

# 스타디움 구조물의 실용적인 진동해석을 위한 등가보요소의 적용

## Application of Equivalent Beam Element for Practical Vibration Analysis of Stadium Structure

김기철\*  
Kim, Gee-Cheol

### 국문요약

일반적으로 경기장 구조물은 고유진동수가 낮게 나타나고 있으며 관람객의 반복적인 움직임에 의하여 공진 또는 공진과 유사한 거동이 일어날 수 있다. 따라서 진동에 대한 경기장 구조물의 안전성 및 사용성 검토가 요구되고 있으며 이를 위한 실용적인 정밀해석이 필요하다. 경기장 구조물의 경제적이고 안전한 설계를 위해서는 경기장 구조물에 가해지는 동적하중과 경기장 구조물의 거동에 대한 정확한 분석이 있어야 한다. 경기장 구조물의 정확한 진동해석을 위해서는 경기장 구조물을 세분화하여 모형화해야 한다. 구조물을 세분화하여 모형화할 경우에는 절점 수가 매우 많아지므로 해석시간이 길어지게 되며, 절점수가 제한되어 있는 상용프로그램으로는 해석이 불가능할 수도 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 등가보요소를 이용한 경기장 구조물의 모형화 방법을 적용하여 진동해석을 수행할 경우에는 해석 구조물의 절점을 현저하게 줄일 수 있으므로 실용적인 정밀해석이 가능하게 된다.

**주요어** : 경기장 구조물, 관람객의 움직임, 사용성, 등가보요소

### ABSTRACT

In general, stadium structure with long span has low inherent natural frequency. In the stadium structure, structural behavior similar to resonance can be occurred easily by spectator rhythmical movements of which exciting period is small comparatively. It is required to investigate the safety and the serviceability of stadium structure. Therefore, there exists a necessity for accurate vibration analysis. Accurate analysis of stadium structure subjected to dynamic load is required for economical construction and safe design of stadium structure. Stadium structure should be modeled by refined mesh for accurate vibration analysis. As the mesh of stadium structure is refined, the number of divided elements increases in numerical analysis. The number of node is increased and numerous computer memories or computational time are required. So it is very difficult to analyze refine model of stadium structures by using the commercial programs. It is possible to efficient vibration analysis of stadium structure by finite element modeling method using equivalent beam element proposed in this paper, because the number of nodes is decreased remarkably.

**Key words** : stadium structure, spectator movements, serviceability, equivalent beam element

## 1. 서론

경기장 구조물에서는 관람객의 움직임에 의하여 공진 또는 공진과 유사한 거동이 일어날 수 있으며 이로 인하여 과도한 진동이 발생하게 된다. 경기장 구조물의 안전성 및 사용성 평가를 위하여 이러한 동적거동에 대한 검토가 요구되고 있다. 캐나다(NBCC)에서는 울동적인 움직임에 의한 구조물의 진동을 1970년부터 언급하기 시작하였으며, 1975년에는 사람의 움직임에 의하여 공진이 일어난 것을 방지하기 위하여 구조물의 고유진동수가 일정 진동수 이상이 되도록 하였다. 1985년에는 울동가진 동적하중과 구조물 응답에 대한 구조물의 설계기준이 소개되었으며 1990년의 개선된 설계기준에서는 가속도응답의 한계를 선정하여 구조물의 설계에 이용하였다. 그리고 미국(ATC, AISC)에서는 캐나다규준을 참조하여 구조물의 설계에 적용하고 있다.<sup>(1),(2),(3),(4)</sup>

경기장 구조물은 관람객이 앉아있는 관람석 구조물, 관람석을 지지하는 하부 구조물, 그리고 관람석 상부의 지

붕 구조물로 이루어져 있다. 관람객에 의한 동적하중이 직접 가해지는 관람석 구조물에서 진동이 크게 발생하며 관람석 하부의 골조와 바닥판에서도 관람객의 주기적인 움직임에 의하여 진동이 발생하게 된다. 그러므로 경기장 구조물의 진동에 대한 안전성 및 사용성 검토는 관람석 구조물과 하부의 바닥판 구조물을 대상으로 수행하게 된다. 경기장 구조물의 합리적인 설계를 위해서는 경기장 구조물의 동적거동에 대한 정확한 분석이 요구되며 정확한 분석을 위해서는 관람객의 움직임에 의하여 야기되는 실제적인 동적하중의 적용과 더불어 경기장 구조물의 해석모형을 조밀하게 하여 진동해석을 수행해야 한다. 경기장의 어느 한 부분이 아닌 전체 경기장 구조물을 세분화하여 진동해석을 수행할 경우에는 모형화가 매우 어려울 뿐만 아니라 절점 수가 매우 많아지므로 절점 수가 제한되어 있는 상용프로그램으로는 해석이 불가능할 수도 있다. 해석이 가능하다 하더라도 해석시간이 매우 길어져 실용적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 해석모형의 절점수를 크게 줄일 수 있으면서도 경기장 구조물의 동적특성을 비교적 잘 표현하고 상대적으로 정확한 진동응답을 얻을 수 있는 경기장 구조물의 실용적인 진동해석 방법을 제안하고자 한다.

\* 정회원 · 서일대학 건축과, 전임강사(대표전자:beat67@seoil.ac.kr)  
본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2004. 8. 27 / 심사종료일 : 2004. 9. 21)

## 2. 경기장 구조물의 실용적인 진동해석을 위한 모형화 방법

관람객이 위치하는 관람석 구조물은 대부분이 장경간의 프리캐스트 구조물로 낮은 고유진동수를 갖고 있으며 관람객의 반복적인 움직임에 의하여 과도한 진동이 발생할 수 있다.<sup>(5)</sup>

### 2.1 경기장 관람석 구조물의 모형화

경기장 구조물의 정밀 진동해석을 위하여 관람석 구조물을 세분화하여 진동해석을 수행하는 것이 바람직하다. 관람석의 좌석은 1단 또는 2단이 하나의 프리캐스트 구조물로 이루어져 있으나 그림 1과 같이 1단으로 이루어진 것이 대부분이다.<sup>(6)</sup> 그림 1은 인천문학 월드컵경기장에 사용된 1단 형태의 관람석 구조물로 길이 900cm, 너비 90cm, 두께 20cm되어 있으며 10cm×10cm×10cm의 입체요소를 사용하여 세분화한 것이다.

