공연하중에 의한 바닥진동 설계용 동하중계수

Dynamic Load Factor for Floor Vibration due to Lively Concerts

홍 갑 표[1] · 윤 광 섭[2]
Hong, Kap Pyo Yoon, Kwang Sup

요 약 : 현대 구조물의 고강도화, 경량화에 따라 구조물의 질량과 감쇠가 줄어들고 있어, 구조물의 진동사용성 문제가 중요하게 부각되고 있다. 특히 율동진동은 공연장, 경기장, 댄스홀, 에어로빅 등과 같이 다수의 군중이 리듬에 맞춰 가진행위가 이루어지는 것으로서, 국내에서도 율동진동에 의한 구조물의 진동문제가 다수 보고되고 있으나 설계기준 미비로 설계단계에서의 대응이 이루어지지 못하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 다수의 점핑행위가 예상되는 공연장의 진동설계를 위하여 실제 공연장을 대상으로 진동실험 및 계측을 통하여 동하중계수를 구해냈다. 진동실험은 실험모드해석과 더불어, 가진진동수별, 율동참여자의 숫자에 따라 실시하였으며, 진동계측은 상시계측시스템을 설치하여 실제 공연시 가속도 응답을 계측하고 동하중계수를 구해내었다. 기존의 NBCC 규준에서는 공연시 2차 조화항까지 고려토록 되어 있으나 연구결과 3차 조화항까지 고려해야 되며, 동하중계수 역시 과소평가 되어 있는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : Modern structures are being built using high-strength and light-weight construction materials resulting in decreased structural mass and damping properties. Rhythmic activities such as jumping, dancing and clapping during lively concerts can produce excessive vibration of steel structures. In this study, dynamic load factors that occur during lively concerts were presented through vibration test and real-time monitoring of an existing concert hall. The vibration test included modal analysis and jumping test according to the forcing frequencies and the number of participants. Dynamic load factors were acquired directly from peak acceleration responses of each harmonics. Comparing NBCC 1995, the 3rd harmonic must be included in the design of concert halls. Dynamic load factors must be increased as a result of the vibration test.

핵 심 용 어 : 바닥진동, 율동가진, 공연하중, 동하중계수
KEYWORDS : Floor vibration, Rhythmic Activities, Lively Concerts, Dynamic Load Factor

1. 서 론

건축구조물의 바닥진동 설계를 위한 가진원은 사람의 행위에 따라서 크게 보행진동과 율동진동으로 대별될 수 있다.

이중 율동진동은 경기장, 댄스홀, 공연장, 헬스클럽, 에어로빅 등과 같이 다수의 군중이 리듬에 맞춰 가진행위가 이루어지는 것으로서, 구조물의 설계시 진동검토가 필수적이다.

최근 국내에서도 율동진동에 의한 구조물의 진동문제가 다수 보고되고 있으나, 동하중 특성이 명확하지 않고, 복합적이며, 설계기준의 미비로 인하여 설계단계에서 일차적인 대응이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

일반적으로 율동진동에 관한 설계기준은 NRCC(National Research Council of Canada)에서 제정한 NBCC 1995 Structural Commentaries Part 4를 이용하고 있다. 이 기준은 율동진동을 댄싱, 공연장 및 운동경기장, 점핑 등 크게 3가지로 구분하고 있으며, 각 구분에 따라 가진진동수, 참여자 질량, 동하중 계수를 정의하여 설계에 반영토록 하고 있다. 그러나, 여러 가지 율동중에서 다수의 군중이 밀집된 상태에서 가진행위가 이루어지는 공연진동의 경우 시대적 변화에 따라 가진형태가 많은 변화를 일으키고 있다. 특히 스탠딩 공연의 경우 과거에 비해 보다 많은 점핑운동을 수반하고 있지만, 코드에서는 이를 미처 반영하지 못하고 있어 기존의

1) 정회원, 연세대학교 건축·도시공학부, 교수
2) 정회원, 연세대학교 건축·도시공학부, 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

공연장 기준 적용시 구조물의 과다진동 문제를 다수 발생시키고 있는 반면, 점핑기준 적용시에는 과다 설계를 초래하는 실정이다. 그러므로, 본 연구에서는 다수의 점핑이 예상되는 공연장의 새로운 설계 가이드라인을 제시하기 위하여 실제 공연장을 대상으로 진동 실험 및 계측을 통하여 동하중 계수를 구해내었다. 진동실험은 구조물의 고유진동수와 감쇠율 등 바닥판의 동특성을 구하기 위한 실험모드 해석과 더불어 율동 참여자의 숫자를 바꿔가며(50명, 100명, 150명, 200명) 실험을 실시하였으며, 진동계측은 공연장에 실시간 상시계측 시스템을 설치하여 실제 공연시 가속도 응답을 계측하고, 이를 이용하여 실제 공연시 동하중 계수를 구해내었다.

