장스팬 다목적 홀의 동적특성과 사용성

The Dynamic Characteristics and Serviceability of Long Span Multi-purpose Hall

이 성 민* 최 취 경** 안 영 기*** 이 수 곤****

Lee, Sung-Min Choi, Chui-Kyung An, Young-Ki Lee, Soo-Gon

Abstract

Because structural systems are becoming lighter and more flexible and have lower natural frequencies and dampings than before, coordinated rhythmic activities such as dancing, audience participation in arenas or concert halls, and aerobics result in undesirable levels of vibration. For rhythmic activities, it is resonant or near resonant behavior that result in significant dynamic amplification and hence human discomfort. The most rational design strategy is to provide enough of a gap between the natural frequency of a floor system and the dominant frequencies excited by planned human activities to assure reasonably that resonance will not occur. For the case study the vibration measurements were performed at the floor of a long-span multi-purpose hall during the rock concert of popular singer.

요 지

최근 구조해석기법이 발달하고 구조재료가 고강도화 함에 따라 건물의 스팬이 점점 길어지고 따라서 바닥의 고유진동수와 감쇠능력이 낮아지고 있다. 이로 인해 과거에는 고려하지 않았던 진동문제가 빈번하게 대두되고 있으며, 구조체의 고유진동수가 사람이 민감하게 느끼는 범위에 들기 쉬우며, 더욱이 군중들이 모여서 뛰고 하는 장소는 바닥판의 고유진동수와 가진진동수가 근접함으로 인한 증폭현상이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 스팬이 33m로서 장스팬인 다목적 홀을 대상으로 진동측정을 하여 고유진동수와 감쇠를 측정하였고, 본 장소에서 국내 유명가수의 공연시 진동을 측정하여 진동실태를 조사하였다. 조사결과 2차 하모닉과 바닥판의 고유진동수가 근접할 때 공진현상이 발생함을 알 수 있었으며, 이렇게 조사한 자료를 바탕으로 설계·유지관리시 고려해야 할 사항들을 검토하였다.

Keywords : Floor vibration, harmonic, rhythmic activity, serviceability, resonance

핵 심 용 어 : 바닥 진동, 하모닉, 율동, 사용성, 공진

* 정회원, 한국건설품질연구원 이사

** 정회원, 경원전문대학 건축과 교수

*** 정회원, 쌍용엔지니어링 대표이사

**** 정회원, 전남대학교 건축학과 교수

E-mail : safecity@kcqr.co.kr 031-750-6760

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

구조물이나 구조부재가 구조적인 면에서 그 의도된 목적에 적합하지 않게 되는 상태를 한계상태(limit state)라고 하는데 한계상태의 개념은 다음의 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 극한한계상태(ultimate limit state)로서 구조물의 전부 또는 일부가 최대 내력에 도달함으로써 파괴 또는 붕괴되어 인명이나 재산상 중대한 피해를 가져오는 상태이며 둘째는 사용성한계상태(serviceability limit state)로서 건물 일부분이 국부적으로 손상을 입거나 진동, 과다한 변위, 오염 등이 허용 범위를 벗어나 건물 기능상의 장애를 입는 상태이다(Ad Hoc Committee on Serviceability Research, 1986). 현대 건축에서는 구조해석기법이 발달하고 구조재료가 고강도화 함에 따라 건물 스팬이 점점 더 길어지고 경량화 되고 있으며, 바닥판의 강성이 낮아지고 고유진동수와 감쇠능력도 낮아지고 있다. 이로 이해 과거에는 고려되지 않았던 처짐과 진동에 의한 사용성 문제가 빈번하게 대두되고 있다. 반면 전시, 공연, 연회 등의 다목적 행사를 유치할 수 있는 대형 컨벤션 센터가 곳곳에 건립됨에 따라 지금까지는 신중하게 고려되지 않았던 장스팬 공간에서의 율동에 의한 진동 문제가 표면화되고 있다. 따라서 앞으로 장스팬 다목적 홀을 설계할 때 율동행위에 의한 공진가능성 여부를 판단하여야 하며 따라서 고유진동수를 염두에 둘 필요가 있다. 본 연구에서는 최근 건축된 스팬이 33m인 장스팬 다목적 홀을 대상으로 고유진동수와 감쇠를 측정하였고, 본 장소에서 빠른 음악을 구사하는 국내 유명가수의 공연시 진동을 측정하여 진동실태를 조사하였다. 이렇게 조사한 자료를 기존의 연구결과와 비교, 향후 다목적 홀 설계 및 유지관리시 고려해야 할 사항을 제시하는 과정으로 연구를 수행하였다.