관람석 구조물의 동적특성은 그림 2와 같이 모형화에 사용되는 요소의 종류에 따라서 구조물의 강성과 질량이 다를 수 있다. 판요소를 사용하여 모형화한 경우에는 판의 중심선을 따라서 구조물이 모형화되기 때문에 강성과 질량이 무시되는 부분이 생기게 되며, 보요소를 사용할 경우에는 입체요소의 단면적을 그대로 적용하여 질량을 입체요소와 같게 적용할 수 있으나 강성을 제대로 고려할

수가 없다. 그러나 관람석 구조물의 단면특성을 계산하여 적용한 등가의 보요소로 적용할 경우에 관람석 구조물의 동적특성을 제대로 표현할 수 있을 것이다.

입체요소를 사용한 그림 1과 같은 관람석 구조물의 절점수는 3276개이며 판요소를 사용한 해석모형의 절점수는 입체요소 모형의 1/3인 1092개이다. 그리고 등가의 보요소를 사용한 해석모형의 절점수는 46개로 입체요소 모형의 약 1/70정도 된다. 경기장 같은 구조물의 진동평가에 있어서, 관람석을 입체요소나 판요소로 모형화하여 진동해석을 수행할 경우에 해석모형의 절점수가 많아 해석시간이 길게 소요되므로 비효율적일 수가 있다. 그리고 판요소를 사용하여 진동해석을 수행할 경우에는 입체요소를 사용하여 진동해석을 수행하는 경우보다 절점수를 1/3로 줄일 수 있지만 구조물의 질량과 강성을 정확하게 고려하지 못하므로 구조물의 동적특성을 제대로 표현하지 못한다. 그러므로 경기장 구조물의 실용적인 진동해석을 위하여 관람석 구조물의 동적특성을 제대로 표현할 수 있으며 절점수를 크게 줄일 수 있는 방법으로 그림 3과 같이 관람석 구조물을 등가의 보요소로 모형화 한다.

