Journal of the Korean Institute of Educational Facilities
http://dx.doi.org/10.7859/kief.2019.26.2.003
ISSN 1227-7258(Print)
http://www.kief.or.kr/modules/doc/index.php?doc=search&___M_ID=142

대학 기숙사 건물의 안전성 및 사용성 평가 연구

A Study on the Safety and Usability of University Dormitory Buildings

채 경 훈* 허 석 재** 허 무 원**
Chae, Kyoung-Hun Heo, Seok-Jae Hur, Moo-Won

Abstract

This study evaluated the vibration use and safety of students living in the dormitories on the 12th and 14th floors by feeling uncomfortable. The measurement method was to measure the acceleration due to free vibration and single - person walking. The slab stiffness was then calculated, and the usability and safety were compared according to international standards. The natural frequency of the slab was 6.8 Hz. The natural frequency of a typical slab is around 15Hz. Therefore, the evaluation slab is judged as a flexible floor structure. It is considered that there is a high possibility of resonance in the middle of daily life because of low natural frequency and near harmonic component of walking vibration. As a result, the RMS acceleration level is within the tolerance range defined by ISO 10137 code, but the 13th floor exceeds the reference limit, so that a sensitive person could detect the vibration somewhat in the lying position.

키워드 : 최대응답가속도, 진동수가중, 제곱평균제곱근, 슬래브 강성
Keywords : Maximum Response Acceleration, Frequency-weighted, Root Mean Square, Slab Strength

1. 연구배경 및 목적

실무적인 관점에서, 진동으로 인한 건물의 피해 여부(사용성 저하)를 평가하는 현재의 기술은 요구되는 위치에서의 진동계측 값 또는 추정 값과 진동피해 기준의 한계 값을 상호 비교 평가함으로써 얻을 수 있다. 이 경우, 평가의 질은 정확한 계측 값의 취득 여부와 기준의 올바른 이해에 따라 좌우되기 때문에 두 판단근거에 대한 신뢰성 있는 데이터의 확보가 중요시 된다.

일반적으로 건물에 미치는 진동효과는 가진원의 특성, 수진부와의 전달특성, 그리고 건물의 응답특성에 따라 그 피해 규모가 다르며, 또한 이러한 요인들은 서로 연관되어 많은 변수를 발생시키기 때문에 건물에 대한 진동의 영향을 평가하기 위해서는 이들 모두에 대한 지식을 필요로 한다.

진동은 그 발생 메커니즘에 따라 건물에 미치는 유해성의 여부와 그 수준이 달라질 수 있다. 그 이유는 진동이 통과하는 매질의 종류에 따라 진동특성이 다르기 때문이다. 즉, 건물에 전달되는 진동의 크기나 지속시간 등이 가변적이며 건물의 기초 및 상부 구조물의 동적인 특성에 따라 피해의 정도를 좌우하는 진동응답의 크기가 결정되며 가진원의 동적특성(고유진동수)이 서로 다르기 때문이다. 그러므로 건물에 대한 진동의 영향을 평가한다는 것은 매우 복잡한 문제일 수밖에 없으며, 이에 대한 명확한 평가 또한 쉽지 않다.

하지만, 실무적인 관점에서는 현존하는 많은 진동피해 기준이나 지침들이 그러하듯이 진동원과 대상 건물 사이에 어떠한 관계를 갖는지 그리고 전달된 파의 종류가 어떠한 것인지 등에 대한 기본적인 정보는 무시되며, 건물에 도달된 진동의 크기와 특성만이 중요시 된다.

건물의 실제적인 진동피해 여부는 건물에 직접 입력되는 진동의 특성과 크기, 그리고 건물이 가지는 고유의 진동특성, 진동이 전달되는 메카니즘의 차이에서 문제가 나타나기 때문이다. 따라서 진동에 의한 사용성 저하로 인한

* Master Course, Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Korea
** Research Profeesor, Ph.D., Department of Architectural Engineering, Dankook Univ., Korea
Corresponding Author,
Tel: 82-31-8005-3725, E-mail: hmw01@nate.com
본 논문은 한국연구재단 이공분야기초연구사업(과제번호 : NRF-2018R1D1A1B07048570)에 의한 결과

