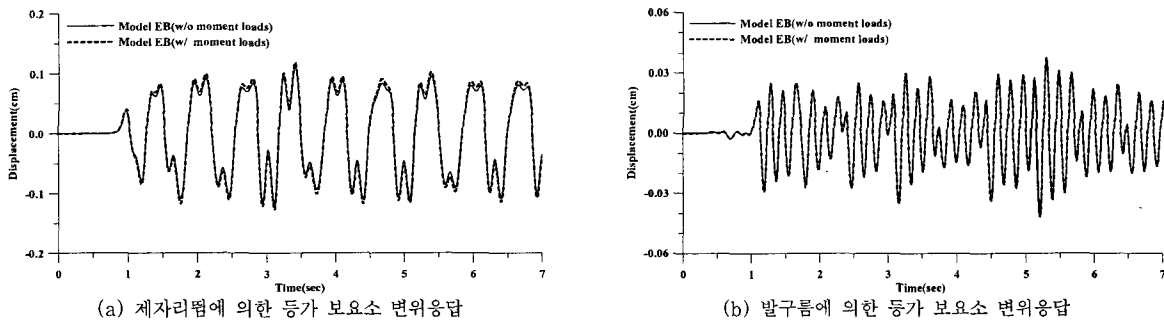


그림 15 모멘트하중 추가에 의한 등가 보요소 예제구조물의 변위응답

발구름에 의한 동적하중의 진동수는 1.5Hz이다.

판요소 관람식에 가해지는 동적하중은 그림 14(a)와 같이 단면의 전단중심에서 일정거리를 두고 있으므로 모멘트가 작용하게 된다. 따라서 등가의 보요소에 가해지는 동적하중은 그림 14(b)와 같이 연직하중과 함께 모멘트하중이 추가된다.

그림 15는 등가 보요소로 치환한 예제구조물에 연직하중에 모멘트하중을 추가하여 가한 경우 Mode EB (W/moment loads)와 연직하중만을 가한 경우 Mode EB(W/o moment loads)의 변위응답을 나타낸 것이다. 그림 15(a)는 제자리 땀에 의한 A지점의 변위응답을 나타낸 것으로 모멘트하중에 의하여 변위응답이 약간 추가된 것을 볼 수 있으며 그림 15(b)는 발구름에 의한 A지점의 변위응답으로 추가된 모멘트하중이 작기 때문에 추가되는 변위응답이 작은 것을 볼 수 있다.

4.4 판요소 관람식 및 등가 보요소 관람식의 진동 해석

판요소로 이루어진 경기장 관람식(Mode PL)과 등가 보요소로 치환한 경기장 관람식 Mode EB에 2장에

서 언급한 연속적인 동적하중을 그림 13과 같이 가하여 A지점의 변위응답을 비교 분석하여 등가의 보요소로 치환하여 해석하는 방법의 효율성을 알아보았다.

그림 16(a)는 제자리 땀에 의한 경기장 관람식의 변위응답을 시간영역에서 나타낸 것이다. 예제구조물의 고유진동수를 나타낸 그림 12에서 알 수 있듯이 등가 보요소로 치환된 예제 구조물의 강성이 약간 크게 평가되어 있기 때문에 등가의 보요소로 치환한 예제구조물의 변위응답이 판요소로 이루어진 예제구조물의 변위응답보다 작게 나타나고 있다. 그림 16(b)는 변위응답을 FFT하여 나타낸 것으로 2장에서 언급한 것과 마찬가지로 동적하중이 기본 진동수 성분에서 대부분을 차지하고 있기 때문에 응답 또한 하중의 기본진동수 성분에서 대부분을 차지하고 있다.

그림 17 (a)는 발구름에 의한 경기장 관람식의 변위응답을 시간영역에서 나타낸 것이다. 등가의 보요소로 치환된 예제 구조물의 변위응답과 판요소로 이루어진 예제구조물의 변위응답이 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있으나 전체적인 양상은 매우 유사하다. 그림 17(b)는 변위응답을 FFT하여 나타낸 것으로 하중 진동수의 정수배에서 응답이 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며