### 2.2 경기장 관람석 구조물의 동적특성

관람석 구조물의 모형화에 사용된 요소에 따라서 그림 4와 같이 관람석 구조물의 고유진동수와 모드형상이 다르

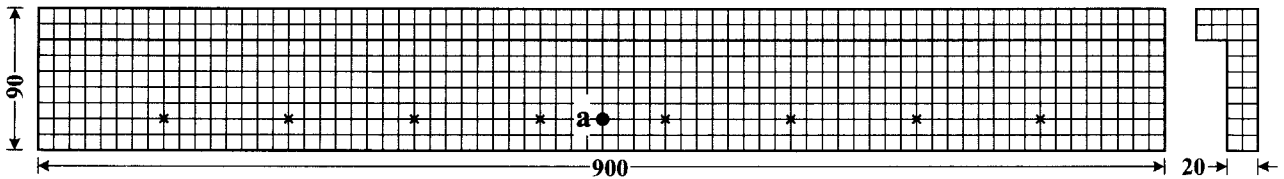


그림 1 관람석 구조물

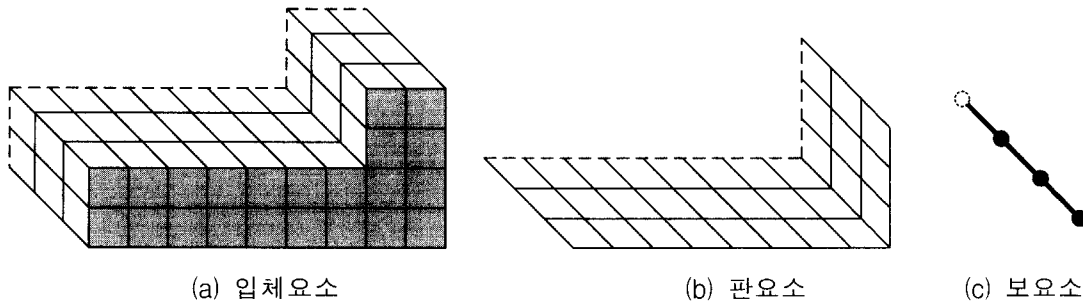


그림 2 관람석 구조물의 해석모형

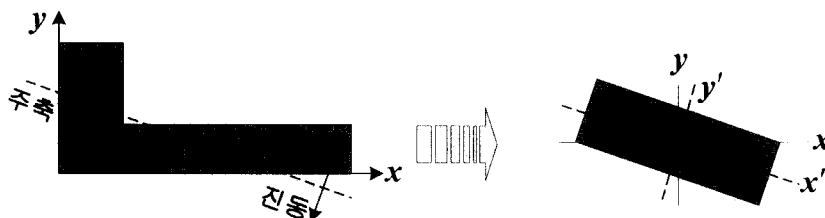


그림 3 관람석 구조물의 등가 보요소로 모형화

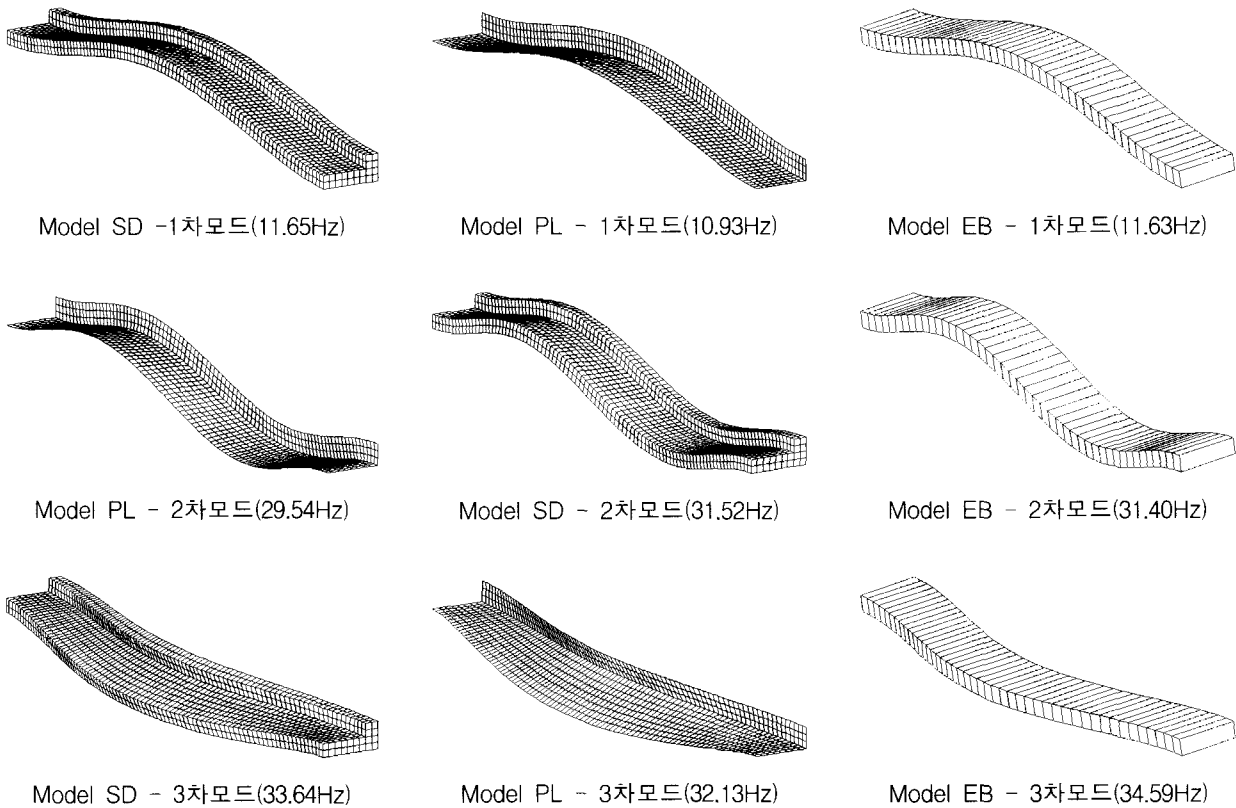


그림 4 해석모형에 요소에 따른 관람석 구조물의 진동모드 및 진동수

게 나타나는 것을 볼 수 있다. Model SD는 입체요소를 사용한 해석모형이며 Model PL은 판요소를 사용하여 모형화한 것이다. 그리고 Model EB는 관람석 구조물의 질량과 강성을 계산하여 등가의 보요소로 모형화한 것으로 해석모형의 경계조건을 양단 고정으로 하였다.

장경간의 관람석 구조물은 저차모드에서 연직모드가 많이 나타나고 있으며 단면의 특성상 비틀림 모드도 저차모드에서 나타난다. 연직모드는 1차와 2차 모드에서 순서대로 나타나고 있다. 3차 모드에서 강축에 대한 수평모드가 나타나고 있다. 진동모드의 순서는 같게 나타나는 것을 볼 수 있으나 판요소를 사용한 해석모형의 고유진동수는 다른 두 해석모형에 비하여 모드 진동수가 작게 나타나고 있다.

### 2.3 관람객의 주기적인 움직임에 의한 동적하중의 가진

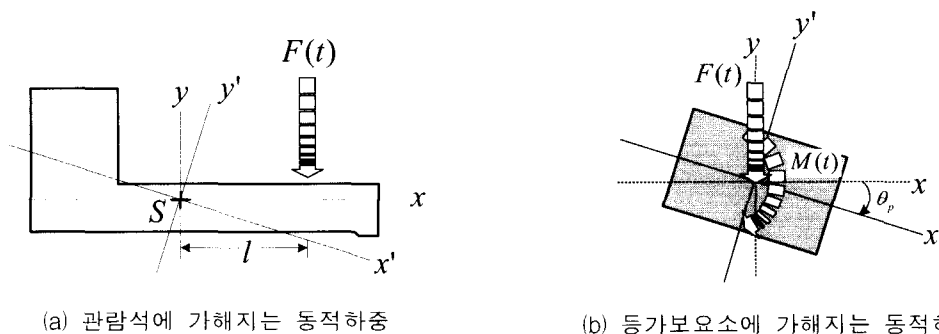
경기장 구조물에서는 관람객의 발 구르기, 제자리 뛰기

등과 같이 반복적으로 움직임에 의한 주기적인 동적하중이 작용한다. 판요소나 입체요소를 사용한 해석모형에서는 그림 5 (a)와 같이 발이 위치하는 지점에 이러한 동적하중을 연직방향으로 가하면 된다. 그러나 등가의 보요소로 이용한 해석모형에서는 그림 5 (b)와 같이 연직방향 동적하중과 동적하중에 대한 전단중심에서의 이격거리( $l$ )을 곱한 모멘트하중을 추가로 가해야 한다.

### 3. 예제 경기장 구조물의 진동해석

#### 3.1 예제 경기장 구조물의 진동모드

본 논문에서는 상용프로그램인 MIDAS/Gen을 사용하여 그림 6과 같은 경기장의 단위 골조 구조물을 진동해석하였다. 관람석의 크기와 단면은 그림 1과 같으며 경사보의 단면은 100cm×60cm 이며 기둥의 단면은 60cm×60cm



(a) 관람석에 가해지는 동적하중

(b) 등가보요소에 가해지는 동적하중

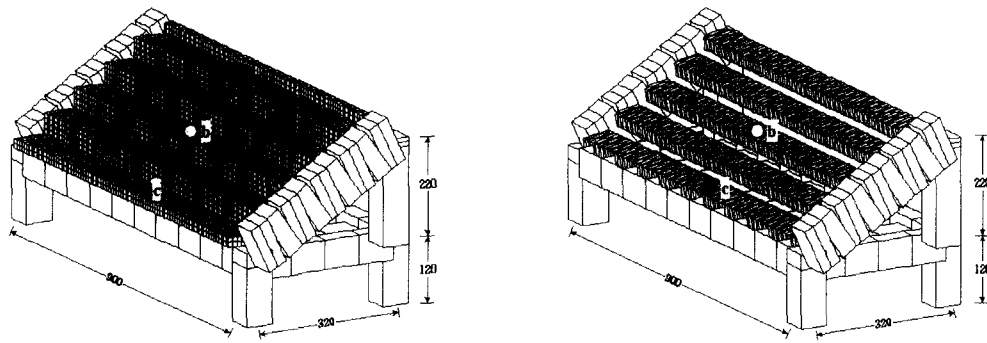
그림 5 등가보요소로 모형화한 관람석 구조물의 동적하중 가진

이다. 그리고 관람석 하부에 바닥판의 두께는 15cm로 하였으며 구조물의 감쇠비는 0.02를 적용하였다. 관람석을 입체요소로 모형화할 경우에는 절점수가 16439개, 판요소로 모형화할 경우에는 입체요소 모형의 1/3수준인 5521개이며 등가보요소 모형화할 경우에는 절점수가 538개로 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 판요소를 사용하여 경기장 구조물을 모형화할 경우에는 절점수를 1/3수준으로 줄일 수 있으나 앞서 살펴본 바와 같이 구조물의 강성과 질량이 올바르게 평가되지 못하여 진동응답에 오차가 발생할 수가 있다. 등가보요소를 사용하여 모형화할 경우에는 경기장 구조물의 동적특성을 제대로 표현할 수 있으며 절점수를 크게 줄일 수 있으므로 경기장 구조물의 효율적인 진동해석이 가능할 것이다.