2. 공연진동 설계의 접근방법

2.1. 율동적 가진의 종류와 특성

사람의 동적행동에 의해 발생하는 하중은 크게 주기적인 하중과 일시적인 하중 두가지로 나눌 수 있다. 주기적인 하중으로는 보행(walking), 점핑(jumping), 댄싱(dancing), 달리기(running) 등의 행동에 의해 발생하고, 일시적인 하중은 높은 곳에서 뛰어내리는 등의 행동으로 구조물에 한번의 가진을 주는 행동으로 유발된다.

표 1은 인간의 여러 가지 활동중에서 주기적인 하중을 발생시킬 수 있는 하중의 종류와 그에 대한 가진진동수 범위이다.

표 1. 인간의 주기적 행동과 가진진동수[1)]

행동	행동에 관한 대표적인 내용	가진진동수 (Hz)
보행	1.5~2.5Hz의 진동수 범위에서 지면에 연속적인 접촉이 일어나는 행위	1.5~2.5
점핑	한 장소에서 두발이 동시에 수직의 방향으로 지면에 접촉하는 행위	1.8~3.4
댄싱	하중-시간함수 산정시 "활발한 보행"과 거의 동등하다고 가정	1.6~3.0
달리기	2.0~4.0Hz의 진동수 범위에서 지면에 불연속적인 접촉이 일어나는 행위	2.0~4.0

공연하중은 음악에 맞춰 발생하는 주기적인 진동으로서 인간의 주기적인 행동중 점핑, 댄싱, 박수치기 등이 복합적으로 작용하며, 다수의 군중에 의해 발생하는 특성을 가지고 있다.

2.2. 율동가진에 의한 응답과 동하중계수

공연에 의해 발생하는 율동진동은 주기적인 특성을 가지고 있으므로 식(1)과 같이 주기하중의 조합으로 표현될 수 있다.[2)]

$$P(t) = W_p\left\{1 + \sum_{i=1}^{N_T} \alpha_i \sin(2\pi f t + \phi_i)\right\} \quad (1)$$

여기서, $P(t)$: 하중함수, W_p : 율동참여자 하중, i : 조화항차수, f : 가진진동수, ϕ : 위상각, N_T : 총조화항갯수이다. 그리고, α_i는 동하중계수로서 율동참여자의 하중에 대한 동하중의 비율을 무차원값으로 나타내는 것으로서, 율동가진의 종류와 크기에 따라 변하는 성질을 갖고 있다.

그림 1은 동하중계수의 정의를 그림으로 나타낸 것이다. 이러한 주기하중에 의한 응답은 고전적인 1자유도계의 정상응답으로 다음과 같이 표현될 수 있다.[3)]

$$\frac{a_i}{g} = \frac{1.3\alpha_i W_p / W_t}{\sqrt{[(\frac{f_o}{f_i})^2 - 1]^2 + [2\beta\frac{f_o}{f_i}]^2}} \quad (2)$$

여기서, a_i : 최대가속도 응답, g : 중력가속도, fi : 가진진동수, f_o : 고유진동수, β : 감쇠율, W_p : 율동참여자 하중, W_t : 총하중 이다.

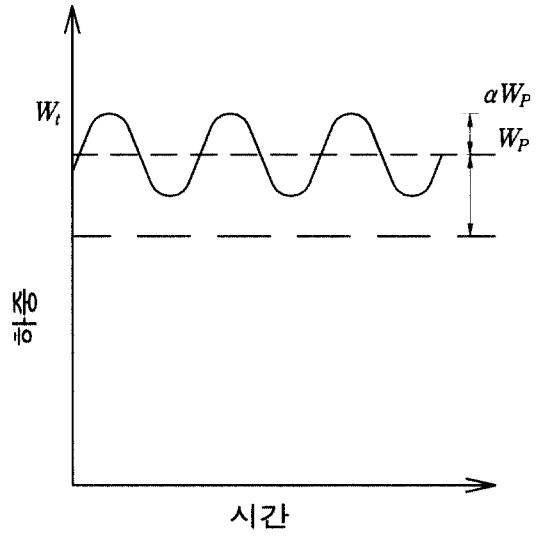


그림 1. 동하중계수의 정의[8)]

인간의 반응에 대한 유효최대가속도 응답을 구하기 위해서 ISO(1989)에서는 식(3)과 같은 RMQ가속도를 추천하고 있다.

$$a_{rmq}=\left[\frac{1}{T}\int_0^T a^4(t)\,dt\right]^{1/4} \quad (3)$$

식(3)에서 최초 3개의 조화항을 가지고 풀면 식(4)와 같은 유효최대가속도를 구할 수 있다.[3)]

$$a_m=(a_1^{1.5}+a_2^{1.5}+a_3^{1.5})^{1/1.5} \quad (4)$$

그러므로, 구조물의 동특성을 알고, 진동수영역에서의 각 조화항 차수별 가진진동수와 가속도응답을 알면 식(2)를 이용하여 동하중계수를 구해낼 수 있다.