직접적인 진동의 측정은 이러한 각각의 상황을 고려하여 측정하여야 한다. 또한, 만약 요구되는 위치에서 진동의 직접적인 계측이 가능하다면 문제는 간단하지만, 요구되는 위치에서 진동의 직접적인 계측이 불가능하거나 실측된 정보가 없을 경우(설계단계 포함)에는 추정 값이 사용되어야 하며, 정확한 추정 값을 얻기 위해서는 결국 진동의 발생 메커니즘과 매질에 따른 전파특성 등이 고려되어야만 한다. 단, 진동의 직접적인 계측이 가능한 경우에 있어서도 분명히 알아야만 하는 것은 모든 종류의 건물에 대하여 완전히 통합된 평가방법의 적용은 불가능하다는 사실이다.

현재, 건물에 대한 진동효과를 예측하기 위한 많은 기준이나 지침들이 존재하지만 피해에 대하여 안전한 진동수준에 대하여는 기준마다 그 값을 다르게 제시하고 있는데, 이는 측정위치, 실험대상, 안전의 수준 등에 대한 척도가 기준마다 다르게 적용되고 있기 때문이다. 적용하고자 하는 기준과 부합하는 측정위치와 측정값의 올바른 취득이, 설계단계에서는 정확한 진동정보의 예측이 진동영향 평가의 질을 좌우하는 첫 번째 중요 인자로서 취급되는 이유는 바로 이 때문이다.

본 연구는 대학교 기숙사 건물의 12층, 13층 및 14층에 거주하는 학생들이 진동으로 인한 민원을 제기하여 해당 층의 자유진동 계측을 통해 슬래브 강성을 산출함과 동시에 1인 보행을 통해 해당 층의 사용성과 안전성을 평가해 보고자 한다.

2. 바닥진동 국제 기준

수직진동에 대한 바닥슬래브의 성능평가 규준으로는 국제표준기구(ISO)에서 진동에 관한 평가기준을 공표한 이래로 일본 건축학회, 미국 ANSI, LRFD, 캐나다 CSA, 독일의 DIN 등의 진동규준을 개발하여 진동에 의한 사용성 평가에 활용하도록 권고해왔다.

이후 구조물의 세장화, 경량화에 따라 건축물 진동문제가 사회적으로 대두되면서 체계화된 통합 지침서가 필요하게 되었고 American Institute of Steel Construction (AISC)와 Canadian Institute of Steel Construction(CISC)이 상호 협력하여 Allen Murray의 연구를 바탕으로 AISC Design Guide 11를 발간하였다.

2.1 ISO 2631-1[1)]

ISO 2631-1에서는 전신진동(whole-body vibration)에 노출된 인체에 대하여 사용자의 건강(health), 안락함(comfort), 진동인지(perception)와 멀미(motion sickness) 현상을 정량적으로 평가하는 방법을 규정하고 있다. ISO 2631-1에서는 평가하고자 하는 진동현상 및 앉은 자세, 선 자세와 누운 자세 등 인체가 진동에 노출되는 방향에 따라 각기 다른 진동수가중필터를 적용하여 진동수가중된 가속도응답(Frequency-Weighted Acceleration Response)을 평가에 사용하며, 가속도응답의 형태에 따라 RMS, MTVV나 VDV 등 다양한 평가지표를 통해 인체진동을 평가한다.

2.1.1 진동수가중

ISO 2631-1에서는 주요 활동과 인체에 전달되는 진동방향에 대한 w_k, w_d, w_f등의 진동수가중을 제시하고 있다. Table 1.은 ISO 2631-1에 제시된 다양한 진동수가중을 나타낸 것이다.

Table 1. Frequency-weighted of ISO 2631-1

Frequency -weighted	Health	Comfort	Perception	Motion Sickness
w_k	z-axis, Sitting Position	z-axis, Sitting Position z-axis, Standing Position, Lying position	z-axis, Sitting Position z-axis, standing position	-
w_d	x-axis/y-axis, Sitting Position	x-axis/y-axis, Sitting Position x-axis/y-axis, Standing Position		-
w_f	-	-	-	Vertical Axis

2.1.2 진동 사용성 평가지표

ISO 2631-1의 진동평가는 기본적으로 식 (1)과 같이 정의된 주파수 가중된 RMS가속도 a_w를 평가지표로 활용한다.