예제 경기장 구조물의 관람석 진동모드는 근접한 진동수대역에서 여러 모드가 나타나고 있다. 그림 7은 관람석 구조물의 연직 1차와 연직 진동모드 형상 및 진동수를

나타낸 것으로 Model SD, Model PL 및 Model EB의 모드 형상과 진동수가 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 그림 8은 예제 경기장 구조물의 바닥판에 대한 연직 진동모드 형상을 나타낸 것으로 전형적인 바닥판 진동모드를 보여주고 있다. 그림 7과 그림 8에서 볼 수 있듯이 Model SD, Model PL 및 Model EB의 진동모드 형상이 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

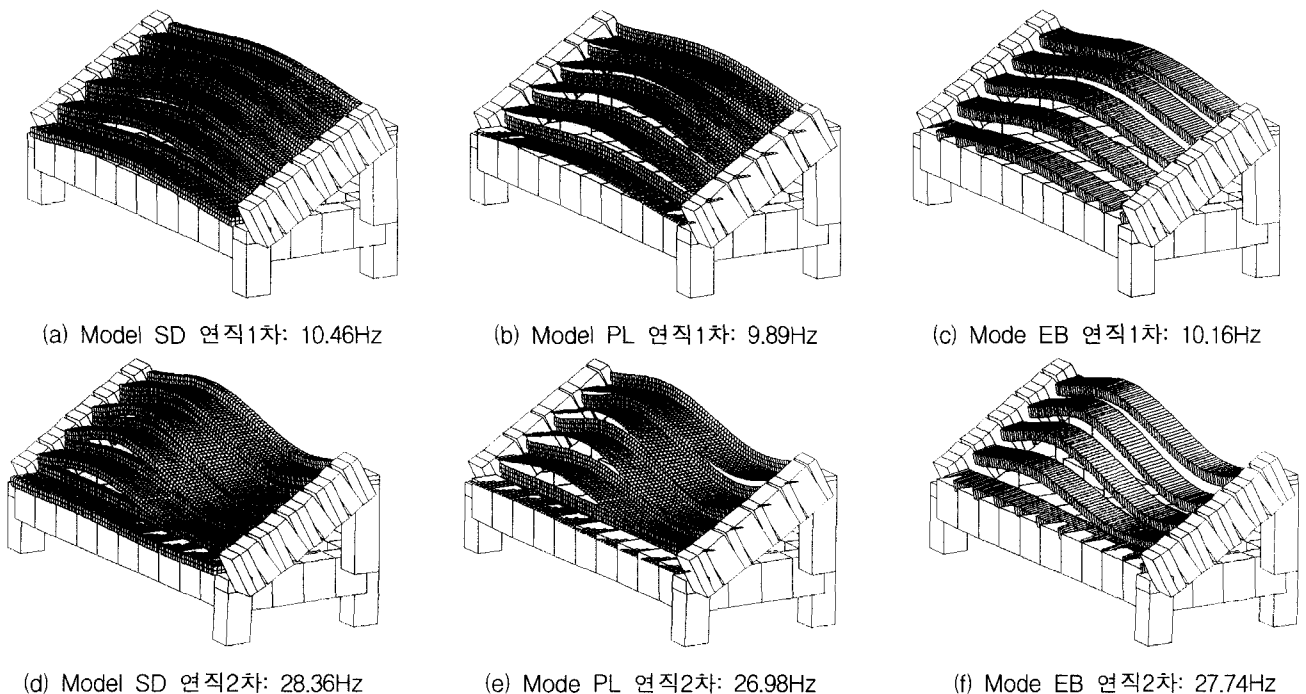
표 1은 예제 경기장 구조물의 모드별 고유진동수를 나타낸 것이다. 판요소로 예제 구조물을 모형화할 경우에는 예제 구조물의 질량과 강성을 제대로 고려하지 못하여 모드 진동수가 다른 모형에 비하여 낮게 나타나고 있다. 그리고 예제 경기장 구조물을 등가의 보요소로 모형화한 경우에는 입체요소로 모형화한 예제 구조물의 모드 진동수에 비하여 약간 낮게 나타나고 있지만 판요소로 모형화한 예제 구조물의 고유진동수에 비하여 그 차가 매우 적은 것을 볼 수 있다. 따라서 경기장 구조물을 등가의 보요소



(a) 입체요소 해석모형 (Model SD)

(b) 등가보요소 해석모형 (Model EB)