2.3. 율동가진에 의한 설계

식(2)에서 볼 수 있듯이 바닥판의 하중과 동특성을 알고 있으면 동하중계수 α값과 율동참여자의 하중 W_p만으로 율동가진을 받는 바닥판의 최대가속도 응답을 구할 수 있고, 이를 각 코드에서 제시하는 허용진동가속도와 비교하여 바닥구조의 진동사용성 적합여부를 판별할 수 있다.

표 2. 설계용 동하중계수와 율동참여자의 하중 8),9)

율동의종류	가진진동수 f (Hz)	율동참여자하중 W_p (kPa)	동하중계수 α_i
댄싱:			
1차조화	1.5~3	0.6	0.5
공연 또는 운동경기:			
1차조화	1.5~3	1.5	0.25
2차조화	3~5	1.5	0.05
점핑:			
1차조화	2~2.75	0.2	1.5
2차조화	4~5.5	0.2	0.6
3차조화	6~8.25	0.2	0.1

표 2는 NBCC 1995와 AISC 1997에서 제시하는 설계용 동하중계수와 율동참여자의 하중표이다.

표 2를 이용하여 율동의 종류별로 설계하고자 하는 바닥판의 최대가속도 응답을 예측할 수 있다. 또한, 율동하중에 의한 동하중계수와 바닥판의 동적응답에 근거하여 식(5)와 같이 바닥판의 최소고유진동수를 구할 수 있다.[3)]

$$f_o \geq f\sqrt{1+\frac{k}{a/g}\frac{\alpha W_p}{W_t}} \quad (5)$$

여기서, k 는 상수로서 댄싱 1.3, 공연장 1.7, 에어로빅 2.0을 적용한다. 그러나, 식(2),(4),(5)를 이용하고 표 2에서 제시한 동하중계수를 적용하여 설계한 다수의 공연장에서 과다진동 문제가 발생하고 있는데, 이는 표 2에서 제시한 공연장의 동하중계수가 1970년대에서 1980년대초의 공연현장 진동 계측 연구결과를 토대로 만들어진 것으로서 최근의 강한 비트의 음악과 높아진 관객의 호응도와 열정, 스탠딩공연의 대중화 등을 미처 반영시키지 못하고 있는데 기인하고 있다.

3. 진동실험 및 계측

3.1 실험 및 계측 개요

진동실험 및 계측 대상 구조물은 기둥스팬 8.1m×9.0m의 철골구조물로서 구조평면도는 그림 2와 같다. 슬래브는 구조용 데크플래이트(골깊이 75㎜, 토핑 80㎜)를 사용한 합성슬래브이고, 상부에 무근 콘크리트 200㎜로 마감되어 있다.

실험은 해당스팬의 중앙하부에 가속도계를 설치하고, 실험모드해석 및 진동계측을 실시하였다. 표 3은 실험에 사용된 장비의 제원이다. 진동계측시 샘플링 진동수는 512Hz로 데이터를 획득하였으며, 진동수 분석은 0.125Hz 분해성능을 가진 진동수 분석기를 이용하였다.

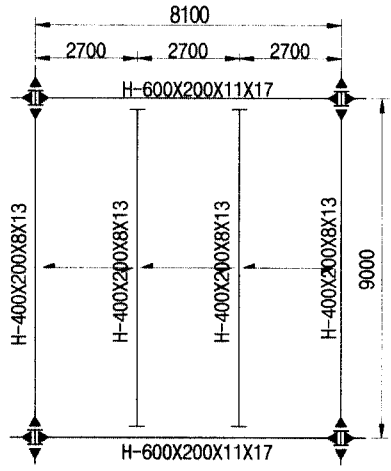


그림 2. 구조평면도

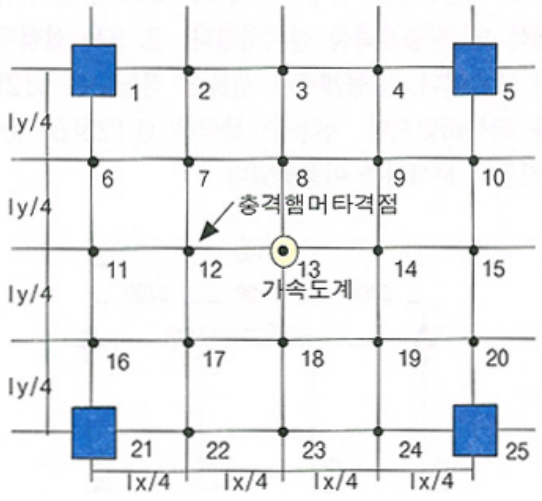
실험방법은 구조물의 동특성을 알아내기 위하여 실험모드해석을 실시하여 고유진동수와 감쇠율을 구하였으며, 점핑이 수반된 공연장 설계에 있어서 기존 기준의 적합성 여부를 판단하기 위해 참여인원수를 바꿔가며, 음악에 맞춘 점핑실험을 실시하였다. 점핑실험에 의한 가속도 응답을 진동수영역으로 변환시켜 가진진동수의 1차, 2차, 3차 조화항의 최대가속도 응답을 구하였으며 이를 다시 식(2)에 대입하여 동하중계수를 구해냈다. 진동계측은 같은 방법으로 실제 공연이 진행되는 상황에서 실시간으로 가속도 응답을 계측하였다.