2. 장스팬건물의 진동

2.1 사람의 감각과 진동

진동문제의 대부분은 거주자로 하여금 불안하게 하고 불편하게 하는 '사용성'에 관한 사항이다. 건물이 안전하다고 해도 사람들은 건물이 흔들릴 때 불안해 할 수 있다. 이렇게 일반인이 참기 어려울 정도의 건물의 진동을 '사용성한계상태'로 정의한다. 자동차나 비행기에서 승객들은 5~8Hz의 움직임에 가장 불쾌한 반응을 보이는데, 이는 그것은 우리 늑골 내와 배속 장기의 고유진동수가 이 범위에 있어 공진을 일으키기 때문이다. 실제로 바닥진동에 의해 문제가 된 대부분의 경우 바닥구조의 1차 고유진동수가 5~8Hz 범위였다고 한다(Murray, 1991). 또한 1~8Hz의 진동수 범위에서 괴로움을 느끼기 시작하는 단계는 연속진동의 경우 대략 0.005~0.01g(0.05~0.10㎟/s)이며, 일시적인 진동의 경우는 감쇠율이 6%인 구조에서 0.05g 정도라고 한다. 사람은 짧은 진동보다 연속진동에 더 민감하다(Ellingwood, 1989).

2.2 장스팬 건물의 동적 특성

주거건물은 대개 고유진동수가 15~30Hz로 별문제가 없다. 사람이 참을 수 있는 한계가 더 높은데다가 감쇠율이 매우 높기 때문이다. 반면 스팬이 9m가 넘는 사무소건물이나 다중이용시설 등은 감쇠율을 증가시킬 칸막이가 없으며 바닥 마감이 없을 경우 진동문제가 발생할 가능성이 높다. 철골보에서 스팬/춤 비가 20 이상이거나 콘크리트 슬래브 두께가 10㎝ 이하일 경우 일반적으로 진동문제가 발생하기 쉽다. 이러한 바닥 시스템의 고유진동수는 4~10Hz의 범위를 갖는다. 군중들이 모여서 뛰고 하는 장소는 특히 동적 거동의 영향을 받기 쉽다. 록콘서트가 열리고 있는 동안 프리캐스트 콘크리트 관람석에서 0.3g 이상의 가속도가 측정된 적이 있다고 한다(Ellingwood, 1984).

건물 구조형식과 스팬의 길이에 따른 바닥판의 고유진동수는 Fig. 1과 같다(일본건축학회, 1991). 연구결과에 의하면 무도장이나 체육관 바닥의 최저 고유진동수는 철근콘크리트조 7Hz, 스틸-조이스트 콘크리트 슬래브 8Hz로 제시되고 있다(Murray, 1991). 또 진동이 소멸하기까지 소요되는 시간은 진동체의 감쇠능력에 따라 결정되는데 특히 일시진동의 진동문제에 매우 민감한 요인이다.

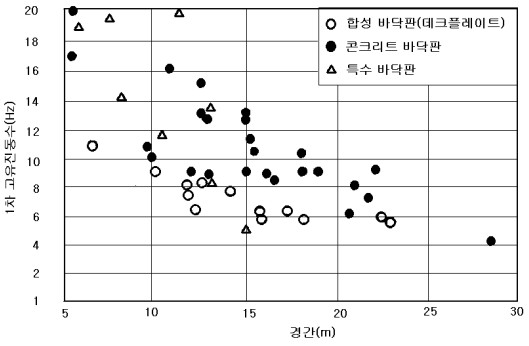

Fig. 1 스팬에 따른 바닥판의 고유진동수(일본건축학회, 1991)

2.3 진동수의 영향

리듬에 맞춰 반복해서 움직이는 관객들의 동작은 대개 2.0~3.0Hz 범위인데 이를 스텝진동수(step frequency) 또는 1차 하모닉(harmonic)이라고 한다. 또한 1차 하모닉 진동수의 2배, 3배가 되는 진동수에서도 조화진동이 발생하는데 이를 각각 2차, 3차 하모닉이라고 한다. 사람들이 많이 모이는 장스팬구조의 바닥판은 고유진동수가 2차 및 3차 하모닉 범위에 들기 쉽기 때문에 1차뿐 아니라 2차 또는 3차 하모닉에 의한 공진의 문제가 발생할 수 있다(Allen, 1998).

