

경기장 구조물의 효율적인 진동해석 Efficient Vibration Analysis of Stadium Structure

김 기 철*
Kim, Gee-Cheol

이 동 근**
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Stadium stand could be led to significant dynamic response due to rhythmical activities of spectator. The dynamic loads induced by spectators movements are considered as static loads in design standard of many countries but these loads have dynamic characteristics. So, it is desirable to apply measured dynamic loads created by spectator activities and to analyze the dynamic behavior of stadium system. The precise investigation of the dynamic loads on stadium structures and the accurate analysis of dynamic behavior of stadium systems are demanded for effective design. As the floor mesh of stadium stand is refined, the number of nodes increase in numerical analysis. So it is difficult to analyze entire stadium structures and much more computer memory are necessary for vibration analysis of stadium system.

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

1. 서 론

관람객이 매우 활발하게 움직이는 경기장이나 무대의 관람석을 설계하는데 있어서 관람객의 움직임에 의하여 발생하는 동적하중을 정적하중으로 간주하는 것이 일반적이다.^{(1),(2),(3)} 여러 나라의 설계규준에서 사람의 움직임에 의한 하중을 정적 적재하중으로 분류하고 있으나 관람객의 움직임에 의하여 야기되는 하중은 본질적으로 동적특성을 가지고 있다. 경기장 구조물은 사람의 움직임에 의하여 공진 또는 공진과 유사한 거동이 일어날 수 있으므로 진동에 대한 구조물의 안전성 및 사용성에 대한 검토가 요구된다. 캐나다와 미국 같은 선진국의 설계규준에서 경기장이나 무대 바닥판 구조물의 고유진동수가 5Hz이상 되도록 제안하고 있으나 이러한 규준은 경제적 또는 건축 계획적인 이유로 항상 지켜지는 것은 아니다.

경기장 관람석의 설계를 위해서는 경기장 구조물의 동적거동에 대한 정확한 분석이 있어야 하며 관람객에 움직임에 의하여 발생하는 실제적인 동적하중을 가해하여 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 경기장 관람석에 가해지는 동적하중은 매우 다양하며 수식적으로 표현하기가 쉽지 않기 때문에 정적하중으로 가하여 해석하는 것이 일반적이다. 이러한 가진방법은 하중의 동적특성을 고려하지 못하기 때문에 구조물의 거동을 정확하게 분석할 수 없다. 그리고 판요소로 이루어진 경기장 구조물을 세분화하여 동적해석을 수행하는 것은 구조물의

* 정 회 원 · 성관관대학교 건축공학과 박사과정

** 정 회 원 · 성관관대학교 건축공학과 교수

모델링하는데 있어서 매우 어려울 뿐만 아니라 절점 수가 매우 많아지므로 동적해석시간에 매우 길어지며 절점수가 제한되어 있는 상용프로그램으로는 해석이 불가능할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 경기장 관람객의 여러 가지 움직임에 의하여 야기되는 다양한 동적하중을 실제 계측하여 분석하였다. 그리고 판요소로 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.

2. 관람객의 움직임에 의한 동적하중

관람객의 움직임으로 야기되는 동적하중은 일시적인 충격하중과 연속적인 주기하중으로 분류할 수 있다. 관람객의 율동적인 움직임은 조화하중의 특성을 가지고 있으며 이러한 조화하중의 진동수가 경기장 관람석의 고유진동수에 근접하게 되면 구조물에 과도한 진동이 발생할 수 있다.