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2{}_w(t) dt \right]^{0.5} \quad (1)$$

여기서, a_w : 주파수가중 된 가속도,
T : 응답측정시간

1) International Organization for Standardization, ISO 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part 1: General Requirements, ISO, Geneva, Switzerland, 1997.

2.1.3 최대과도 진동값(Maximum Transient Vibration Value, MTVV)

주파수 가중된 RMS 가속도는 인체의 진동을 평가함에 있어 유의미한 지표이지만, 지속시간이 짧은 충격이나 간헐진동(Transient Vibration)을 평가하고자 하는 경우 피크성 진동을 포함한 추가적 평가방법이 필요하다. 이에 ISO 2631-1에서는 주파수 가중된 RMS 가속도에 대한 응답의 최대 순간 가속도의 비율인 'Crest Factor'를 정의하고, 이 값이 9보다 큰 값을 가지는 진동의 경우 최대과도 진동값(Maximum Transient Vibration Value, MTVV)나 진동누적치(Vibration Dose Value, VDV)를 지표로 하여 인체의 진동을 평가한다. 간헐적인 진동이나 충격 등을 평가하는 방법으로 식 (2)에 따라 순간시간에서의 이동 RMS 가속도를 사용할 수 있다.

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{T}\int_{t_0-\tau}^{t_0} a^2{}_w(t)dt\right]^{0.5} \quad (2)$$

여기서, t_0 : 순간시간,
$a_w(t)$: 주파수가중 된 가속도
τ : RMS 산정을 위한 적분시간

측정된 전체시간에 대해서 이동RMS의 최대값을 최대과도 진동값이라 한다. 최대과도 진동값은 일반적으로 주파수 가중된 RMS가속도에 비해 큰 값을 가지기 때문에 보다 보수적인 진동평가가 요구될 경우 진동 성능 평가지표로 활용될 수 있다. 최대과도 진동값은 아래 식 (3)을 통해 산정한다.

$$MTVV = \max\left[a_w(t_0)\right] \quad (3)$$

여기서, $a_w(t_0)$: 주파수가중된 이동 RMS 가속도

2.1.4 진동 사용성 평가

건물의 진동 사용성 평가에 있어 대부분의 경우에는 불쾌감을 감소시키거나 제거하는 것을 목표로 하기 때문에 안락감 지표에 따른 진동 사용성 평가를 요한다. 앞서 산정한 주파수가중 RMS 가속도나 최대과도 진동값 등의 지표를 통해 아래 조건을 만족하는지 검토한다.

Table 2. Anxiety Evaluation of ISO 2631-1

Less Than 0.315m/s^2	0.315m/s^2 ~0.63m/s^2	0.5m/s^2 ~1.0m/s^2	0.8m/s^2 ~1.6m/s^2	1.25m/s^2 ~2.5m/s^2	2m/s^2 or more
Not uncomfor-table	Cause a little anxiety	Cause some anxiety	Cause anxiety	Cause considerable anxiety	Cause extreme anxiety

2.2 ISO 2631-1[2)]

ISO 10137:2007에서는 건물이나 육교 등의 구조물에서 진동에 노출된 사용자의 사용성을 정량적으로 평가하는 방법을 규정하고 있다. ISO 2631-2:1989에 제시된 평가지표와 진동수 가중을 기초로, 정량화를 통해 인체진동을 평가한다. ISO 10137은 진동에 대한 인체의 노출에 대한 기준곡선을 지정한 후 건물의 용도에 따른 기준곡선을 제시하고 있다. 이때 평가는 RMS 가속도를 기반으로 한다. Figure 1은 ISO 10137에서 제시하는 수직방향 진동 사용성 평가곡선이다.

