수치해석모델을 이용한 콘서트 홀 바닥진동 안전성 평가

노 지 은¹ · 허 석 재¹ · 문 대 호¹ · 이 상 현¹ · 나 창 순^{2*}

¹단국대학교 건축공학과, ²국민대학교 건축학과

Safety Evaluation of Concert Hall Floor Vibration Using Numerical Analysis Model

Ji-Eun Roh¹, Seok-Jae Heo¹, Dae-Ho Moon¹, Sang-Hyun Lee¹ and Chang-Soon Rha^{2*}

¹Dept. of Architectural Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

²School of Architecture, Kookmin Univ., Seoul, 02707, Korea

Abstract

In this paper, the floor vibration of an example concert hall building was measured and floor safety criteria were analytically checked through comparison between experimental and analytical results. The floor bottom plate model was constructed considering the composite effect and the analytical model was modified to have the natural frequency identical to the measured one. Also, time history analysis was conducted using the dynamic loads induced by human rhythmic movement during a musical performance, and the analytically calculated floor accelerations were similar to the measured one. Based on this model, the floor vibration level due to the group activities of about 400 persons, maximum available persons for the concert hall, was estimated. It was confirmed that the human induced dynamic loads applied to the column and beam would be much lower than the design strength. In addition, the horizontal acceleration level is just 2% of the design seismic load, so the concert hall is safe in both vertical and horizontal excitations by human rhythmic movements.

Keywords : floor vibration, human rhythmic movement, concert hall, composite effect, safety

1. 서 론

사무용과 일반 상업시설이 대부분인 도심의 다목적 건물 내부에 실내공연장을 구비한 건물이 증가하고 있다(Ha and Ha, 2009). 비교적 정적인 클래식, 오페라공연에 비해 실내 공연장에서 락 콘서트를 하는 개최하는 경우 신나는 비트로 인해 관객들이 점프, 발구르기 행위를 하게 된다. 이러한 행위는 건물에 진동을 가하며 이 때의 하중을 울동하중이라 부른다. 울동 하중에 의한 진동을 사람들이 인지할 경우 건물의 사용성에 문제가 생기며, 울동하중과 같은 큰 진동뿐만 아니라 걷는 행위도 적은 진동을 유발하며 민감한 사람은 이를 느끼고 불편함을 호소하는 경우가 있다. 이에 따라 각국에서는 건물용도에 따라 허용진동 수준을 제한하는 사용성 평가기준을 두고 있다. 특히 울동하중과 같은 진동이 발생할 가능성이 있는 장소는 바닥판의

고유진동수를 제한하여 설계하도록 하고 있다(Wyatt, 1989; Feldmann *et al.*, 2009).

유사한 사례를 검토해 보면 축구장, 풋볼장과 같은 경기장에서 발생하는 진동문제가 있다. 경기 및 락 공연 도중에는 군중동 조효과로 인한 진동이 발생한다. 이 때 발생하는 진동은 지속 적이지 않으며, 상황에 따라 다르지만 약 2Hz부근의 진동을 동조화하여 유발하는 것으로 보고되었다(Reynolds and Pavic, 2006; Caprioli *et al.*, 2005). 만일 울동하중이 바닥구조물의 고유진동수와 중첩되는 경우 큰 가속도를 유발하게 되며, 이는 사용성뿐만 아니라 구조적 안정성에도 큰 영향을 미친다. 사례로 2011년 서울 테크노마트에서 진동문제가 발생하였는데 이는 바닥판의 고유진동수와 '태보'운동으로 인한 사람들의 울동하중이 일치하여 건물 중층에서 최상층까지 진동이 전파 되어 사람들이 과도한 진동을 느낀 사례이다(Lee *et al.*,

* Corresponding author:

Tel: +82-2-910-4592; E-mail: csrha@kookmin.ac.kr
Received August 25 2017; Revised October 26 2017;
Accepted October 27 2017

© 2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2013). 본 연구에서는 공연장으로 사용되는 실제 건물을 대상으로 기 측정된 진동자료를 바탕으로 바닥판의 사용성 및 구조적 안정성을 검토하였다. 실제 율동하중을 인원별로 구분하여 생성한 후, 이를 바탕으로 바닥판에 발생하는 가속도를 수치해석을 통하여 검증함으로써 최대관람인원에 대한 콘서트 홀 바닥진동의 안정성 및 사용성을 평가하고자 한다.