표 3. 실험장비 제원

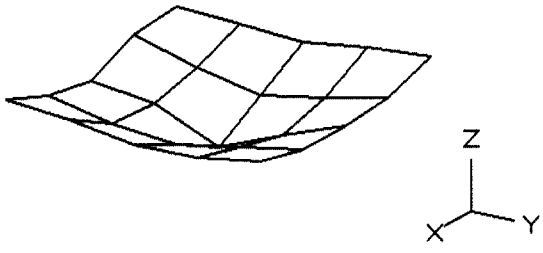
장비명	모델명	사 양
동적신호분석기	Scientific Atlantic Model : SA390	4채널 16bit 분해능
가속도계	Dytran Model : 3116A1	Sensitivity 5000mV/G Range : 0.2~500Hz
임팩트해머	PCB Model : 353A33	Input Range : 0~250lb Sensitivity : 0.18mV/G
모드해석프로그램	Star Modal Ver.5.1	모드해석

3.2 실험모드해석

실험모드해석은 압전형가속도계, 임팩트해머, 동적신호분석기를 사용하여 응답점 고정방식으로 수행되었다.



(a) 실험모드 해석모형



(b) 1차모드 형상

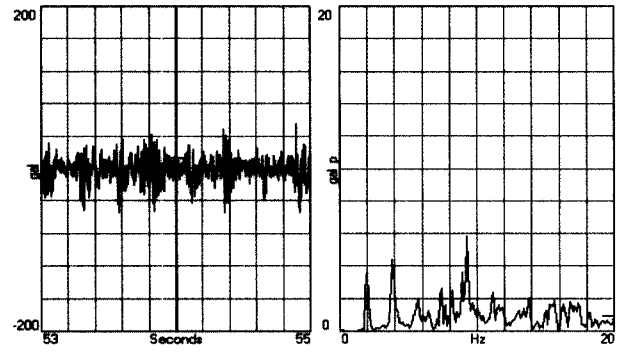
그림 3. 실험모드 해석모형과 1차모드 형상

그림 2와 같은 바닥시스템을 그림 3과 같은 5×5격자로 나누어 중앙의 13교점에 가속도계를 설치하고, 1~25의 각 교점에서 임팩트해머를 타격하여 진동수 응답함수를 구하고, 측정된 진동수 응답함수로부터 곡선적합을 통하여 고유진동수, 감쇠율, 모드형상을 구하였다. 실험모드 해석결과 구조물의 고유진동수는 8.57Hz로 나타났으며, 감쇠율은 5.46%로 나타났다.

3.3 점핑실험

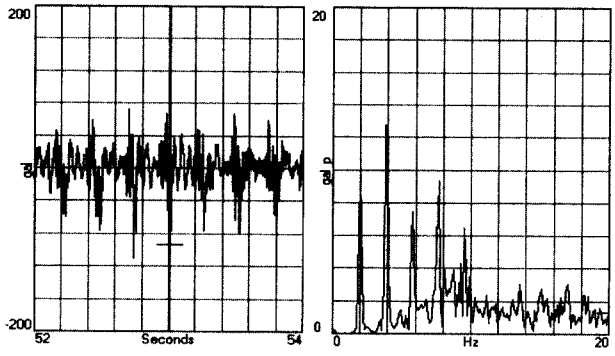
공연장 설계에 점핑기준의 적용성을 판단하기 위하여 공연장에서 점핑실험을 실시하였다. 기존 점핑기준은 율동참여인원 8명에 의하여 실시한 점핑실험과 실제 에어로빅장에서 계측된 결과를 토대로 작성되었다.[4] 그러므로, 실제 점핑이 수반되는 공연장 설계에 적용하기에는 참여인원수와 참여자하중에서 큰 차이를 보이므로 본 연구에서는 실제 공연장 상황에 근접하도록 하기 위하여 참여자의 밀집도를 약4인/㎡로 하고, 음악에 의한 가진진동수를 약 2Hz로 하며, 인원수를 50명, 100명, 150명, 200명으로 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

그림 4는 인원수에 따른 점핑실험에 의해 계측된 시간이력과 스펙트럼(Magnitude Spectrum)곡선으로서 가속도의 단위는 gal(㎝/sec^2)이다. 실험결과 전체적으로 3~4개의 조화항과 바닥판의 고유진동수 부근에서 피크를 형성하고 있는 것으로 나타났다. 그림 4(a)는 50명이 점핑을 실시한 경우로서 상대적으로 가진력이 작아 1,2차 조화 진동수보다는 구조물의 고유진동수에 인접한 부근에서 피크값을 나타내고 있다. 하지만, 그림 4의 (b),(c)는 각 조화항차수별 진동수대에서 뚜렷한 피크를 보이고 있으며, 상대적으로 고유진동수대에서는 작은 값을 보이고 있다. 그림 4의 (d)는 200명이 점핑을 실시한 경우로서 실험인원의 숫자가 많아짐에 따라 참여자의 조화가 흐트러지고, 실험이 후반부에 실시되어 점핑인원이 지쳐서 약한 충격가진에 의한 결과가 나타난 것으로 보여진다. 그래서, 조화항차수별 진동수 대역보다는 고유진동수 부근에서 비조화적인 약한 충격에 의한 자유진동이 지배적으로 나타났다.