가진주파수와 고유진동수가 거의 일치하면 맥노리현상(beats)이 발생한다. Fig. 2는 맥노리현상의 개념을 보여주고 있는데 가진진동수와 고유진동수의 차이가 적을수록 진폭이 커진다. 이때 응답곡선 $x(t)$와 맥노리주기 τ_b는 각각 식(1), 식(2)와 같다.

$$x(t) = \left(\frac{F_o/m}{2\varepsilon\omega} \sin \varepsilon t \right) \sin \omega t \qquad (1)$$

$$\tau_b = \frac{2\pi}{2\varepsilon} = \frac{2\pi}{\omega_n - \omega} \qquad (2)$$

2.4 율동과 진동에 대한 기준

설계시 진동에 대한 문제가 반영되어야 하지만 아직 우리나라에서는 규정된 바 없다. 진동에 대한 문제는

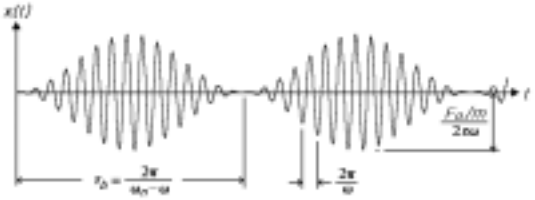

Fig. 2 맥노리현상의 개념

구조체의 고유진동수와 감쇠율, 가진진동수와 가진력, 그리고 건물의 용도에 따라 결정이 된다. 건물 용도와 거주자의 특성에 따라 거주자의 진동에 대한 반응이 다르므로 설계시 이점이 고려되어 차등적으로 검토되어야 할 것이다. 특히 규준상의 처짐 한계나 스팬/춤비의 제한을 너머 인체공학적 차원에서 한계상태를 규정해야 한다. 율동행위에 대한 진동한계기준치를 제시하고 있는 것은 ISO와 NBC 이다.

ISO(International Standards Organization)에서는 인체에 대한 노출기준을 ISO 2631-2 (1980)에서 규정하고 있다. 이 규정은 1~80Hz의 진동수 범위에서 건물의 용도별 허용 경계치를 진동수에 대한 최대가속도 진폭에 대해서 보여주고 있는데(Fig. 3), 4Hz~8Hz의 진동수 범위에서 가장 엄격한 제한을 하고 있음을 알 수 있다.

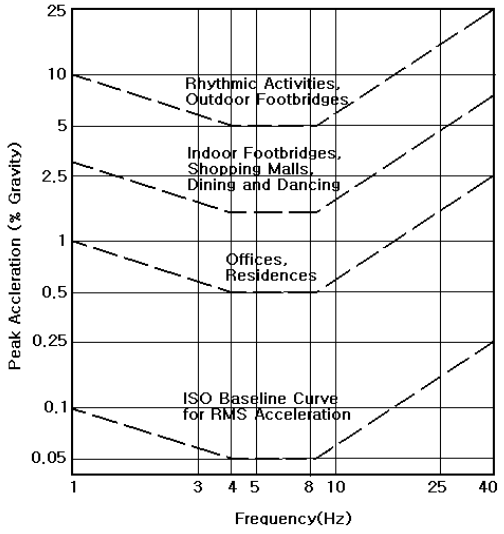

Fig. 3 ISO 기준 (1980)

National Building Code of Canada commentary 4(NBC, 1990)에서도 용도에 따른 사용성 한계기준을 중력가속도에 대한 비로 규정하고 있다. Eurocode No.3(1990)에서는 뛰고 춤추고 하는 체육관이나 무도장과 같은 건물 바닥판의 고유진동수는 5Hz 이상이 되어야 한다고 규정하고 있다.

3. 현장실측 및 분석

3.1 측정개요

연구를 위해 2001년 8월과 11월, 두 차례에 걸쳐 율동을 많이 사용하는 국내의 유명가수 공연시 진동을 측정하였다. 대상 건물의 5층 다목적 홀은 경간이 33m인 트러스 두 개가 이어져 총 길이가 66m이다. 바닥구조는 H형강으로 조립된 트러스 구조로서 트러스의 높이는 1.8m이고 슬래브 콘크리트의 두께는 25㎝이다. 설계 적재하중은 800㎏으로서 차량통행이 가능하도록 설계되었다. 바닥판 프레임의 개요도는 Fig. 4와 같다.