2. 구조물 개요

본 연구에서 실험과 해석을 통하여 검증하고자 하는 대상 구조물은 공연장으로 사용되는 지상 3층의 구조물이다(Fig. 1). 지상 1층은 철골조 주차장이며 2, 3층은 컨테이너박스를 배치하여 실내공간을 구성하였다. 록 공연장은 2층 중앙부에 위치하며 주변은 음식점 및 사무실 등의 상업시설로 구성된다.

Fig. 2는 진동해석 대상 구조물의 수치해석 모델을 보여준다. 1층 철골조와 2, 3층의 컨테이너박스를 같이 모델링하였다. 상용 구조해석 프로그램인 Midas Gen(Midas IT, 2016)을 이용하여 구조해석 모델을 만들고 동적 시간이력해석을 수행하여 바닥 진동응답을 예측하였다.

대상 구조물의 지상 2층 슬래브는 Fig. 3과 같이 컨테이너 내부와 외부가 다른 재료 순서로 구성되어 있다.

컨테이너의 외부 바닥은 데크플레이트(200mm) 상부에 무근콘크리트(200mm)로 되어 있으며, 컨테이너의 내부 바닥은

데크플레이트(200mm)와 단열재 위에 무근콘크리트(200mm)로 되어있다(Fig. 4). 컨테이너 내부의 무근콘크리트는 단순히 단열재 위에 타설된 형태로 데크플레이트와 서로 분리되어 거동하므로 슬래브의 휨강성에는 영향이 없는 것으로 보고 단순히 데크플레이트 위에 작용하는 중력하중으로 입력하였으며, 컨테이너 외부의 무근콘크리트는 판(plate)요소를 이용하여 모델링하였다. 컨테이너 외부의 데크플레이트와 무근콘크리트는 실제로 합성되어 거동하기 때문에, 각 요소를 강제로 연결시켜주는 Rigid Link 기능을 이용하여 두 요소의 상호거동을 구속하였다.

또한, Midas Gen에서 보와 슬래브를 동시에 모델링하는 경우, Fig. 5(a)와 같이 보와 슬래브의 단면중심이 일치되도록 모델링된다. 하지만 실제 시공 시에는 Fig. 5(b)와 같이 보가 슬래브의 하부로 배치되기 때문에 Fig. 5(a)와 같이 모델링할

Fig. 3 Floor composition detail

Fig. 4 Floor model detail

Fig. 5 Neutral axis modeling method

Fig. 1 Picture of example building

Fig. 2 Numerical analysis model

경우, 슬래브의 실제 휨강성을 제대로 산정하지 못하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 실제 이격거리를 고려하여 부재의 강성을 계산해 주는 Beam End Offset 기능을 적용하여 슬래브 하부로 배치되는 보의 강성을 적절히 반영하여 해석을 수행하였다.

3. 수치해석모델 검증

3.1 바닥진동모드

대상 구조물의 고유치해석을 수행한 결과 Table 1과 같이 1차 모드 진동수는 5.808Hz로 나타났으며 이는 실제 진동 계측 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 아래의 Fig. 6은

Table 1 The natural frequencies and mass participation rates of the 2nd floor

Mode	Frequency (cyc/sec)	Period (sec)	Mass participation (%)	Cumulative mass participation (%)
1	5.808	0.172	0.34	0.34
2	6.075	0.165	3.92	4.26
3	6.189	0.162	9.20	13.46
4	6.418	0.156	7.53	21.00
5	6.511	0.154	1.55	22.55
6	6.774	0.148	4.63	27.18
7	6.936	0.144	1.30	28.48
8	7.098	0.141	0.08	28.55
9	7.279	0.137	0.11	28.66
10	7.406	0.135	0.15	28.81

Fig. 6 Floor mode shapes

공연장 부근에 진동영향이 큰 6개 모드의 모드형상을 보여준다. 각 모드는 바닥판이 진동에 반응하기 쉬운, 즉 공진이 일어날 수 있는 주파수대역을 나타낸다.