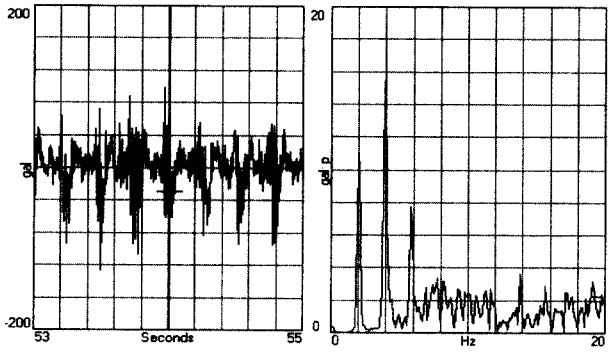


(a) 50명

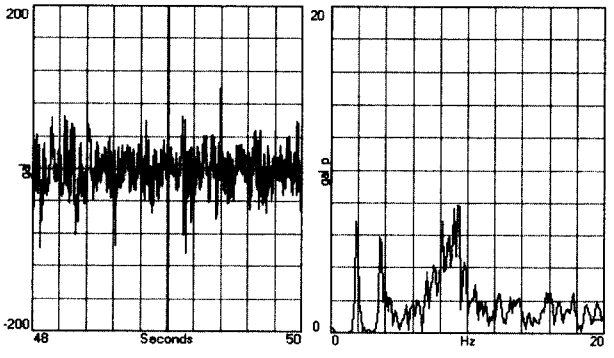
그림 4. 점핑실험 결과



(b) 100명



(c) 150명



(d) 200명

그림 4. 점핑실험결과(계속)

그림 4의 실험결과를 토대로 표 4와 같이 동하중계수를 산정하였고, 실험에서 산정한 동하중계수를 이용하여 최소고유진동수를 구하고, 이를 기존의 공연장 기준, 점핑기준에 의한 결과와 비교한 것이 표 5이다.

표 4에서 볼 수 있듯이 α_1=0.55~1.19, α_2=0.06~0.37, α_3=0.03~0.06으로서 공연장 기준의 α_1=0.25, α_2=0.05, 점핑기준의 α_1=1.5, α_2=0.6, α_3=0.1과 명백한 차이를 보이고 있고, 표 5에서 설계시 요구되는 최소고유진동수의 한계도 최대 3Hz의 범위까지 차이가 나고 있으므로 비록 점핑을 수반하는 스탠딩 공연일지라도 점핑기준의 도입은 과다설계를 초래하고, 공연장 기준은 과다진동을 초래할 우려가 있다.

표 4. 점핑실험에 의한 동하중계수

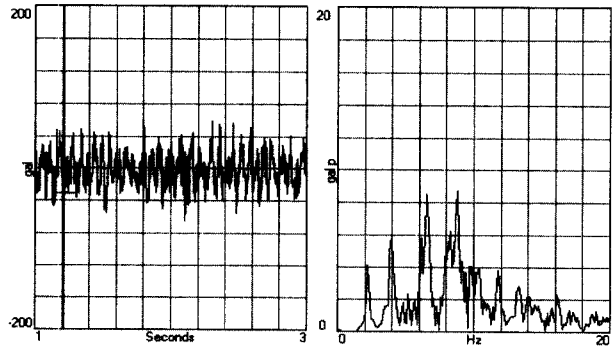
TEST No.	참여인원수 (명)	가진진동수 (Hz)	동하중계수		
			α_1	α_2	α_3
1	50	1.85	0.94	0.23	0.03
2	100	1.91	1.19	0.37	0.06
3	150	1.93	1.02	0.30	0.05
4	200	1.79	0.55	0.06	0.03

표 5. 최소고유진동수

TEST No.	참여인원수 (명)	최소고유진동수(NBCC기준)		최소고유진동수 (실험결과, Hz)
		공연장기준 (Hz)	점핑기준 (Hz)	
1	50	3.94	6.29	5.82
2	100	4.20	7.65	6.55
3	150	4.40	8.87	6.85
4	200	4.18	9.00	6.12

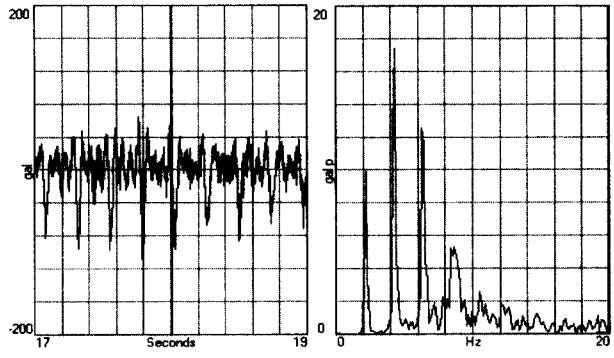
3.4. 공연진동계측

공연진동계측은 공연장 하부에 가속도계를 설치하고 실시간 상시계측시스템을 구축하여 2000년 7월 이래로 장기진동계측을 실시하고 있다. 공연장내에서 시간영역에서 최대가속도응답이 40gal을 초과하는 강한 진동이 발생한 공연을 대상으로 진동수 분석을 실시하고, 탁월진동수에서의 최대가속도응답을 구한 뒤, 식(2)를 이용하여 동하중계수를 산정하였다. 그림 5는 주요공연 계측결과이다.