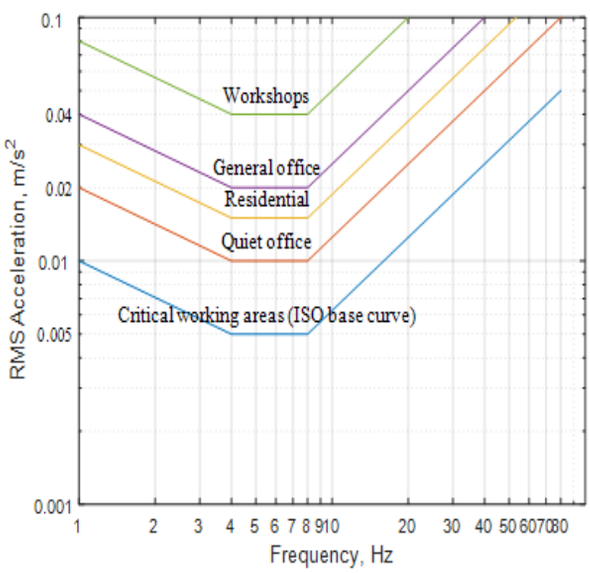

Figure 1. Vertical Usability Evaluation Curve of ISO 10137

실의 사용용도에 따른 RMS 가속도 크기는 ISO 기준곡선(R=1, 0.005 m/s^2)을 기준으로 가중계수를 적용하여 '조용한 사무실 (R=2)', '일반 사무실 (R=4)', '작업장 (R=8)'로 구분하였다. 여기서 R은 응답계수로 계측된 RMS 가속도를 ISO 기준곡선의 최소 RMS 진동크기 0.005m/s^{2}로 나눈 값이다.

2.3 AISC[3)]

2) International Organization for Standardization, Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003.

3) AISC, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel

ISO 2631-1과 ISO 10137과는 달리 AISC Design Guide 11에서는 ISO 2631-2:1989의 기본곡선을 기초로 구조물의 고유진동수와 이때 응답의 최대응답가속도로 구조물의 진동성능을 평가한다.

실의 사용용도에 따른 최대 가속도 크기는 ISO 기준곡선(R=1, 0.05g)을 기준으로 가중계수를 적용하여 '사무실, 주거(R=10)', '실내 보도교, 쇼핑몰, 만찬 및 춤(R=30)', '율동 행동, 실외 보도교(R=100)'으로 구분하였다. 공연장 바닥과 같이 리듬활동에 대한 큰 진동이 발생되는 바닥판의 허용 진동 가속도 크기를 제시한 기준으로는 AISC가 유일하다.

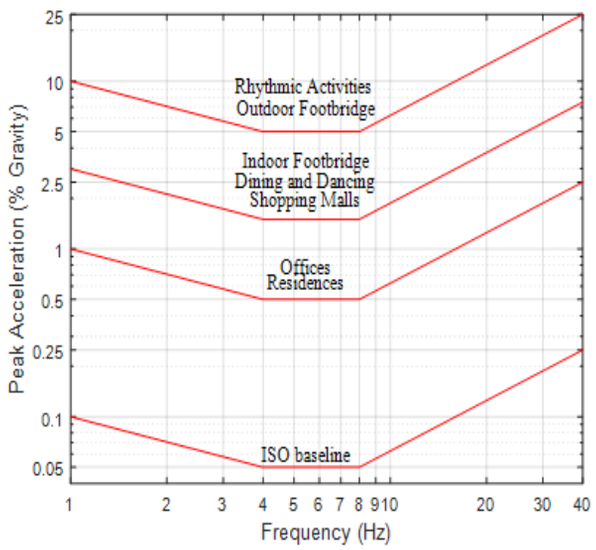

Figure 2. Vertical Usability Evaluation Curve of AISC

AISC Design Guide 11는 사람의 보행(Walking), 리듬운동(Rhythmic Activities), 기계설비(Equipment)를 건축물에서 진동을 발생시키는 주요인으로 분류한다. 이 각각의 요인에 상응하는 최대값 산정식과 진동수 평가식을 통해 진동에 대한 설계 가이드를 제시하고 있다.

AISC에서 제시하는 사용성 평가 방법은 Figure 2에 제시된 허용한계치와 계산된 구조물의 최대응답을 비교하여 그 응답이 한계치보다 하회함을 확인하는 것이다. 보행에 대한 최대 가속도 크기는 식 (4)와 같다.

$$a/g = \frac{R\alpha_i p_o}{\beta w} cos(2\pi i f_{step} t) \quad (4)$$

여기서, a/g : 가속도이력과 중력하중의 비

R : 감소계수,

β : 감쇠비,

w : 유효중량,

f_{step} : 보행하중의 진동수,

i : 1차 하모닉 주파수

제시되 바와 같이 최대응답을 구하는 것이 목표로 바닥판의 고유진동수, 단위면적당 질량이 먼저 산정되어야 한다. 가진 행위별로 Table 3과 같은 동적계수를 활용하여 공진현상을 반영하도록 제시하고 있다.