3.2 현장실측 및 데이터 처리

계측장비로는 strain gauge type 3축 가속도계와 bar type 변위계 및 이동식 진동측정기 Blastmate Ⅲ가 사용되었다. 가속도계는 5층 바닥 무대측 트러스와 객석측 트러스 중앙에 각각 1개소씩 설치하였고, 변위계는 5층 하부(3층 상부) 무대측 트러스에 1개소와 객석측 트러스에 2개소 설치하여 공연 시작 30분 전부터 공연 끝날 때까지 진동을 측정하였다. Blastmate Ⅲ로는 상황에 따라 수시로 장소를 이동하며 진동 속도를 측정하였다. 이때 청중의 수는 두 번 공연 모두 2500~3000명이었던 것으로 추정되었다.

Table 1 NBC 진동평가기준

진동의 영향을 받는 용도	가속도한계(% 중력)
Office, Residential	0.4~0.7
Dining & Weightlifting	1.5~2.5
Rhythmic Activity only	4.0~7.0

가속도계와 변위계로 측정한 데이터는 변형율 측정기인 MT16A에서 수집하여 컴퓨터에 저장하였으며 데이터처리용 전산 프로그램 SAS를 이용하여 데이터 분석을 하였다. BlastmateⅢ를 이용하여 수집한 진동계측 결과는 Blastware 및 Excel 프로그램을 이용하여 자료형식을 변환한 후 Origin 4.1을 통해 F.F.T.(Fast Fourier Transform)분석을 실시하여 진동수 성분을 분석하였다. 자료처리과정은 Fig. 5와 같다.