3.2 울동하중 생성

공연장에서 발생하는 울동하중을 생성하기 위하여 성인 남성 3명에 대한 각각의 충격하중을 직접 계측하였다. 충격력 계측 장치는 Fig. 7과 같다. 실험에 참여한 3명의 몸무게는 70, 80, 90 ± 1kg으로 약 10kg씩 차이가 났으며, 메트로놈을 이용하여 점핑 주파수 2Hz를 유지하였다. 실제 공연장과 같은 울동조건을 부여하기 위해 신발을 착용한 채 제자리 뛰기를 하였고, 그로 인해 발생한 충격력 파형은 Fig. 8과 같다. 충격력의 최대 크기는 약 1,600N으로 몸무게가 많이 나갈수록 최대

Fig. 7 Measuring instrument for Impact

Fig. 8 Impact load waveform by weight

Fig. 9 Impulse waveform for 2Hz bounce

Fig. 10 Impact spectrum for 2Hz bounce

(a) Phase shift 0°

(b) Phase shift 45°

(c) Phase shift 90°

(d) Phase shift 135°

(e) Phase shift 180°

Fig. 11 Shape of excited load by phase shift

충격력은 크게 나타났으나 차이는 7% 내외로 미비하였다. 충격력 지연시간은 0.19~0.22초로 나타났으며 계측된 충격력은 수치해석모델의 바닥진동응답 예측에 활용하였다. 별도로 충격력을 계측한 이유는 ISO기준 및 SCI기준에서 제시하고 있는 충격하중이 에어로빅, 콘서트, 스포츠관람 등 다양한 환경

조건에 적용하는 하중이기 때문에 본 연구와 같이 공연장 관객의 집단 울동운동에 대한 충격력을 모사하기에는 한계가 있다고 판단했기 때문이다. Fig. 9와 Fig. 10은 수치해석에 사용된 2Hz 주파수의 1인 점핑하중에 대한 시간이력과 주파수스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

해석모델에 입력한 가진하중은 몸무게 80kg인 남성이 15초 동안 2Hz로 제자리 뛰기를 했을 때 계측된 시간이력하중으로 최대 충격력은 2,127N이다. 실제 관객의 점핑에 대한 충격하중을 수치해석에 유사하게 반영하도록 계측된 충격력을 입력하중으로 사용하였다.

또한 전체 인원이 동시에 정확히 2Hz에 맞춰서 집단 울동을 했을 때(위상차 0°)부터 전체 인원의 위상차가 180°로 변화할 때까지 45°씩 위상차를 두고 해석을 하였다. 이 결과를 바탕으로 실제 계측한 결과와 비슷한 가속도를 나타내는 집단하중의 위상차를 찾아내었다. Fig. 11의 (a)는 각 지점에서의 울동하중 위상차가 0°인 시간이력하중을 나타낸 그림이며, (b)~(e)로 진행할수록 각 지점별 울동하중의 위상이 점점 차이나는 것을 확인할 수 있다.

3.3 수치해석모델 검증(3인 점핑)

성인 3명의 제자리 뛰기 실험 계측 결과와 해석모델을 통한 결과를 비교하여 수치해석모델의 타당성을 검증하였다. 실제 계측을 통해 분석한 바닥판 슬래브의 감쇠비는 3%로 나타났지만, 해석 시에는 보수적인 결과를 위해 2.5%를 적용하였다.

가진하중은 2Hz 주파수의 1인 점핑하중인 Fig. 9의 파형을 사용하였으며, 실제 계측 시 제자리 뛰기를 했던 지점인 공연장 중앙부근(Fig. 12)에 입력하여 해석을 수행하였다.