그림 6 예제 경기장 구조물



(a) Model SD 연직1차: 10.46Hz

(b) Model PL 연직1차: 9.89Hz

(c) Model EB 연직1차: 10.16Hz

(d) Model SD 연직2차: 28.36Hz

(e) Model PL 연직2차: 26.98Hz

(f) Model EB 연직2차: 27.74Hz

그림 7 관람석 구조물의 연직 진동모드

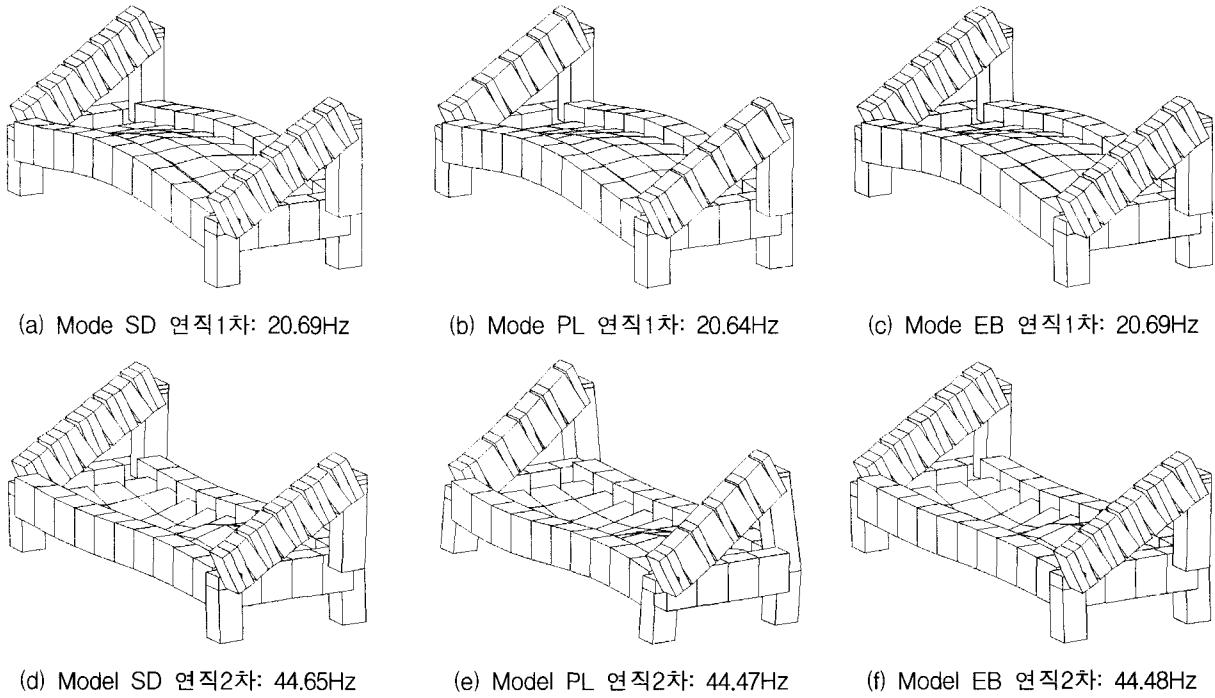


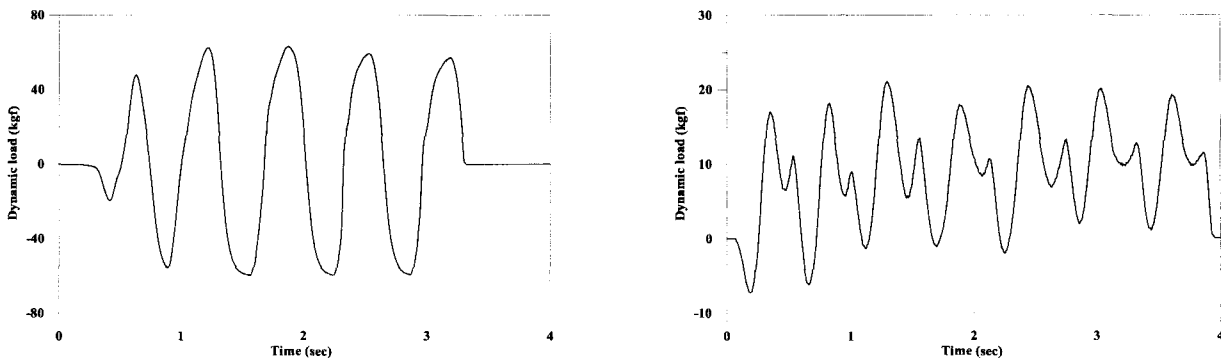
그림 8 관람석 하부 바닥판 구조물의 연직 진동모드

로 모형화하여도 경기장 구조물의 동적특성을 비교적 잘 표현할 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 관람객의 주기적인 움직임에 의한 예제 경기장 구조물의 진동응답

다수의 관람객에 의하여 야기되는 동적하중은 관람석이 일정한 간격으로 배치되어 있으므로 일정한 거리를 두고 가해야한다. 그리고 주기적인 신호에 대한 관람객들의 움직임은 신호를 인지하는 시각이 사람마다 약간의 차이

를 보일 수 있다. 그러므로 다수의 관람객에 대한 경기장 구조물의 진동해석을 위해서는 관람객에 의한 동적하중에 시간차(time lag)를 두고 가해야 할 것이다. 본 논문에서는 무리에 의한 경기장 구조물의 진동해석을 수행하기 위하여 그림 9와 같은 1.7Hz의 진동수를 갖는 발구름과 1.5Hz의 진동수를 갖는 제자리 뒸에 의한 동적하중을 계측하여 적용하였다. 관람객에 의한 동적하중을 그림 7과 같은 예제 경기장 구조물의 세 번째 관람석에 그림 1과 같이 ×표시된 곳에 시간차를 두고 무작위로 가하였다. 여기서 시간차는



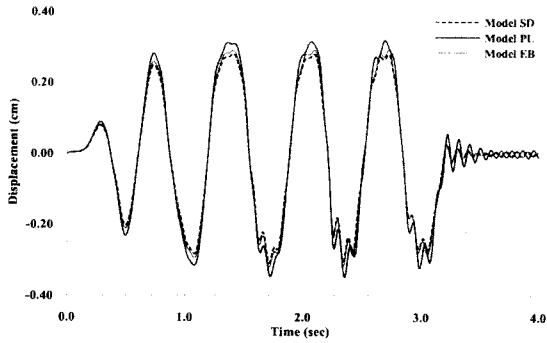
(a) 제자리 뒸에 의한 동적하중

(b) 발 구름에 의한 동적하중

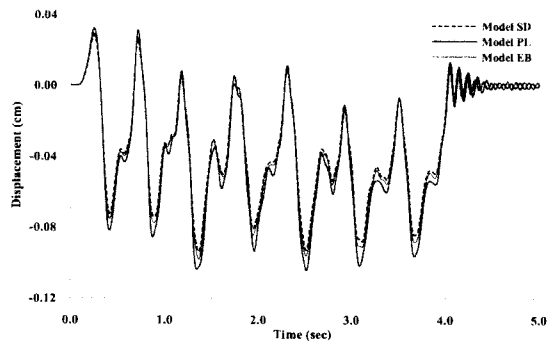
그림 9 관람객에 의한 주기적인 동적하중

표 11 경기장 구조물 모드별 진동수 (단위:Hz)

Mode	관람석 진동모드						바닥판 진동모드		
	1차	2차	3차	4차	5차	6차	1차	2차	3차
Model SD	10.46	11.32	11.59	28.36	31.13	31.34	20.70	25.59	44.65
Model PL	9.89	10.64	10.89	26.98	29.25	29.43	20.64	25.55	44.46
Model EB	10.16	11.19	11.50	27.73	30.84	31.04	20.69	25.56	44.48