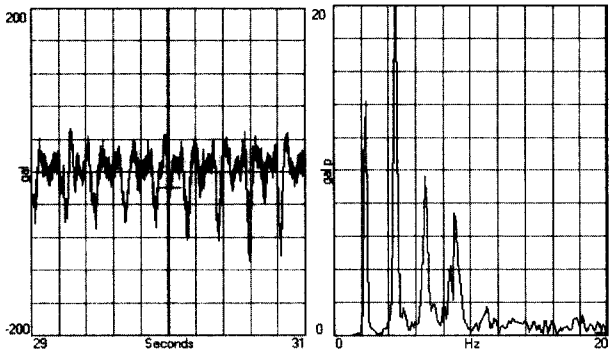


(a) 공연 #2, f_1=2.1Hz

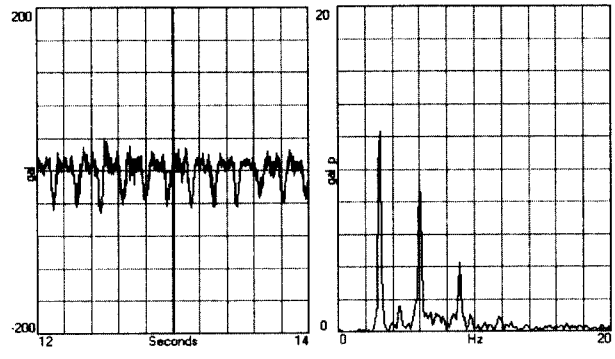
그림 5. 공연진동 계측결과



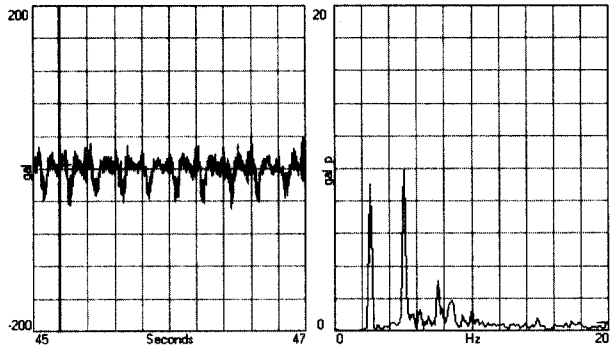
(b) 공연 #6, f_1=2.1Hz



(c) 공연#8, f_1=2.3Hz



(d) 공연 #9, f_1=3.0Hz



(e) 공연#10, f_1=2.5Hz

그림 5. 공연진동 계측결과(계속)

공연진동 계측결과 그림 5(a)에서는 점핑실험의 경우와 마찬가지로 약한 충격이나 가진원의 조화가 흐트러졌을 경우로서 구조물의 고유진동수 부분이 지배적인 진동수로 나타남을 볼 수 있다. 그림 5(b)~(e)에서는 명확히 구분되는 3개 이상의 피크가 보이는데, 이는 각각 가진진동수의 1차, 2차, 3차 조화항과 고유진동수로서 기존에 2차 조화항까지만을 고려토록 한 NBCC규준과는 명확한 차이를 나타내고 있다.

계측결과 가진진동수의 범위는 1.9~3.1Hz로서 NBCC에서 제시하는 1.5~3.0Hz와 큰 차이는 나지 않으나, 2,3차 조화항의 경우는 명백한 차이를 나타내는데, 이를 표 6에 나타내었다.

표 7은 공연진동계측결과를 이용하여 구해진 동하중계수이다. 여기서 참여자 하중은 1인당 60kg을 기준으로 하여 입장인원의 하중을 개략적으로 산정한 것이다. 계측결과 NBCC의 공연장 기준은 동하중계수와 참여자 하중 측면에서 과소평가되어 있는 것으로 나타났다.