성인 3명이 제자리 뛰기 했을 때의 계측한 결과와 해석결과는 Fig. 13과 같다. 실험 시 공연장 바닥 하부 거더 중앙부에서 계측된 최대가속도는 0.03m/s²였으며, 해석 시 최대변형 지점에서 발생한 최대가속도는 실험 시 발생한 가속도응답과 비슷한

Fig. 12 Push location of the analytical model

Fig. 13 Result comparison of 3-man push

수준인 0.031m/s^2 로 나타났다. 실험결과와 해석결과가 비슷한 수준의 응답을 나타내고 있음으로써 수치해석모델의 타당성을 검증하였으며, 이후 본 해석에서 사용한 수치해석모델을 적용하여 집단 율동활동에 대한 해석을 수행하였다.

4. 공연장 바닥 사용성 및 안전성 평가

4.1 수직방향 진동검토

대상 구조물의 최대 수용인원인 400명이 집단 율동활동을 할 때의 공연장 바닥의 사용성과 구조물의 안전성을 평가하기 위해 2016년 7월 2일 공연장에 있었던 250명의 인원이 공연을 관람했을 때의 계측한 수직진동 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 집단이 발생시킬 수 있는 율동 가진하중의 위상차를 검토하였다.

1) 250명 집단 율동활동

아래의 Fig. 14는 250명의 인원이 율동 가진 시 발생된 가속도 시간이력이며, 발생한 최대 가속도는 0.32m/s^2 로 계측되었다. 한편, 250명의 집단 율동 가진하중을 해석적으로 모사

Fig. 14 The floor plate maximum acceleration predicted by 250 persons

하기 위해, Fig. 15와 같이 공연무대(공연장 앞쪽) 및 음향엔지니어자리(공연장 뒤쪽)를 제외한 91개의 절점에 율동하중을 입력하였다. 각 절점 간격은 1m로 1m^2 의 면적에 약 2.7명

Fig. 15 Location of loads for 250 persons

Fig. 16 Floor acceleration by phase shift in 250 group rhythms

Table 2 Comparison of floor acceleration by phase shift in 250 group rhythms

phase shift	0°	45°	90°	135°	180°
Maximum acceleration(m/s ²)	1.869	0.707	0.413	0.165	0.133
RMS acceleration (m/s ²)	0.532	0.199	0.118	0.059	0.036
Amplification ratio	14.05	5.32	3.11	1.24	1.00

(250명/91절점)의 사람이 존재한다고 생각하여, 하중을 입력하였다. 감쇠비 역시 3인 점핑 해석 시 적용한 2.5%를 사용하여 해석을 수행하였다.

250명의 집단 울동 가진을 해석적으로 모사했을 때의 시간 이력 해석결과는 Fig. 16과 같으며, 위상차에 따른 가속도 비교값은 Table 2와 같다. 울동하중의 위상차가 0°일 때 바닥 판에 발생하는 가속도는 위상차가 180°일 때의 14배이며, 실제 발생한 가속도(0.32m/s²)와 비슷한 수준의 가속도가 발생하는 위상차는 90°(0.413m/s²)로 판명되었다. 이러한 해석결과를 바탕으로 위상차가 90°인 울동하중을 적용하여 최대 수용인원인 400명이 집단 울동활동 했을 때의 공연장 바닥의 사용성과 구조물의 안전성을 평가하였다.

2) 400명 집단 울동활동(동적 시간이력해석)

전술한 250명 집단 울동활동 해석결과를 바탕으로 최대 수용 인원인 400명이 집단 울동활동을 했을 때의 공연장 바닥의 사용성과 구조물의 안전성을 평가하였다. 앞선 해석방법과 동일한 방식으로 400명의 집단 울동 가진하중을 해석적으로 모사하기 위해 공연무대(공연장 앞쪽) 및 음향엔지니어자리(공연장 뒤쪽)를 제외한 91개의 절점에 위상차 90°인 울동하중을 입력하였다(Fig. 17). 각 절점 간격은 1m로 1m²의 면적에 약 4.4명(400명/91절점)의 사람이 존재한다고 가정하고 하중을 입력하였다. 감쇠비 역시 250명 집단 울동활동 해석 시 적용한 2.5%를 사용하였다.