2.1 일시적인 충격하중

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

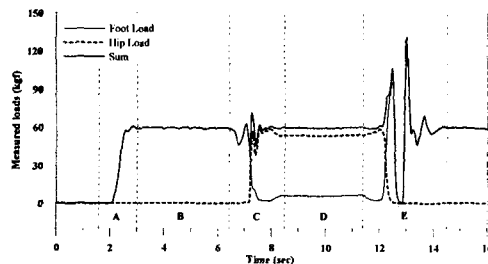


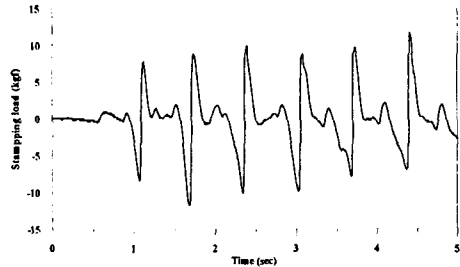
그림 1 일시적인 동적하중

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 충격 효과로 동적하중이 몸무게 보다 조금 크게 나오며 앉기 직전에 하중이 몸무게 보다 약간 줄어드는 것을 볼 수 있다. 발 부분의 하중이 영에 가깝게 나오며 둔부의 로드셀로 대부분의 하중이 전달된다. 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 떨 때 발생한 충격하중이다. 그리고 하중이 몸무게 보다 작게 나오는 부분은 피실험자가 떨 때 하중이 중력방향의 반대로 작용하기 때문이다.

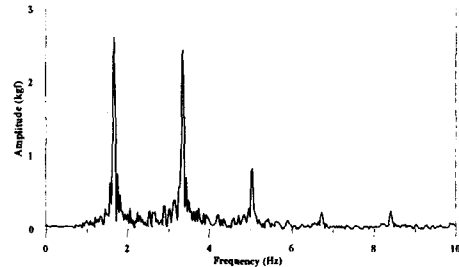
2.2 연속적인 동적하중

관람객의 제자리 뛰기, 상체 흔들기, 발구르기 등에 의한 동적하중의 양상은 연속적이다. 본 연구에서는 다

양한 연속하중 중에서 구조물에 보다 심각한 영향을 줄 수 있는 발구르기와 제자리뒹에 의한 연속하중을 계속하였다. 메트로놈에 의하여 만들어지는 주기적인 신호에 맞추어 피실험자가 움직이도록 하였다.



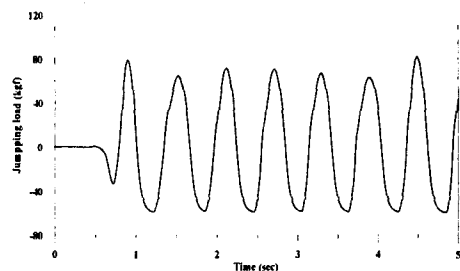
(a) 발구르기에 의한 하중(시간영역)



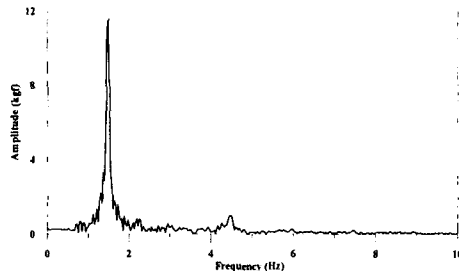
(b) 발구르기에 의한 하중(진동수영역)

그림 2 관람객이 서서 발구를 때 발생하는 동적하중

경기장 관람객은 응원의 한 형태로 북소리나 어떠한 신호에 맞추어 서서 발을 구르는 경우가 있다. 그림 2는 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 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 4차 이상의 조화하중 성분은 매우 작게 나타나고 있다.



(a) 제자리 뛰기에 의한 하중(시간영역)



(b) 제자리 뛰기에 의한 하중(진동수영역)

그림 3 제자리 뒹 때 발생하는 동적하중

관람객이 제자리서 주기적으로 뒹 때 그림 3 (a)와 같은 동적하중이 나타나며 경기장에서 발생할 수 있는 동적하중 중에서 가장 큰 동적하중이다. 그림 3 (b)에서 볼 수 있듯이 제자리 뒹 때 발생하는 동적하중은 대부분의 하중이 하중 진동수 성분에서 나타나고 있다.

3. 경기장 관람석의 등가보 요소로 치환

3.1 경기장 관람석의 형태

경기장 관람석은 대부분이 프리캐스트 구조물로 공장에서 생산되기 때문에 품질이 우수하고 다양한 형태의 단면을 만들 수 있다. 또한 공장에서 생산된 관람석 스탠드를 현장에서 경사보나 내력벽에 철물로 접합하여 시공하므로 시공이 간단하며 공사기간을 짧아진다.