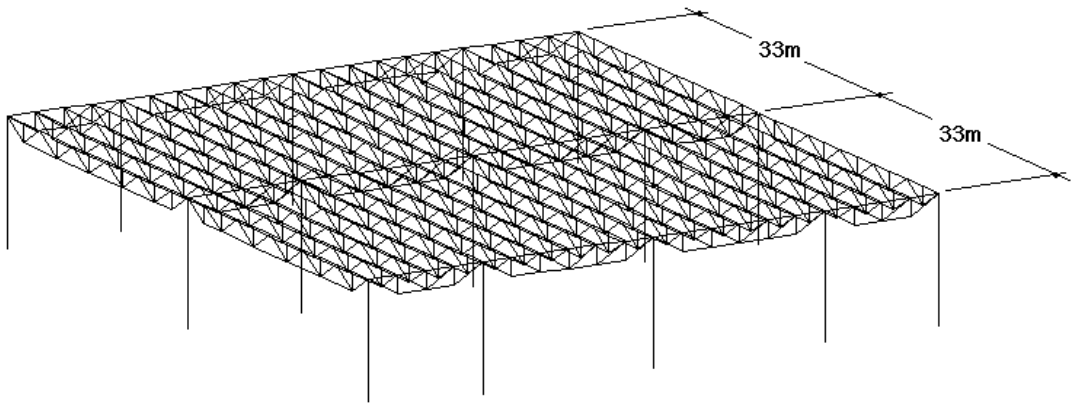

Fig. 4 대상 바닥판 구조 투시도

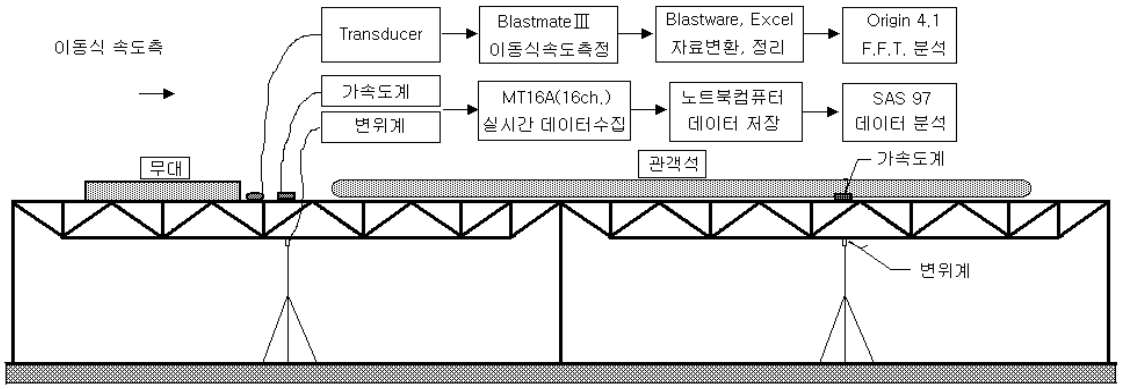

Fig. 5 실측 및 분석 플로우

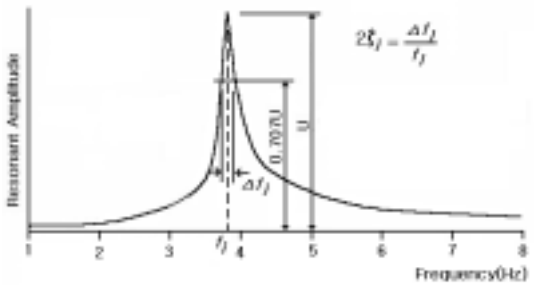

Fig. 6 감쇠율을 계산하는 방법

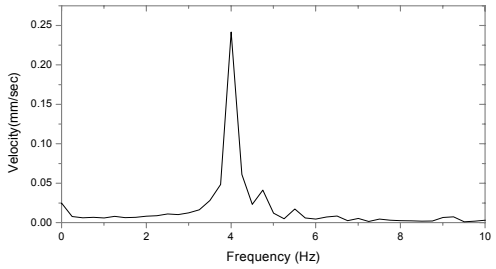

Fig. 7 자유진동상태에서의 진동수스펙트럼

또한 자유진동을 하는 바닥판의 진동수 스펙트럼을 이용하여 Fig. 6의 방식으로 감쇠율 ξ를 구하였다.

4. 측정결과 분석

4.1 바닥판의 동적특성

바닥판의 동적특성을 파악하기 위하여 공연시작 전 바닥판의 자유진동을 측정하였으며 이때 사람이 뛰는 충격으로 가진을 하였다. Fig. 7은 이를 F.F.T. 분석을 통해 진동수 스펙트럼으로 표현한 것인데, 관객이 없는 상태에서의 바닥판 고유진동수가 4.0Hz인 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 6의 방법으로 계산한 대상 바닥 구조의 감쇠율은 4.8%로 나타났다. Canadian Steel Structures Specification (CSA, 1989)에서 권장하는 감쇠율인 마감되지 않은 바닥 3%, 천장, 덕트, 가구가 있는 마감된 바닥 6%, 칸막이벽이 있는 마감된 바닥 12%와 비교하면 감쇠율은 낮은 편이 아닌 것으로 생각된다.

4.2 공연시의 진동측정 결과

1차 측정시 공연중 바닥판 진동의 최대 속도는 7.33㎜/sec, 최대 가속도는 약 0.021g로 측정되었다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 무대측과 관객측 보의 중앙에서 측정한 변위곡선이다. 공연 말미에 뒤편에 앉아 있던 관객들이 무대 앞으로 나가 몸을 흔드는 과정이 실시간 측정결과에 나타났다. 이때 최대 진폭은 0.31㎜이었다. 2차 측정시 최대 속도는 30.8㎜/sec, 최대 가속도는 0.101g로 측정되었는데 이때는 록밴드 그룹 연주시 대부분의 청중들이 열광하여 몸을 흔드는 분위기였다.