400명의 집단 울동 가진을 해석적으로 모사했을 때, 바닥판에 발생하는 최대가속도는 0.66m/s²이며, RMS 가속도는 0.19 m/s²으로 나타났다. 이는 AISC #11 평가곡선의 'Rhythmic Activities' 수준 최대가속도 0.5m/s²를 초과하는 수준이다. 수치해석에 사용된 인구밀도 4.4명/m²은 도약자들 간의 간섭으로 인해 개인의 도약을 방해할 수 있는 수준의 밀도이다.

Fig. 17 400 person group rhythm floor acceleration

따라서 실제의 경우 바닥을 가진하는 충격하중은 수치해석에 사용된 충격하중보다는 작아지게 되기 때문에 400명 가진에 대한 수치해석 결과는 매우 보수적인 평가결과이다.

3) 400명 집단 울동활동(동적증폭계수를 이용한 정적해석)

SCI P354 및 BS 6399-1에는 울동하중을 받는 바닥에 대한 안전성 평가지침이 제시되어 있다. 지침은 바닥의 수직 기본진동수에 따라 다르며, 바닥의 수직진동수가 8.4Hz 이상인 경우는 공진효과를 검토할 필요없이 동적하중을 추가 활하중으로 고려할 수 있으나, 그 이하인 경우 울동하중을 부가 활하중으로 고려하여 바닥판이 하중을 견딜 수 있도록 설계하도록 권고하고 있다(Smith *et al.*, 2007; BSI, 1996).

따라서, 본 연구와 같이 바닥의 수직 고유진동수가 8.4Hz 보다 작은 경우 예상 동적하중은 SCI P354기준에 따라 다음과 같이 정의된다.

$$F(t) = q(1 + \sum_{h=1}^H a_h D_{\delta,h} \sin(2\pi h f_p t + \phi_h + \phi_{1,h})) \quad (1)$$

여기서, q 는 단위면적당 도약자 하중(1인당 746N), H 는 푸리에항의 개수, a_h 은 h 번째 항의 푸리에 계수, $D_{\delta,h}$ 는 울동활동의 h 번째 조화성분에 대한 동적증폭계수, f_p 는 점핑하중에 대한 주파수, ϕ_h 는 h 번째 항의 위상, $\phi_{1,h}$ 는 h 번째 조화성분과 관련된 n 차 모드 응답의 위상을 의미한다.

동적증폭계수 $D_{\delta,h}$ 는 다음과 같다.

$$D_{\delta,h} = \frac{1}{\sqrt{(1-h^2\beta^2)^2 + (2h\zeta\beta)^2}} \quad (2)$$

여기서, h 는 h 번째 조화성분의 번호, β 는 진동수비 (f_p/f_1), ζ 는 감쇠비, 그리고 f_1 은 바닥의 기본진동수를 의미한다. 계산량을 줄이기 위해서 모든 조화요소의 최고점이 동시에 발생된다고 보수적으로 가정하면, 식을 간략화시켜 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t) = q(1 + \sum_{h=1}^H a_h D_{\delta,h}) \quad (3)$$

최대하중을 결정하기 위해서는 활동 진동수를 바닥의 최저차 진동수에 해당하는 조화성분 h 의 진동수로 해야 하며, 5.8Hz 바닥에 대한 가진 진동수는 5.8/3=1.93Hz이다.

위 과정을 따라 계산된 울동하중에 대한 예상 동적하중은 Fig. 18과 같다. 1인 몸무게 70×9.8=686N에 비해 최대

Fig. 18 Impact loading waveform for 1-man jumper reflecting floor dynamic response

Fig. 19 The safety review column

Table 3 Strength ratio comparison of column with load combination

Load combination	Pu ($\Phi P_n=7,536\text{kN}$)	Mu ($\Phi M_n=681\text{kN}\cdot\text{m}$)	Ratio
1.0 D.L. (Gravity Load)	1,725.7	45.8	0.289
1.0 D.L. + 1.0L.L. (400 persons)	1,800.2	37.9	0.291
1.0 D.L. + 5.0L.L. (400 persons)	2,170.1	14.7	0.328

충격하중은 약 3,500N으로 하중이 약 5배 증가한다.