표 6. 가진진동수 비교

	가진진동수		
	1차	2차	3차
계측치	1.9~3.1	3.8~6.2	5.7~9.3
NBCC 기준	1.5~3.0	3.0~5.0	-

표 7. 공연 동하중계수

공연No.	가진진동수 (Hz)	동하중계수			참여자하중 (kg/m²)
		α_1	α_2	α_3	
#1	1.9	0.34	0.11	0.01	200
#2	2.1	0.35	0.02	0.01	250
#3	3.1	0.33	0.02	0.01	250
#4	2.1	0.49	0.16	0.02	223
#5	2.1	0.38	0.14	0.04	223
#6	2.1	0.47	0.17	0.04	223
#7	2.4	0.58	0.14	0.02	223
#8	2.3	0.59	0.19	0.01	223
#9	3.0	0.33	0.04	0.01	170
#10	2.5	0.37	0.07	0.01	170

4. 결과분석

공연진동의 새로운 설계 가이드라인을 설정하기 위해 점핑실험 및 공연진동계측을 실시하였다. 점핑실험에서는 1차 조화항의 경우 동하중계수 α_1=0.71~1.19의 값을 가지나, 공연진동계측결과 α_1=0.33~0.59의 값으로 나타났다. 이는 점핑실험의 경우는 이상적인 경우로 피험자 모두에게 박자를 맞춘 점핑을 사전에 인지시킴으로 인하여 발생된 결과

로 보여진다. 실제 공연은 입장인원 전체가 모두 동시에 점핑을 실시하지 않고 보다 자유로운 분위기가 형성되기 때문에 점핑실험결과보다는 오히려 공연진동 계측결과가 실제 동하중계수에 더욱 근접하는 것으로 판단된다.

하지만 양자모두 기존의 공연장 기준이나 점핑기준과는 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 그림 6은 공연진동 계측결과와 8명의 점핑실험결과(Pernica, 1990)[4], NBCC기준의 동하중계수 등을 서로 비교한 그래프이다. 그림 6에서 공연진동계측결과는 점핑기준과 비교하여 비교적 진동수대역의 범위가 넓은 것을 알 수 있으며, 전체적으로 1차 가진진동수가 2.0~2.5Hz일 때 동하중계수가 최대값을 나타냈으며, 2.5Hz초과시 눈에 띄게 동하중계수가 줄어드는 것을 볼 수 있다.

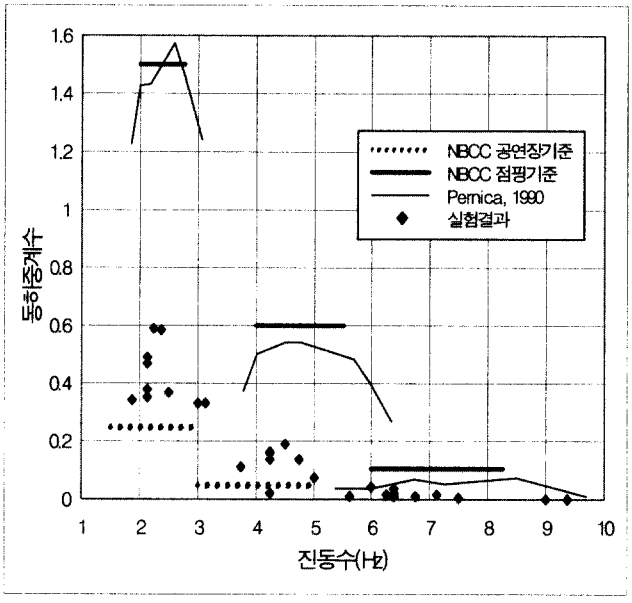


그림 6. 동하중계수 비교

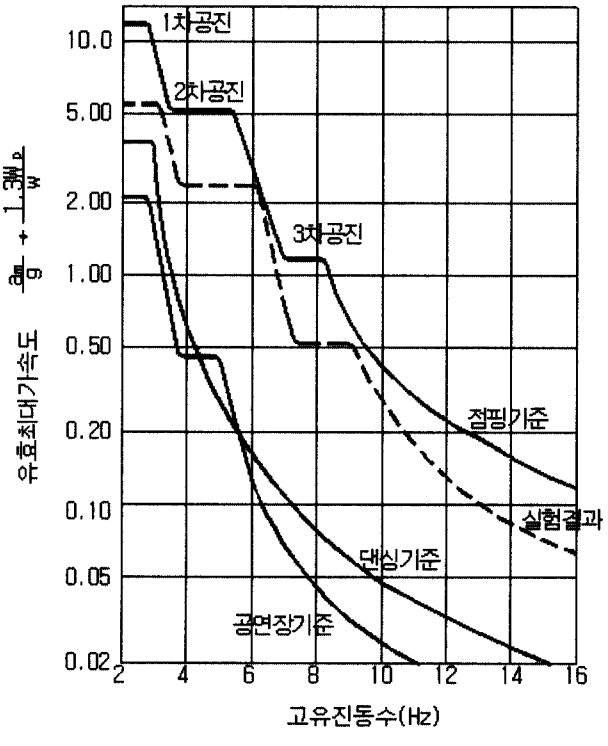


그림 7. 유효최대가속도

식(2)와 (4)에 동하중계수를 대입하고 풀면, 율동참여자 하중에 따른 유효최대가속도를 구조물의 고유진동수별로 구해낼 수 있다.[10]

그림 7은 본 연구에서 공연진동 계측결과 구해진 동하중계수중 조화항차수별 최대값을 이용하여 감쇠율 6%를 적용하는 경우의 유효최대가속도를 그래프로 나타내고, 이를 NBCC기준과 비교한 것이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 공연진동의 응답은 NBCC기준의 공연장 기준보다는 점핑 기준과 유사한 양상을 보이는 반면 절대값은 작은 것으로 나타났다.