스탠드의 좌석은 그림 4와 같이 1단 또는 2단으로 이루어져 있으나 1단으로 이루어진 것이 대부분이다. 일반적으로 수평 판의 두께는 12cm 이상이며 수직 판은 수평 판 두께의 두 배정도 된다. 스탠드는 길이 7m 이상

의 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 과도한 진동이 발생할 수 있다.⁽⁶⁾

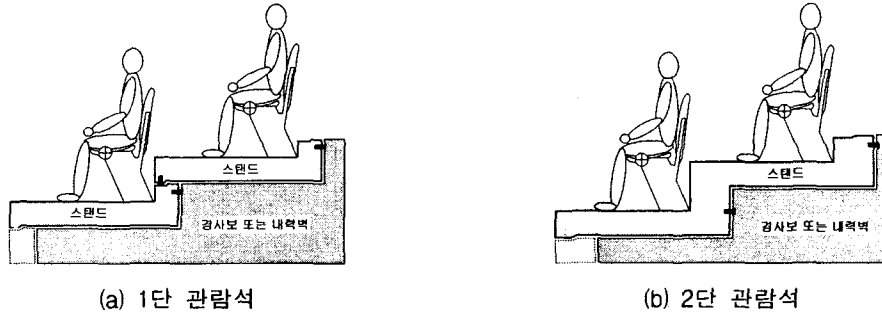


그림 4 관람석 형태

3.2 등가 보요소의 관람석

경기장 관람석의 효율적인 동적해석을 위하여 판요소로 이루어진 관람석을 등가 보요소로 그림 5와 같은 과정을 거쳐 치환한다. 등가 보요소의 약축과 강축에 대한 단면 강성은 판요소의 단면 강성과 같으며 진동축이 기울어져 있으므로 등가 보요소를 주축에 대하여 θ_b 만큼 회전시킨다.

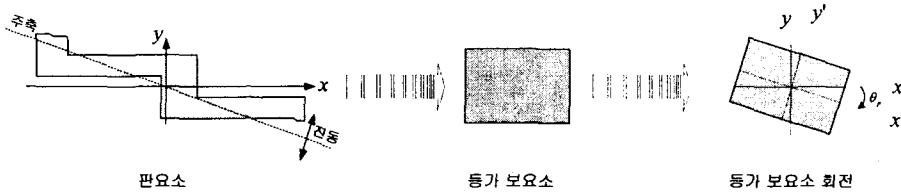


그림 5 등가 보요소로 치환 방법

등가의 보요소로 치환하는 방법은 다음과 같다.

첫째, 판요소로 구성된 경기장 관람석을 등가의 보요소로 치환하기 위하여 먼저 구조물의 단면특성을 구한다. 단면2차모멘트(I_x, I_y), 단면상승모멘트(I_{xy}) 및 비틀림상수(J)를 식(1)과 식(2)를 이용하여 구한다.^{(6),(7)}

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

$$J = \frac{ab^3}{3} \left(1 - 0.630 \frac{b}{a} + 0.052 \frac{b^5}{a^5} \right) \quad (a > b) \quad (2)$$

둘째, 등가의 강성(I_1, I_2)과 등가의 질량을 갖는 보요소로 치환한다. 주축에 대한 등가의 강성을 식 (3)을 이용하여 구한다. 또한 등가의 이동질량은 단면적을 이용하여 구하며 등가의 회전질량강성모멘트(I_m)는 식 (4)를 이용하여 구한다.

$$I_1, I_2 = \frac{I_x + I_y}{2} \pm \sqrt{\frac{I_x + I_y}{2} + I_{xy}} \quad (3)$$

$$I_m = I_0 + \int r^2 dm \quad I_0 = \frac{\rho ab}{12} (a^2 + b^2) \quad (4)$$

셋째, 주축이 x 축에 대하여 회전되어 있으므로 단면2차모멘트(I_x, I_y)와 단면상승모멘트(I_{xy})를 이용하여 식 (5)와 같이 주축의 회전각(θ_p)을 구한다.

$$\tan 2\theta_p = -\frac{2I_{xy}}{I_x - I_y} \quad (5)$$

3.3 치환된 등가 보요소의 동적하중 가진방법

경기장의 관람석은 일반적으로 그림 6과 같이 일정간격으로 의자가 배치되어 있다. 따라서 구조물에 가해지는 동적하중 역시 일정한 간격을 두고 가해지게 된다. 또한 관람객은 관람석 단면의 도심에서 일정거리를 두고 있는 위치에서 발을 구르거나 제자리 뛰게 된다. 그림 6과 같이 판요소로 이루어진 관람석의 x 위치에 가해지는 동적하중은 등가의 보요소의 관람석에서 연직하중과 함께 도심에 대한 모멘트하중이 추가된다.