이에 따라 400명이 집단 율동활동을 했을 때의 구조물 안전성을 평가하기 위해, 400명 정적 활하중의 5배를 증폭한 하중을 입력하여, 1층에 위치한 보와 기둥의 내력비를 검토하였다.

하중을 가장 많이 받는 기둥은 H-414×405×18×28의 철골부재로서 Fig. 19에 표기한 공연장 중앙 부근에 위치하여 컨테이너 벽체의 하중이 바로 전달되는 지점이다. Table 3과 같이 400명 정적 활하중의 5배를 증폭한 하중을 적용했을 때의 기둥의 내력비는 0.33으로, 400명의 인원이 집단 율동활동을 하여도 기둥 내력의 33%에 해당하는 하중만 가해지므로 구조물 자체는 안전하다고 판단할 수 있다.

하중을 가장 많이 받는 보는 Fig. 20에 표기한 공연장 중앙 부근에 위치하고 있다. Table 4와 같이 400명 정적 활하중의 5배를 증폭한 하중을 적용했을 때의 보의 내력비는 0.84이다.

Fig. 20 The safety review Beam

Table 4 Strength ratio comparison of Beam with load combination

Load combination	Pu ($\Phi P_n=2,924\text{kN}$)	Mu ($\Phi M_n=2,011\text{kN}\cdot\text{m}$)	Ratio
1.0 D.L. (Gravity Load)	1,082.9	536.9	0.623
1.0 D.L. + 1.0L.L. (400 persons)	1,142.4	573.3	0.665
1.0 D.L. + 5.0L.L. (400 persons)	1,380.3	720.6	0.839

검토 조건은 합성 바닥을 구성하는 각 거더들을 단순보로 가정하는 보수적인 조건을 적용하였다. 실제의 거더는 단부가 연속이고 거더의 전체 단면은 콘크리트 슬래브와 합성작용을 하므로 거더 중앙의 실제 휨모멘트는 작아지게 된다.

이러한 결과를 통해 400명의 인원이 집단 율동활동을 하여도 보 내력의 84%의 하중만 가해지므로 구조물 자체는 안전하다고 판단할 수 있다.

4.2 수평방향 진동검토

아래의 Fig. 21은 250명의 인원이 율동 가진 시 발생된 수평방향 가속도 시간이력으로서 발생한 최대가속도는 0.025m/s^2 로 계측되었다.

250명 집단 율동 시 발생했던 수평방향 최대가속도인 0.025m/s^2 는 Table 5의 설계 지진하중 유효가속도인 $0.12g$

Fig. 21 Maximum horizontal acceleration waveform of floor plate during performance

Table 5 Structure weight and design seismic load size

Items	Applied value
Seismic response coefficient(Cs)	0.12
Structural effective weight(W)	28023.3kN (=2857.58ton)
Equivalent static base shear force(V)	Cs×W=3365.9kN

Table 6 The column and beam strength ratio for design seismic load

Member	Pu (kN)	ΦPn (kN)	Mu (kN·m)	ΦMn (kN·m)	Ratio
Column	619	9250	305	859	0.578
Beam	1516	2924	767	2011	0.883

(=1.176m/s²)의 1/47(=0.02) 수준이다.

따라서 구조물은 Table 6과 같이 기둥이 받을 수 있는 내력의 최대 58%, 보는 88%의 하중을 받는 것으로 나타났다. 이는 실제 발생 가속도의 47배의 하중(설계 지진하중)으로 검토한 결과로, 본 연구에서 해석한 예제 구조물은 수평방향 진동에도 충분히 안전한 구조물로 판단된다.