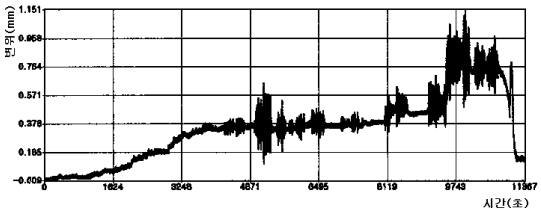

Fig. 8 변위측정결과, 무대 정면

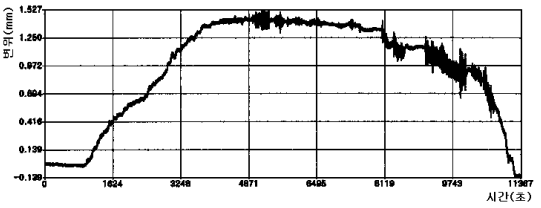

Fig. 11 변위측정결과, 객석측

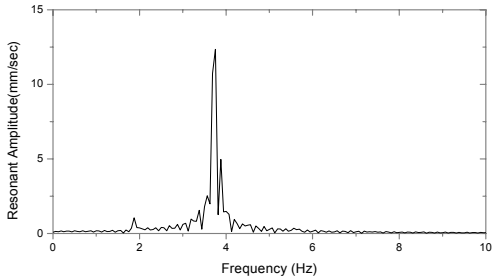

Fig. 10 공진 발생시의 진동수 스펙트럼

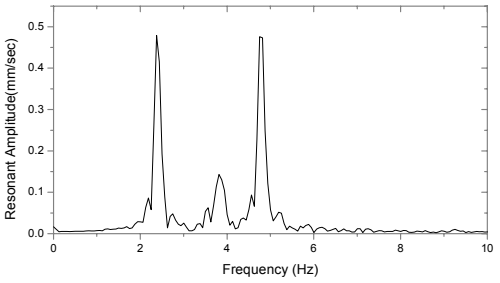

Fig. 13 공진이 없을 때의 진동수 스펙트럼

Table 2 진동측정결과, 무대정면

측정 시기	속도 (㎜/s)	가속도 (㎜/s^2)	변위 (㎜)	고유 진동수	2차 하모닉
1차	7.33	0.021	0.31	3.81Hz	4.0Hz
2차	30.8	0.101	0.68	3.87Hz	3.74Hz

관객들의 호응도는 2차 측정시가 1차 측정시보다 훨씬 높았으며 전반적으로 2차 측정시의 진폭이 훨씬 더 큰 것으로 측정되었다.

4.3 박자와 진동

관객이 없을 때 바닥판의 고유진동수는 약 4.0Hz이지만 관객들이 운집한 상태에서의 고유진동수는 측정위치 및 관객밀도에 따라 3.8~3.9Hz로 측정되었다. 진폭의 크기에 영향을 미치는 주 요인은 관객의 호응도와 박자-바닥고유진동수의 근접성이었다. Fig. 10은 측정치중 최고 속도인 30.8㎜/sec를 기록했을 때의 진동수 스펙트럼인데 2차 하모닉 진동수가 3.74Hz로서 바닥판의 고유진동수 3.87Hz와 매우 근접하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 11은 속도 3.51㎜/sec으로서 상대적으로 적은 진폭을 나타냈을 때의 진동수 스펙트럼인데, 1차, 2차 하모닉 진동수가 각각 2.39Hz, 4.79Hz로서 바닥판의 고유진동수와 거리가 있는 상태이다.

Table 3은 2차 측정시 발표되는 노래에 따른 최대 측정치를 요약한 것으로서 1차 또는 2차 하모닉 진동수와 바닥판 고유진동수가 근접할수록 진폭이 커지는 경향이 뚜렷함을 보여주고 있다. 특히 진폭이 극히 적었던 측정번호 5번, 6번, 7번에서는 2차 하모닉의 영향이 전혀 보이지 않았다. 측정번호 11번에서는 1, 2차 하모닉 진동수가 바닥판의 고유진동수로부터 상당히 거리가 있었지만 마지막 관객들이 열광하는 분위기였기 때문에 예외적으로 진폭이 높게 측정되었다.

Table 3 발표음악에 따른 측정치 요약

측정 번호	측정 시각	속도 (㎜/sec)	1차하모닉 (Hz)	2차하모닉 (Hz)
1	16 : 41	2.27	2.51	5.08
2	16 : 55	12.4	2.13	4.24
3	17 : 22	8.24	2.56	5.11
4	17 : 55	30.80	1.87	3.74
5	18 : 07	1.11	2.42	없음
6	18 : 17	1.94	2.89	없음
7	18 : 24	1.14	2.94	없음
8	18 : 34	8.10	2.04	4.07
9	18 : 31	27.4	2.01	3.98
10	18 : 38	3.51	2.39	4.79
11	18 : 49	25.4	2.45	4.88

4.4 맥노리에 의한 증폭효과

본 측정에서 2차 하모닉 진동수와 바닥판의 고유진동수가 근접한 경우 대부분 맥노리 현상이 발생한 것을 알 수 있었다. Fig. 12 및 Fig. 13는 최대 진폭 7.33㎜/sec를 기록한 시점에서의 시간이력곡선과 진동수 스펙트럼곡선이다.