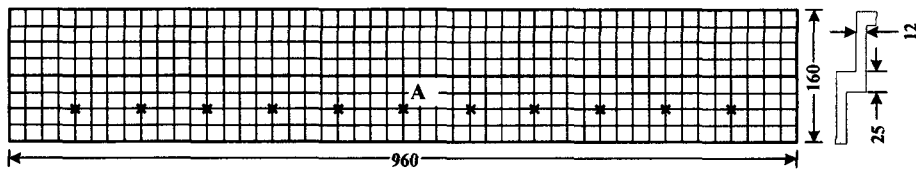
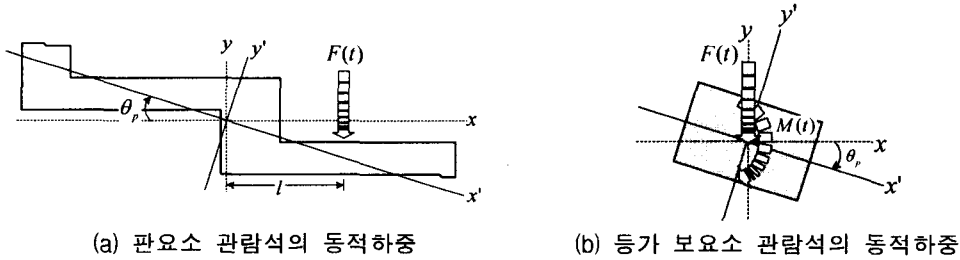


그림 6 연속적인 동적하중 가진 위치

판요소 관람석에 가해지는 동적하중($F(t)$)은 그림 7 (a)와 같이 도심에서 일정거리를 두고 있으므로 등가의 보요소에는 그림 7 (b)와 같이 연직하중($F(t)$)과 모멘트하중($M(t)$)을 추가하여 가한다.



(a) 판요소 관람석의 동적하중

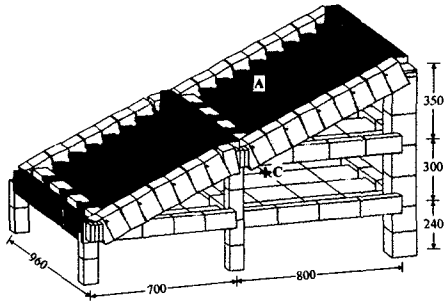
(b) 등가 보요소 관람석의 동적하중

그림 7 등가 보요소 관람석의 동적하중 가진방법

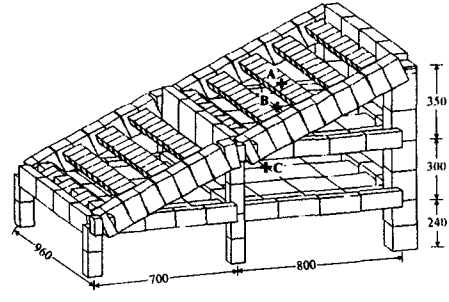
4. 경기장 구조물의 진동해석

4.1 경기장 구조물의 고유진동수 및 진동모드

예제 경기장 구조물은 다음 그림8과 같이 상단과 하단으로 구분되어 있으며 관람석 하부 바닥판은 높이 2.4m와 5.4m에 위치해있다. 관람석은 그림 4(b)와 같이 2단 관람석으로 경사보에 단순지지 되어있으며 2단 관람석의 크기와 단면은 그림 6과 같다.



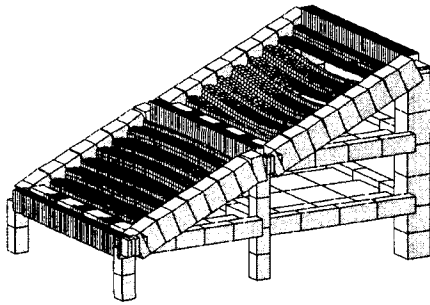
(a) 판요소 경기장 구조물(Model PL)



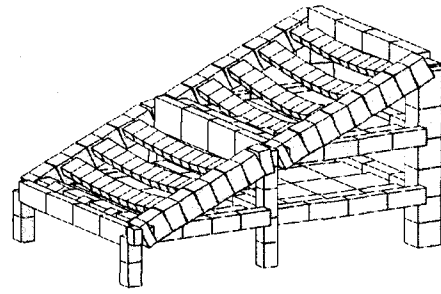
(b) 등가 보요소 경기장 구조물(Model EB)