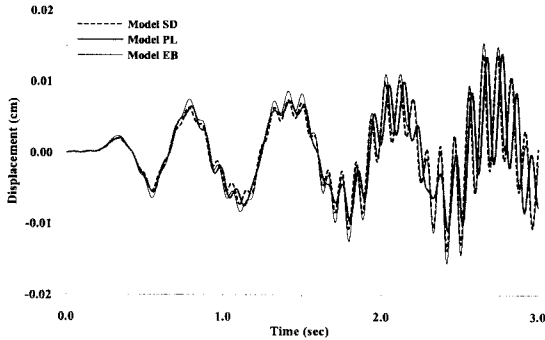


(a) 제자리 땀에 의한 변위응답

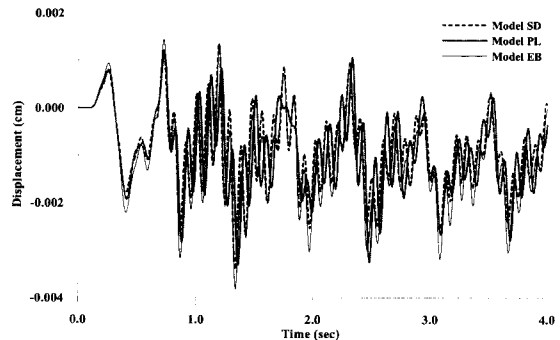


(b) 발 구름에 의한 변위응답

그림 10 동적하중 가진 관람석에서의 변위응답

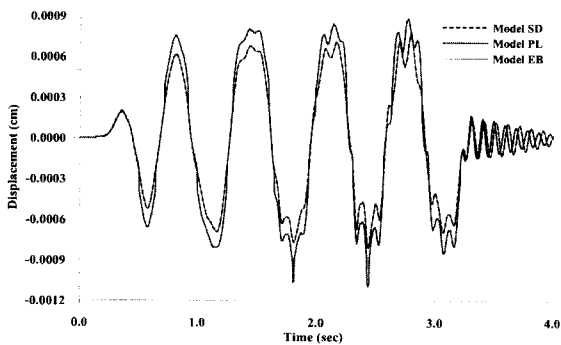


(a) 제자리 땀에 의한 변위응답

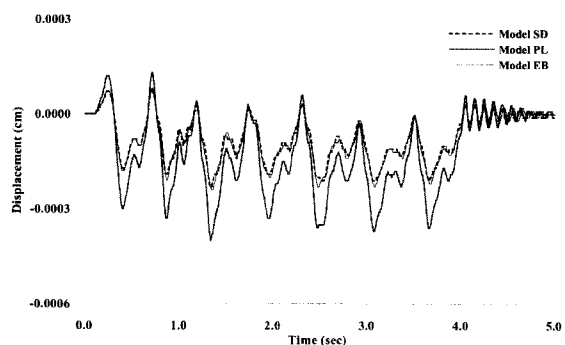


(b) 발 구름에 의한 변위응답

그림 11 동적하중 비가진 관람석에서의 변위응답



(a) 제자리 땀에 의한 변위응답



(b) 발 구름에 의한 변위응답

그림 12 경기장 관람석 하부 바닥판의 변위응답

동적하중주기의 1/10을 관람객 수로 나눈 값이다.

그림 10은 동적하중 가진 관람석인 세 번째 관람석 b 점에서의 진동응답을 나타낸 것이며 그림 11은 동적하중 비가진 관람석인 첫 번째 관람석 c점에서의 진동응답을 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 제자리 땀에 의한 경기장 관람석의 변위응답을 나타낸 것이다. 그림 7의 모드별 고유진동수에서 알 수 있듯이 판요소의 강성이 약간 낮게 고려되어 있으므로 판요소로 모형화한 경기장 구조물의 변위응답이 약간 작게 나타나고 있다. 입체요소로 모형화 된 예제 구조물의 변위응답과 등가 보요소로 치환된 예제 구조물의 변위응답이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 10(b)는 발 구름에 의한 경기장 관람석의 변위응답을

나타낸 것으로 제자리 땀에 의한 변위응답과 양상이 비슷하다. 등가의 보요소로 치환된 예제 구조물의 변위응답과 입체요소로 모형화한 예제 구조물의 변위응답과 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 그림 11은 동적하중이 가진되지 않는 관람석에서의 변위응답을 나타낸 것으로 그림 10과 마찬가지로 판요소로 모형화한 예제 구조물의 변위응답보다 등가보요소로 모형화한 예제 구조물의 변위응답이 입체요소로 모형화한 예제 구조물의 변위응답에 보다 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

관람석 하부의 바닥판은 관리사무실 또는 선수대기실 등 다양한 용도로 쓰일 수 있는 공간이므로 경기장 구조물의 사용성 평가에 있어서 관람석 하부 바닥판의 진동평