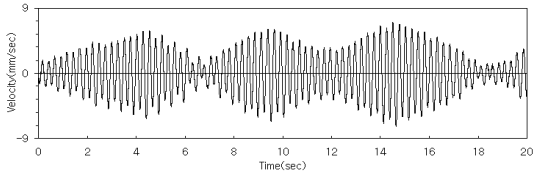

Fig. 12 맥노리현상을 보이는 시간이력곡선

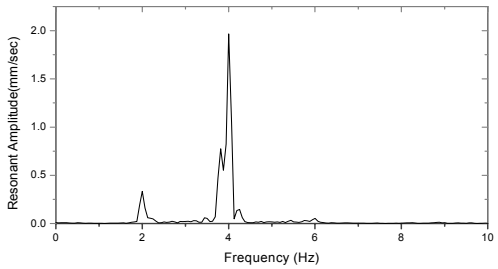

Fig. 13 맥노리현상시의 진동수 스펙트럼

4.5 고찰 및 대책

댄스가수의 공연시 측정된 최대가속도는 0.1g로서 ISO 및 NBC의 사용성한계상태 기준을 약간 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 3과 Table 1 참조). 비록 구조물에 손상을 줄 우려는 없다고 해도 콘서트를 할 때의 1차 또는 2차 하모닉 진동수가 건물 바닥의 고유진동수와 근접함으로 인해 공진에 의한 증폭현상이 발생한다는 문제점이 나타났다.

율동행위를 하는 강구조 바닥의 최저 1차 고유진동수, f_n는 다음과 같이 제시되고 있다(Ellingwood, 1984, Murray, 1991).

$$f_n \geq f\sqrt{1+\frac{k}{a_o/g}\,\frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (Hz) \qquad (3)$$

여기서,

f : 가진진동수(Hz)

a_o/g : 거주자에 대한 최대 허용 가속도

k : 상수 (댄스 1.3. 라이브콘서트나 스포츠 1.7, 에로빅 2.0)

α_i : 동적계수로서 Table 4 참조

ω_p : 점유자의 단위면적당 정적 중량

ω_t : 바닥 중량과 점유자의 중량을 포함한 단위면적당 중량

Table 4 동적하중 참고표(King, 1999, Farzad Naeim, 1991)

Activity	f(Hz)	ω_p* (kgf/㎡)	α_i
Dancing : First harmonic	1.5~3.0	61.2	0.5
Live concert or sport event :			
First harmonic	1.5~3.0	153.0	0.25
Second harmonic	3.0~5.0	153.0	0.05

*) 1. 일반적인 수준에서 관객이 최대로 입장한 상태의 점유밀도에 근거한다.
2. 특별한 이벤트에 대해서는 관객의 점유밀도가 증가할 수 있다.

진동측정 결과 최대 진폭을 기록한 시점에서의 진동수는 3.74Hz이었으므로 f=3.74Hz로, Fig. 3에서 'rhythmic acticity'에 해당하는 값으로서 a_o/g = 0.05, Table 4를 참고하여 α_1=0.25, ω_p=153 $kgf/㎡$, ω_t=843 $kgf/㎡$를 식(3)에 대입하면 본 건물 바닥판의 고유진동수는 6.0Hz 이상이 되어야 하는 것으로 분석된다.

Allen(1998)은 대부분의 박자에 맞춰 율동하는 행위, 특히 에로빅에 의한 진동에서 가장 중요한 요인은 공진이며 일차 하모닉(harmonic) 보다 2차 또는 3차 하모닉에 의한 공진의 영향이 클 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 2차 하모닉에 의한 공진 영향이 연구대상 건물 진동문제의 가장 큰 원인인 것으로 분석되었다. 따라서 구조체의 고유진동수가 가장 중요한 요소이며 설계시 1차, 2차 및 3차 조화진동으로부터 고유진동수가 벗어나도록 고려되어야 할 것으로 생각된다.

그렇지만 고유진동수를 증가시키기 위해서는 일단 구조체의 강성을 키우면서 경량화 하여야 하는데 설계 계획이나 경제성측면에서 쉬운 문제가 아니며 또 가끔 유치하는 행사 때문에 큰 비용을 투입하는 것은 바람직하지 않다고 생각된다. 따라서 설계 계획단계에서 대중적인 율동행위가 발생하는 홀의 위치를 1층이나 지하층에 두어 기둥의 강성을 증가시킴으로써 진동문제를 해결하는 방법을 고려할 필요가 있으며(Allen, 1998), 실의 용도를 정확히 규명할 필요가 있다. 또한 유지관리시 건물의 동적특성을 파악하여 예민한 관객들의 위치를 따로 지정하거나 바닥의 고유진동수와 비슷한 하모닉 진동수를 발생시키는 콘서트 유치를 피한다거나 하는 방식으로 진동문제를 해결하려는 노력을 해야 할 것이다. 또한 바닥판 하부에 칸막이벽, 천정, 기계설비 등을 배치함으로써 감쇠율을 증가시키는 것도 진동문제를 해결하는 방법 중 하나가 될 것이다 (Murray, 1975).