5. 결 론

수치해석모델을 사용하여 예제 공연장 건물의 안전성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 바닥판의 합성효과를 고려하여 모델링한 결과, 1차 모드 고유진동수가 진동계측실험을 통해 구한 공연장 바닥판의 고유진동수와 유사한 5.808Hz를 보여 바닥판의 유효질량과 유효강성이 적절히 모델링되었음을 확인하였다.
- 2) 몸무게 80kg인 남성이 15초간 제자리 뛰기 한 경우에 대한 충격하중 계측실험에 기반하여 인간의 울동에 의한 동적하중을 모델링하였으며, 이 하중을 바닥판에 입력하여 시간이력해석을 수행한 결과, 진동계측실험과 유사한 수준의 바닥판 가속도 응답을 나타내어 수치해석모델이 타당함을 확인하였다.
- 3) 최대관람인원으로 예상되는 400명의 집단울동에 대한 시간이력해석 결과, 바닥판 콘크리트와의 합성효과를 무시하고 단순보로 평가할 때 최대내력대비 기둥은 약 33%, 보는 약 84%의 용력이 작용하여 안전성에 문제가 없음을 확인하였으며 합성보 거동을 가정하면 안전성은 더욱 증대된다.
- 4) 공연 시 발생한 수평방향 진동수준은 지진하중의 약 1/47 크기로 구조물의 안전성에는 아무런 문제가 없는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 도시건축연구사업(16A UDP-B106327-02)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Caprioli, A., Castellani, A., Cigada, A., Vanali, M. (2005) Vibration Monitoring of the G. Meazza Stadium in Milano during Concerts and Football Matches, *In 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII)*.
- Feldmann, M., Heinemeyer, C., Butz, C., Caetano, E., Cunha, A., Galanti, F., Lukic, M. (2009) *Design of Floor Structures for Human Induced Vibrations*, JRC-ECCS Joint Report.
- Ha, S., Ha, M. (2009) An Analysis of the Entertainment Element in the Urban Entertainment Center, *J. Archit. Inst. Korea, Planning & Design Section*, 25(4), pp.63~72.
- Lee, S.H., Woo, S.S., Chung, L., Lee, D.G. (2013) Field Measurements for Identification of the Vibration Accident Cause of a 39-Story Steel Building Structure, *J. Archit. Inst. Korea Struct. & Constr.*, 29(3), pp.19~27.
- Midas IT (2016) Midas Gen Analysis Manual.
- Reynolds, P., Pavic, A. (2006) Vibration Performance of a Large Cantilever Grandstand during an International Football Match, *J. Perform. Constr. Facil.*, 20(3), pp.202~212.
- International Standards Organization (ISO) (1989) *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part 2: Human Exposure to Continuous and Shock-Induced Vibrations in Buildings (1 to 80 Hz)*.
- International Standards Organization (ISO) (2007) *ISO 10137: Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations*.
- Smith, A.L., Hicks, S.J., Devine, P.J. (2007) *SCI P354: Design of Floors for Vibration: A New Approach*.
- Wyatt, T.A. (1989) *AISC#11: Design Guide on the Vibration of Floors*. London: Steel Construction Institute.
- BSI, B. (1996) *BS 6399-1: Loading for Buildings. Code of Practice for Dead and Imposed Loads*. BSI, London, UK.

요 지

본 논문에서는 실제 공연장을 예제 건물로 하여 공연장에 발생한 진동을 측정한 결과를 바탕으로 공연장 구조물의 안전성에 대해 해석적으로 평가하였다. 수치해석 프로그램은 MIDAS GEN을 사용하였으며, 바닥판은 합성효과를 고려하여 모델링하였다. 해석결과 진동계측실험을 통해 구한 바닥판 고유진동수와 유사한 결과를 보였다. 또한 균중의 울동에 의한 동적하중을 시간이력해석으로 해석하여 진동계측 실험과 유사한 수준의 바닥판 가속도 응답을 확인하였다. 이 모델을 사용하여 예제 공연장의 최대관람인원인 400명의 집단울동 시 발생하는 상황에 대하여 분석하였다. 그 결과 기둥과 보의 가해지는 외력은 설계 내력을 하회하여 안전성에 문제없음을 확인하였다. 또한 공연 시 발생하는 수평방향 진동수준은 지진하중의 2% 수준으로 수직수평 모두 안전성에 문제가 없는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 울동하중, 공연장진동, 합성바닥해석, 수직수평안전성, 수치해석