그림 8 예제 경기장 구조물

관람석 구조물이 장경간이며 경사보에 단순지지 되어있어 그림 9와 같이 저차 모드에서 관람석의 진동모드가 나타난다. 그림 10은 경기장 관람석 하부 바닥판의 진동모드가 나타난 것이다. 표 1은 구조물의 모드별 고유진동수를 나타낸 것이다. Model PL과 Model EB는 관람석이 각각 판요소와 등가보요소로 이루어진 예제 구조물이다.

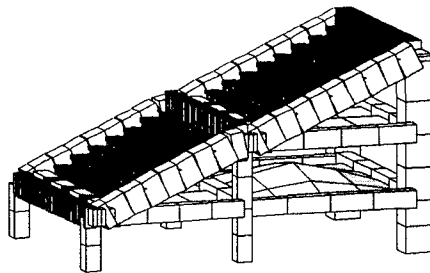


(a) Model PL - 관람석 연직1차

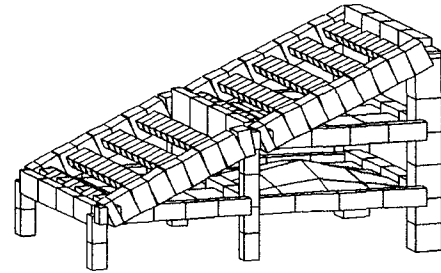


(b) Model EB - 관람석 연직1차

그림 9 관람석 진동모드



(a) Model PL - 바닥판 연직1차



(b) Model EB - 바닥판 연직1차

그림 10 관람석 하부 바닥판 진동모드

등가의 보요소로 치환한 경기장 구조물과 판요소로 구성된 경기장 구조물의 진동모드와 모드진동수가 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 등가의 보요소로 이루어진 경기장 관람석이 판요소로 구성된 경기장 관람석의 동적특성을 비교적 잘 표현하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

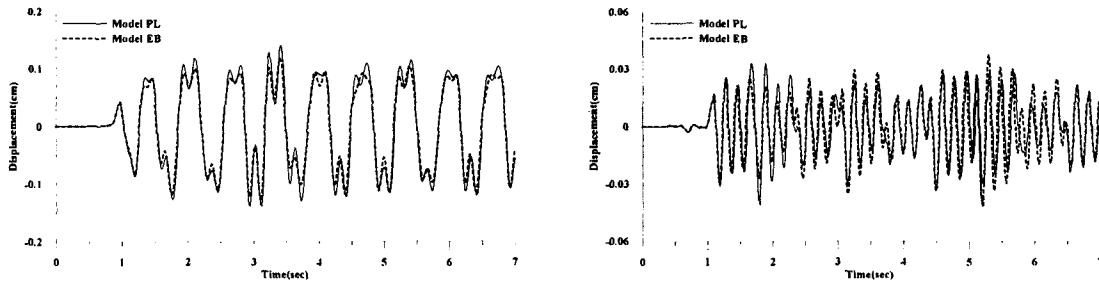
표 1. 경기장 구조물 모드별 진동수

(단위:Hz)

| Mode | 관람석 진동모드 | | | 관람석 하부 바닥판 진동모드 | | | | | |
|----------|----------|------|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1차 | 2차 | 3차 | 1차 | 2차 | 3차 | 4차 | 5차 | 6차 |
| Model PL | 5.38 | 5.43 | 5.73 | 8.85 | 10.13 | 11.93 | 15.16 | 16.46 | 18.61 |
| Model EB | 5.63 | 5.66 | 5.71 | 8.85 | 10.13 | 11.96 | 16.16 | 16.45 | 18.63 |

4.2 경기장 관람석의 진동해석

판요소로 이루어진 경기장 관람석과 등가 보요소로 치환한 경기장 관람석에 1.5Hz의 제자리떨에 의한 동적 하중과 발구름에 의한 동적하중을 경기장 관람석 전체에 가하였을 때 상단 관람석의 중앙부인 A점에서의 변위응답을 그림 11에 나타내었다.