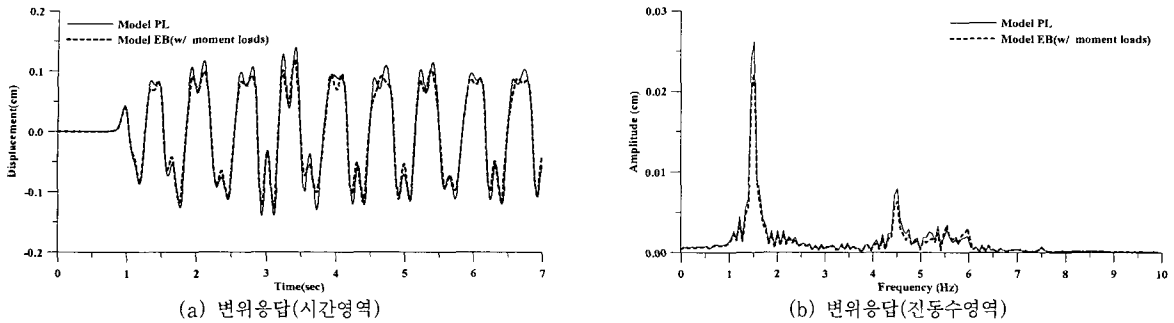


그림 16 제자리뒹에 의한 경기장 관람석의 변위응답

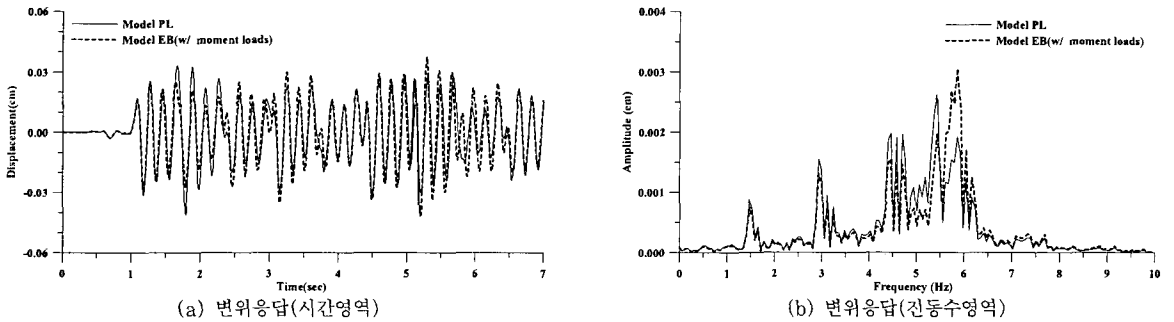


그림 17 발구르기에 의한 경기장 관람석의 변위응답

하중의 4차 조화성분에서 가장 크게 나타나고 있다. 등가 보요소로 치환한 예제구조물의 응답과 판요소 예제구조물의 응답이 차이가 나는 것은 4차 조화하중의 진동수가 판요소 예제구조물의 고유진동수보다 등가 보요소로 치환 예제구조물의 고유진동수에 더 근접하기 때문이다. 그러나 진동수 영역에서의 전체적인 양상은 매우 유사하게 나타나고 있다.

4.5 등가 보요소 관람석의 요소 수에 따른 변위응답

등가 보의 요소 수에 따른 예제구조물의 고유진동수와 응답을 비교 분석하였다. Model PL은 판요소로 이루어진 예제모델이며 Model EB-48의 요소 크기는 분할된 판요소의 크기와 같으며 분할된 요소 수는 48개이다. Model EB-24는 요소의 크기를 두 배로 하여 요소 수를 반으로 줄인 것이다. Model EB-12는 요소 수를 12개로 한 것이며 Model EB-06은 예제구조물의 요소 수를 6개로 줄인 것이다.

보요소로 이루어진 구조물은 최소 4개 이상의 요소로 분할하면 구조물의 동적특성이 요소 수에 관계없이

유사하게 나타난다.⁸⁾ 그림 18은 치환된 등가 보의 요소 수에 따른 예제구조물의 고유진동수를 나타낸 것으로 48개의 요소를 6개로 줄더라도 저차모드에서 고유진동수가 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 그림 19는 예제구조물의 요소분할에 따른 변위응답을 나타낸 것이다. 예제구조물의 응답에 지배적인 저차모드의 고유진동수 매우 유사하므로 예제구조물의 변위응답이 매우 비슷하게 나타나고 있다. 따라서 판요소 이루어진 관람석구조의 동적특성을 제대로 표현할 수 있는 등가의 보요소를 사용하여 경기장 관람석의 진동해석을 수행할 경우 비교적 유사한 응답을 얻을 수 있다.⁹⁾