5. 결 론

공연진동을 받는 바닥 구조물의 설계 가이드라인을 제시하기 위한 점핑실험과 공연진동 계측결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공연장 구조물의 바닥진동 설계를 위하여 NBCC 1995, AISC 1997에서는 2차 조화항까지 고려토록 되어 있으나, 실험결과 3개의 조화항에서 뚜렷한 피크를 나타내고 있다. 그러므로, 점핑을 수반한 강한 충격을 받는 스탠딩 공연장 바닥진동 설계시에는 반드시 3차 조화항까지 고려해야만 한다.

(2) 점핑실험 결과, α_1=0.55~1.19, α_1=0.06~0.37, α_3=0.03~0.06으로 NBCC의 점핑기준 (α_1,=1.5, α_2=0.6, α_3=0.1)과 큰 차이를 보이고 있다. 또한, 해당 공연장의 최소 고유진동수 요구조건도 실험결과 f_o=6.85로 나타났으나, 점핑기준 적용시 f_o=9.0Hz를 요구하고 있다. 이는 NBCC의 기준이 율동참여인원 8명을 대상으로 한 점핑실험과 실제 에어로빅장에서 계측된 결과를 토대로 만들어진 것으로서, 율동참여 인원수와 하중 밀집도면에서 큰 차이를 보이기 때문이다. 그러므로, 비록 점핑을 수반하는 스탠딩공연 일지라도 NBCC의 점핑기준에 의한 동하중계수와 최소고유진동수 산정은 과다설계를 초래할 우려가 있다.

(3) 장기적인 상시 공연진동 계측결과 동하중계수의 최대값은 α_1=0.6, α_2=0.2, α_3=0.05이내인 것으로 나타났다. 이는 NBCC 공연장 기준에서 제시하는 α_1=0.25, α_2=0.05를 초과하며, 점핑기준의 α_1=1.5, α_2=0.6, α_3=0.1에는 못미치는 수준이다.

공연진동 계측결과가 점핑실험에 비해 작게 나왔지만, 이는 실제 공연시 조화가 더욱 흐트러져 있으며, 참여인원 모두가 점핑에 참여하는 것이 아니기 때문에 나타난 결과로 보여지며, 실제상황에 더욱 근접한 것으로 판단된다.

(4) 공연진동 계측결과 구해진 동하중계수를 이용하여 구조물의 고유진동수별 최대가속도응답을 구할 수 있는 그래프를 제시하였다. 그래프의 양상은 NBCC의 공연진동 기준보다는 점핑기준의 양상과 유사한 형태를 보이지만 응답의 절대치는 작은 것으로 나타났다.

(5) 공연진동 계측결과 가진진동수는 1차의 경우 1.9~3.1Hz, 2차의 경우 3.8~6.2Hz, 3차의 경우 5.7~9.3Hz로 나타났으며, 공연진동의 1차 가진진동수의 경우 2.0~2.5Hz일 때 동하중계수 및 가속도응답이 최대인 것으로 나타났으며, 2.5Hz를 초과함에 따라 감소를 시작하여 3.0Hz 이상의 경우는 거의 발생하지 않았다.

참 고 문 헌

1. Bachman, H., Ammann, W., 1987, "Vibrations in Structures Induced by Man and Machines", IABSE
2. Allen, D.E., Rainer, J.H., Pernica, G., 1985, "Vibration Criteria for Assembly Occupancies", Can. J. Civ. Eng. 12(3), pp.617~623
3. Allen, D.E., 1990, "Floor vibrations from aerobics", Can. J. Civ. Eng. 17, pp.771~779
4. Pernica, G., 1990, "Dynamic Load Factors for Pedestrian Movements and Rhythmic Exercises", Canadian Acoustics 18(2), pp.3~18
5. Pernica, G., 1983, "Dynamic Live Loads at a Rock Concert", Can. J. Civ. Eng. 10, pp.189~191
6. Ebrahimpour, A., Sack, R.L.,Patten, W.N., 1996, "Measuring and Modeling Dynamic Loads Imposed by Moving Crowds", ASCE J. of Str. Eng. Vol.122, No.12, pp.1468~1474
7. Ebrahimpour, A., Sack, R.L., 1992, "Design Live Loads for Coherent Crowd Harmonic Movements", ASCE J. of Str. Eng. Vol.118, No.4, pp.1121~1136
8. NBCC, 1995, User's Guide-Structural Commentries to Part 4 of the National Building Code of Canada, 1995, National Research Council of Canada, Ottawa
9. AISC, 1997 Steel Design Guide Series 11, Floor Vibrations Due to Human Activity, American Institute of Steel Construction, Chicago
10. ATC, 1999, Minimizing Floor Vibration, Applied Technology Council, California

(접수일자 : 2002년 9월 10일)