(a) 제자리떨에 의한 변위응답

(b) 발구름에 의한 변위응답

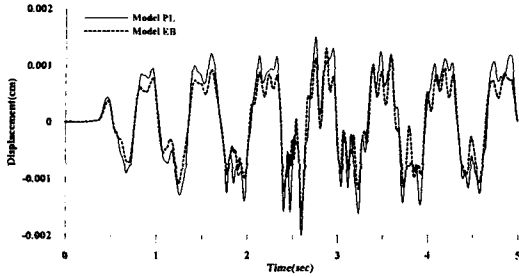
그림 11 제자리떨과 발구름에 의한 경기장 관람석의 변위응답

그림 11 (a)는 제자리떨에 의한 경기장 관람석의 변위응답을 시간영역에서 나타낸 것이다. 등가 보요소로 치환된 예제 구조물의 강성이 약간 크게 평가되어 있기 때문에 등가의 보요소로 치환한 예제구조물의 변위응답이 판요소로 이루어진 예제구조물의 변위응답보다 작게 나타나고 있다. 그림 11 (b)는 발구름에 의한 경기장 관람석의 변위응답을 시간영역에서 나타낸 것이다. 등가의 보요소로 치환된 예제 구조물의 변위응답과 판요소로 이루어진 예제구조물의 변위응답의 진폭이 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있으나 전체적인 응답의 양상은 매우 유사하다.

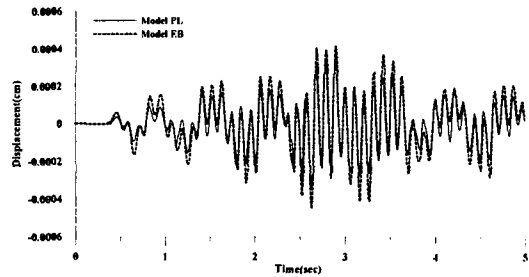
4.3 경기장 관람석 하부 바닥판의 진동해석

관람석 하부는 관리사무실 또는 선수대기실 등 다양한 용도로 쓰일 수 있는 공간이 될 수 있으므로 경기장 구조물의 사용성 평가에 있어서 관람석 하부 바닥판에서의 진동평가가 요구된다. 그림 12는 관람객들이 무작위로 제자리 떨 때 관람석 하부 바닥판 구조물의 진동응답을 나타낸 것이다. B점은 상단 관람석 하부 바닥판의 중앙점이며 C점은 하단 관람석 하부 바닥판의 중앙점이다. 그림 12 (a)는 B점에서의 변위응답으로 B점은 관람객이 움직임에 의한 동적하중이 C점보다 근접하여 작용하기 때문에 변위응답이 C점보다 크게 나타나며 응답이 양상이 하중의 양상과 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 12 (b)는 C점의 변위응답으로 응답의 양상이 모드진동수에 지배적으로 나타나고 있다. 관람석을 등가의 보로 치환하여 진동해석을 수행할 경우 판요소로 이루어진 경기장 구조물의 응답과 비교하여 진폭에 있어서 약간의 차이가 나타나지만 응답의 양상은

매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a) B점 변위응답



(b) C점 변위응답

그림 12 제자리뒹에 의한 관람석 하부 바닥판의 변위응답

5. 결 론

본 연구에서는 경기장 구조물의 거동을 정확하게 분석하기 위하여 관람객의 움직임에 의하여 발생하는 다양한 동적하중을 계측하고 분석하였다. 그리고 판요소로 구성된 관람석을 등가의 보요소로 치환하여 진동해석을 수행하는 새로운 방법을 제안하여 경기장 구조물의 진동해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 관람객에 의한 일시적인 동적하중은 충격하중의 양상을 가지고 있으며 관람객이 갑자기 앉을 때보다 일어설 때 크게 나타난다.

둘째, 발구름에 의하여 발생하는 주기적인 동적하중은 하중진동수의 정수배에서 진폭이 크게 나타나나며 제자리 뛰기에 의한 주기적인 동적하중은 하중진동수 성분에서 하중의 대부분이 나타난다.

셋째, 판요소 구성된 관람석을 등가의 보요소로 치환하여 진동해석을 수행할 경우 절점 수를 현저하게 줄일 수 있으며 경기장 구조물을 간단하게 모델링할 수 있으므로 경기장 구조물의 효율적인 진동해석이 가능하다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

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