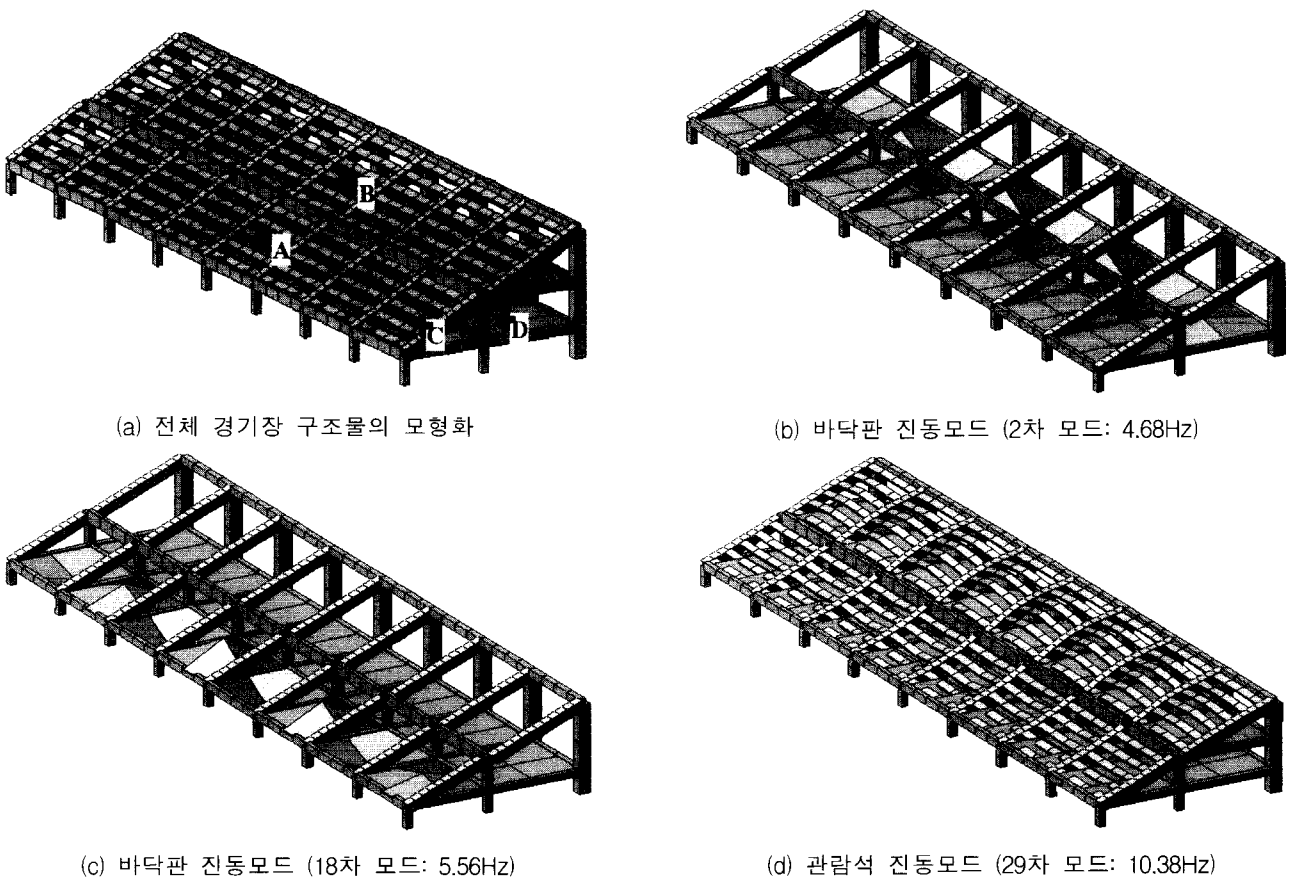


그림 13 전체 경기장 구조물의 해석모형 및 진동모드

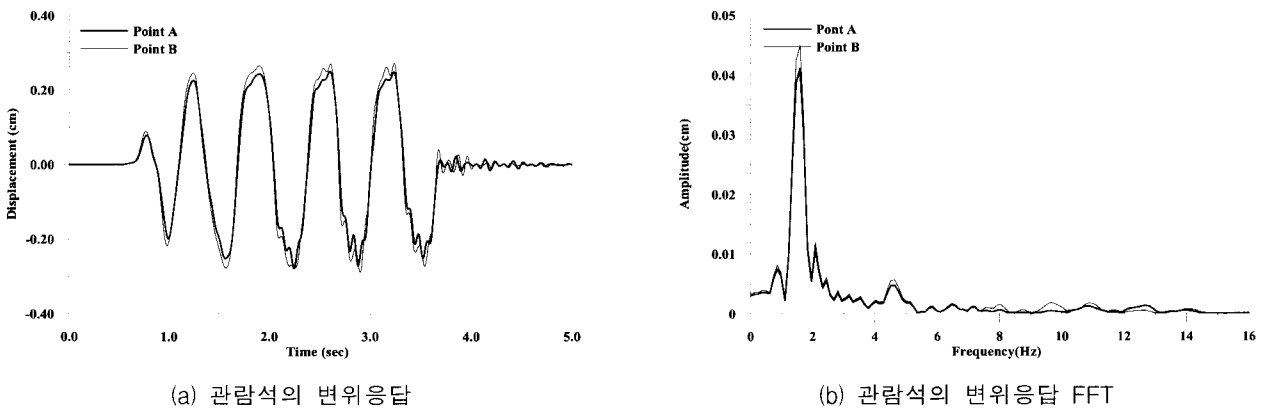


그림 14 경기장 구조물 관람석에서의 변위응답

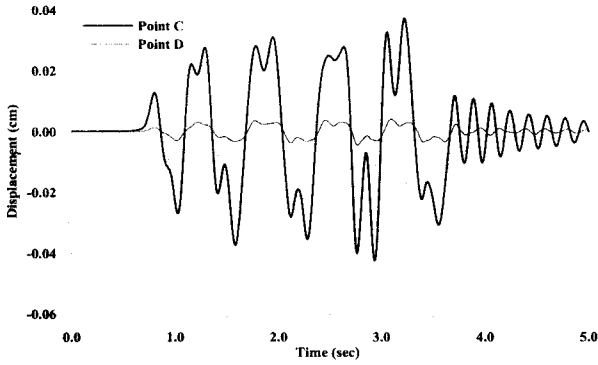
가가 요구된다. 그림 12는 관람객들이 무작위로 제자리  
떨 때와 발을 구를 때 야기되는 관람석 하부 바닥판 중  
앙에서의 진동응답을 나타낸 것이다. 그림 12(a)는 무리  
의 관람객이 제자리 떨 때 야기되는 바닥판의 변위응답으  
로 판요소로 모형화된 예제 경기장 구조물의 변위응답이  
약간 크게 나오고 입체요소 해석모형과 등가보요소 해석  
모형의 변위응답은 매우 비슷한 것을 볼 수 있다. 그림  
12(b)는 무리의 발 구름에 의한 관람석 하부 바닥판의 변  
위응답으로 제자리 뒹에 의한 변위응답과 비슷한 양상을  
보여주고 있다. 관람석을 판요소로 모형화한 예제 구조물  
의 변위응답이 입체요소 해석모형과 등가보요소 해석모형  
의 변위응답과 약간의 차이가 나타나지만 응답의 전체적

인 양상은 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 등가보요  
소 사용한 해석모형의 진동응답과 입체요소를 사용한 해  
석모형의 진동응답이 미소한 차이를 보이는 것은 관람석  
구조물의 비틀림강성을 등가보요소 해석모형에 정확하게  
고려하지 못하였기 때문이다.