5. 결 론

경기장 관람석의 진동해석을 위해서는 진동을 야기시키는 진동원에 대한 정확한 분석이 있어야 하므로 본 논문에서는 관람객의 움직임에 의하여 발생하는 다양한 동적하중을 분석하였다. 그리고 관람석 구조물을 등가의 보요소로 모형화하는 방법을 제안하고 진동해석

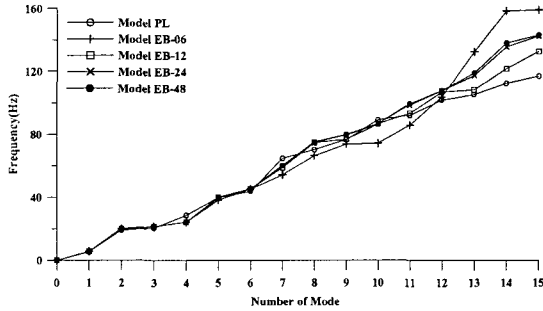


그림 18 모델별 고유진동수

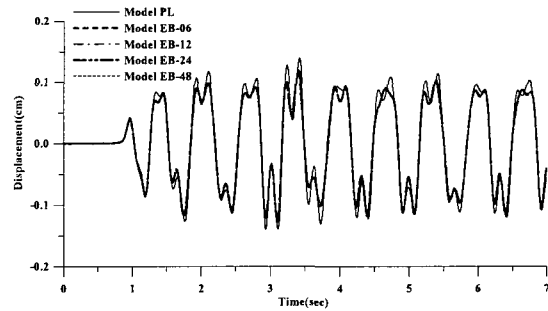


그림 19 모델별 변위응답

을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 관람객이 갑자기 앉을 때 발생하는 동적하중은 충격효과가 매우 미비하며 관람객이 갑자기 일어설 때에는 몸무게의 두 배 정도에 해당하는 충격하중이 발생한다.

둘째, 관람객의 발구름, 상체 흔들기에 의한 동적하중은 하중진동수의 정수배에서 진폭이 크게 나타나며 제자리 뛰기에 의한 동적하중은 하중진동수의 기본진동수에서 대부분의 하중이 나타난다.

셋째, 판요소로 구성된 경기장 관람석을 등가의 보요소로 모형화하여 동적해석을 수행하면 절점 수를 현저하게 줄일 수 있으므로 효율적인 진동해석이 가능하다.

본 논문에서는 하나의 관람석만을 가지고 제한적으로 진동해석을 수행하였으나 경기장 관람석은 관람석과 더불어 관람석을 지지하는 경사보와 기둥으로 이루어져 있다. 따라서 추후 연구과제로 경기장 전체 구조물에 대한 진동해석과 분석을 수행해야 할 것이며, 경기장 구조물의 실제 진동응답을 예측하여 해석응답과 비교 분석함으로써 본 논문에서 제시한 모형화방법의 효용성에 대한 검증이 필요하리라 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. NBCC, *Serviceability Criteria for Deflections and Vibrations*, Commentary A, Supplement to the National Building Code of Canada, National Research Council of Canada, Ottawa, 1990
2. AISC, *Floor Vibrations Due to Human Activity*, Steel Design Guide Series 11, American Institute of Steel Construction, 1997
3. ATC, *Minimizing Floor Vibration*, ATC Design Guide 1, Applied Technology Council, 1999
4. Christopher Y. Tuan and William E. Saul, "Loads Due to Spectator Movements", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1985
5. 한국구조기술사회, 2002 FIFA 월드컵 한국 스타디움 구조계획 자료집, 1999
6. James M. Gere and Stephen P. Timoshenko, *Mechanics of Materials*, PWS Publishing Co., Boston, 1990
7. Walter D. Pilkey, *Stress, Strain and Structural Matrices*, John Wiley and Sons, Toronto, 1994
8. 김기철, 이동근, "보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석", 한국지진공학회 논문집, Vol. 5, No. 1, 2001, pp.21~29
9. 김기철, 이동근, "경기장 구조물의 효율적인 진동해석", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제14권 제2집, 2001, pp.475~482