앞으로 다목적 컨벤션 센터 건물의 건설은 필수적이며 콘서트 유치도 피할 수 없는 문제이기 때문에 설계단계에서부터 적극적으로 연구되지 않으면 안될 것이며 설계기준을 설정할 때 구체적인 지침이 제시되어야 할 것이다.

5. 결 론

요즘 건축되는 컨벤션센터와 같은 장스팬 다목적 홀은 감쇠능력이 점점 낮아짐으로 인해 진동문제가 빈번하게 대두되고 있으며, 더욱이 군중들이 모여서 율동행위를 할 경우 바닥판의 고유진동수와 가진진동수가 근접함으로 인한 공진현상이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 국내의 한 장스팬 다목적 홀을 대상으로 고유진동수와 감쇠를 측정하였고, 본 장소에서 국내 유명가수의 공연시 진동을 측정하여 진동실태를 조사하였다. 연구 결과 결론은 다음과 같다.

1) 연구 대상 구조물은 스팬 33m의 철골트러스조로서 관객이 없을 때의 고유진동수는 4.0Hz, 감쇠율은 4.8%인데, 빠른 음악을 구사하며 율동을 유도하는 콘서트에서 1차, 2차 하모닉 진동수가 각각 2Hz와 4Hz 부근일 때 2차 하모닉에 의한 공진현상이 발생하였다. 측정된 최대 가속도는 0.1g로서 ISO 및 NBC의 사용성한계상태 기준을 약간 초과하는 것으로 나타났다.
2) 따라서 설계시 1차 하모닉뿐 아니라 2차 및 3차 하모닉에 의한 공진여부도 염두에 두어야 할 것이다.
3) 앞으로 장스팬 다목적 홀의 건립이 많아질 것이고 율동에 의한 진동의 영향으로부터 벗어나기 위한 고유진동수는 최소 6Hz 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. “Eurocode No.3, Design of Steel Structures, Part 1”, Industrial Processes Building and Civil Engineering, Commission of the European Communities, 1990.
2. Ad Hoc Committee on Serviceability Research, “Structural Serviceability: A Critical Appraisal and Research Needs”, Journal of Structural Engineering, Vol. 112, No.12, Dec., 1986. pp.2646~2664.
3. Andrew B. King, “Serviceability Limit State Criteria for New Zealand Buildings”, BRANZ Study Report SR 57, 1999.
4. Bruce Ellingwood, “Serviceability Guidelines for Steel Structures”, Engineering Journal, ASCE, First Quarter, 1989. pp.1~8
5. Bruce Ellingwood and Andrew Tallin, “Structural Serviceability: Floor Vibrations”, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 2, Feb., 1984. pp.401~418
6. D. E. Allen and G. Pernica, “Control of Floor Vibration”, Construction Techonology Update No.22, National Research Council of Canada, 1998.
7. D. E. Allen and T. M. Murray, “Design Criterion for Vibrations Due to Walking”, Engineering Journal, ASCE, Fourth Quarter, 1993, pp.117~129.
8. CAN3-S16, 1-M89: Steel structures for Buildings-Limit State Design, Appendix G: Guide for Floor Vibrations, Canadian Standards Association, 1989.
9. Farzad Naeim, “Design Fractice to Prevent Floor Vibrations” Structural Steel Educational Council, 1991, p23.

10. ISO 2631-2, Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration－Part 2, International Organization for Standardization, 1989.
11. Supplement to the National Building Code of Canada 1990. Chapter 4: Commentaries on Part 4, Commentary A, Serviceability criteria for deflections and vibrations, National Research Council of Canada, Ottawa, 1990.
12. Thomas M. Murray, "Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations", Engineering Journal, ASCE, Second Quarter, 1981, pp.62～70.
13. Thomas M. Murray, "Building Floor Vibrations", Engineering Journal, ASCE, Third Quarter, 1991, pp.102～109.
14. Young Bendidiction, "Dealing with Excessive Floor Vibrations", Construction Practice, NRC's Institute for Research in Construction, Canada, 1993.
15. 日本建築學會,"建築物の振動に關する居住性能評價指針・同解說", 1991, p20.

(접수일자 : 2002년 11월 29일)