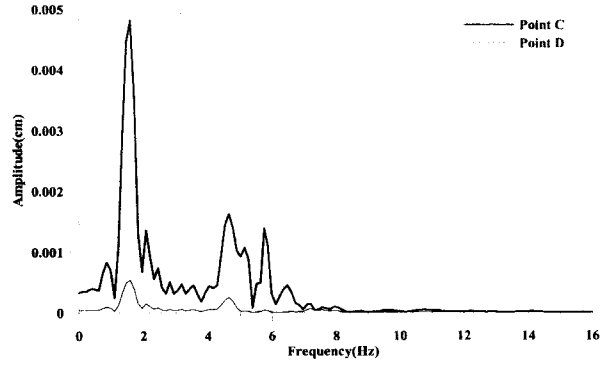
#### 4. 전체 경기장 구조물 실용적인 진동해석

##### 4.1 전체 경기장 구조물의 진동모드 및 진동수

일반적인 경기장 구조물은 그림 6과 같은 단위 골조  
구조물이 연속되어 있으며 그림 13은 인천문학 월드컵



(a) 관람석 하부 바닥판의 변위응답



(b) 관람석 하부 바닥판의 변위응답 FFT

그림 15 경기장 구조물 관람석 하부 바닥판에서의 변위응답

경기장의 길이방향 관람석의 일부분으로 단위 골조 구조물이 8개 연속되어 있다. 이러한 경기장 구조물을 입체요소나 판 요소로 모형화할 경우에는 절점수가 너무 많아 상용프로그램으로는 모형화가 불가능할 수도 있으며 모형화가 가능할지라도 해석시간이 너무 많이 소요되어 비효율적일 수가 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 관람석 구조물의 모형화 방법을 사용하면 해석모형의 절점수를 현저하게 줄일 수 있으며 비교적 정확한 진동응답을 얻을 수 있으므로 효율적이며 실용적인 진동해석이 가능할 것이다. 동적하중을 무작위로 가하기 위하여 하중주기인 1/1.5초의 1/10을 관람객 수만큼 나누어서 무작위로 시간차를 두고 가하였다. 점 A는 밑에서 세 번째 관람석의 중앙이며 점 B는 밑에서 여덟 번째 관람석의 중앙이다. 그리고 점 C와 D는 관람석 하부 바닥판의 단위 프레임의 중앙으로, 점 C는 관람석에서 가까운 바닥판의 중앙이며 점 D는 관람석에서 약간 떨어진 바닥판의 한 지점을 의미한다.

그림 13(a)는 경기장 구조물의 진동모드로 단위 프레임이 여러 개 연속되어 있으므로 비슷한 진동수 대역에서 유사한 여러 진동모드가 나타나고 있다. 그림 13(b)와 그림 13(c)와 같이 관람석 하부 바닥판 슬래브의 진동모드가 6Hz이하에서 먼저 나타나고 있으며 그림 13(d)와 같은 관람석의 진동모드가 고차모드에서 나타나고 있으며 관람석 진동모드의 진동수가 그림 7의 단위 경기장 구조물의 관람석 진동모드의 진동수(10.16Hz)와 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

#### 4.2 전체 경기장 구조물의 진동응답

관람객의 주기적인 움직임에 의한 동적하중은 관람객에 의한 충격하중에 비하여 크기는 작으나 주기적인 성격을 가지고 있어 관람객의 움직임의 주기가 경기장 구조물의 진동주기와 유사할 경우에 구조물에 심각한 영향을 줄 수 있다.

그림 14와 그림 15는 관람객의 제자리 땀에 의한 경기장 구조물의 변위응답을 나타낸 것이다. 그림 14(a)에서 볼 수 있듯이 하단 관람석(점 A)과 상단 관람석(점 B)의

변위 응답이 유사하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 14(b)는 변위응답을 FFT한 것으로 하단 관람석과 상단 관람석에서의 양상이 매우 유사한 것을 볼 수 있다.

그림 15(a)는 관람석 하부 바닥판 슬래브에서의 변위 응답을 시간영역에서 나타낸 것이다. 점 C의 응답이 점 D의 응답보다 크게 나타나는 것은 점 C가 점 D보다 관람석에서 가까이 관람객의 움직임에 의한 동적하중의 영향이 더 크게 미치기 때문이다. 그림 15(b)는 바닥판 슬래브의 변위응답을 FFT한 것으로 응답의 진폭은 다르나 응답이 크게 나타나는 진동수 대역은 같은 것을 볼 수 있다.

전체 경기장 구조물의 관람석을 등가보요소, 판요소, 입체요소로 모형화하여 진동해석을 수행할 경우에 소요되는 해석시간을 표 2에 나타내었다. 관람석 구조물을 입체요소나 판요소를 모형화할 경우의 자유도수와 해석시간을 추정하여 나타낸 것이다. 등가 보요소로 모형화하여 진동해석을 수행한 경우에는 약 1시간 정도의 해석시간이 소요되지만 입체요소나 판요소로 모형화하여 진동해석을 수행한 경우에는 하루 이상의 해석시간이 소요되어 엔지니어가 업무를 수행하기에는 비효율적인 것을 알 수 있다. 따라서 경기장 구조물의 진동해석에 있어서 비교적 정확한 진동응답을 구할 수 있으며 해석시간에 있어서 효율적인 방법으로 본 논문에서는 경기장 구조물의 실용적인 진동해석 방법을 제안하였다. 이 방법을 적용할 경우에는 컴퓨터 메모리와 해석시간을 현저하게 줄일 수 있어 엔지니어가 효율적으로 업무를 수행할 수 있을 것이다.

표 2 경기장 구조물의 모형화에 따른 자유도수 및 해석시간

모형화 요소	입체요소	판요소	등가 보요소
자유도수 (DOF)	약 405,000	약 266,000	25,632
해석시간	약 38시간	약 20시간	1시간 2분 20초



## 5. 결론 및 추후 연구과제

## 참고 문헌

본 논문에서 제안한 경기장 구조물의 실용적인 진동해석 방법을 적용하여 예제 경기장 구조물의 진동해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 경기장 구조물을 등가보요소로 모형화한 해석모형이 판요소로 모형화한 해석모형보다 경기장 구조물의 진동모드와 진동수를 보다 정확하게 표현할 수 있다.

둘째, 판요소를 사용한 경기장 구조물의 진동응답보다 등가보요소를 사용한 경기장 구조물의 진동응답이 입체요소를 사용한 경기장 구조물의 진동응답에 잘 일치한다.

셋째, 본 논문에서 제안한 방법으로 경기장 구조물의 진동해석을 수행할 경우에 정확한 진동응답을 얻을 수 있으며 해석모형의 절점 수를 현저하게 줄일 수 있어 실용적인 진동해석이 가능하다.

본 논문에서는 수치해석에 국한하여 연구를 수행하였으나 본 논문에서 제시한 방법의 효용성에 대한 검증은 위해서는 경기장 구조물의 실제 계측응답과 해석응답과의 비교 분석이 필요하리라 판단된다.

1. 김기철, 이동근, "보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제1호, 2001. 2.
2. NBCC, *Serviceability Criteria for Deflections and Vibrations, Commentary A, Supplement to the National Building Code of Canada*, National Research Council of Canada, Ottawa, 1990.
3. AISC, *Floor Vibrations Due to Human Activity*, Steel Design Guide Series 11, American Institute of Steel Construction, 1997.
4. ATC, *Minimizing Floor Vibration*, ATC Design Guide 1, Applied Technology Council, 1999.
5. Christopher Y. Tuan and William E. Saul, "Loads Due to Spectator Movements," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 2, 1985. 2, pp 418~434, ASCE, February, 1985.
6. 한국구조기술사회, 2002 FIFA 월드컵 한국 스타디움 구조계획 자료집, 1999.