Table 3. Dynamic Coefficient for Maximum Response Estimation

Harmony No.	Person Walking		Aerobics		Group Dancing	
1	1.6-2.2	0.5	2-2.75	1.5	1.5-3	0.5
2	3.2-4.4	0.2	4-5.5	0.6	-	-
3	4.8-6.6	0.1	6-8.25	0.1	-	-
4	6.4-8.8	0.05	-	-	-	-

대부분의 진동문제는 가진 주파수와 바닥판의 고유진동수가 근접할 때 발생된다. 따라서 보다 보수적인 설계를 위해서는 가진 주파수 의하모닉성분이바닥판고유진동수과 일치하도록해야하며, 최대 가속도 응답은 식 (5)와 같이 하모닉 성분이 포함된 응답까지 고려되어야 한다.

$$a_m = \left[\sum a^{1.5}{}_i\right]^{1/1.5} \quad (5)$$

AISC Design Guide 11에서는 제시된 최대가속도 산정 및 한계치와 비교방법 이외에도 공진현상 발생을 줄이기 위해 바닥판의 최소고유진동수를 식 (6)과 같이 적용하도록 제시하고 있다.

$$f_n \geq f\sqrt{1 + \frac{k}{a_0/g}\frac{a_i w_p}{w_t}} \quad (6)$$

여기서, K : 상수(군무 : 1.3, 에어로빅 : 2.0)

a_0/g : 가속도 한계 값(민감한 바닥 0.05 이하)

2.4 SCI P354[4)]

SCI P354: 2009(Design of Floors for Vibration: a New Approach, The Steel Construction Institute)에서는 전신진동에 노출된 인체에 대하여 사용자의 안락함을 정량적

Construction Inc., Chicago, 1999.

4) SCI, Design of Floors for Vibration : A New Approach, The Steel Construction Institute, 2009.

으로 평가하는 방법을 규정하고 있다. 평가를 위해 SCI P354에서는 ISO 2631-1의 진동수가중과 같은 방법을 사용하여 평가하고자 하는 진동현상 및 앉은 자세, 선 자세와 누운 자세 등 인체가

진동에 노출되는 방향에 따라 각기 다른 주파수가중필터를 적용하여 진동수가중 된 가속도응답을 사용하며, 가속도응답의 형태에 따라 각기 다른 정량화를 통해 인체진동을 평가한다.

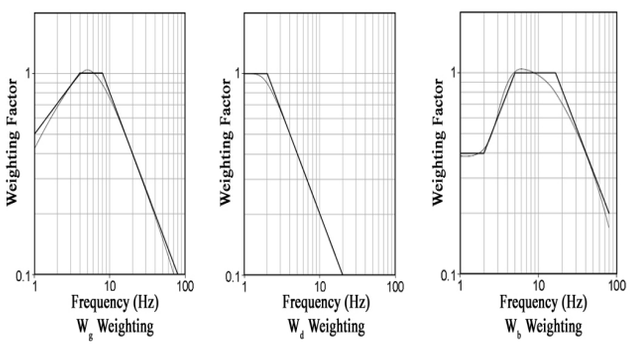

Figure 3. Frequency-weighted curve

Table 4. Recommended Response Coefficient for Excitation Specified in SCI

Place	Response factor
Office	8
Shopping mall	4
Store	4
Stairs(Office)	32

3. 기숙사 계측 및 평가

3.1 건물 개요

연구대상 건물은 인천광역시 OO구에 위치해 있으며, 건물의 규모는 지하 1층, 지상 14층으로 건물의 용도는 사무실과 학생생활관이다. 140개의 실이 있으며, 총 수용인원은 357명이다. Figure 4에 해당 층의 구조평면도를 나타내었고, 측정위치는 12층 13층 및 14층의 중앙부복도와 중앙부 방에서 계측하였다.

3.2 진동 계측 및 평가

3.2.1 바닥 진동 계측

해당 층의 상세 계측 위치는 방은 Figure 5에 나타내었고, 복도는 Figure 6에 나타내었다. Table 5는 계측위치에 가속도계 번호를 나타내었다. 각 위치별 자유진동은 약

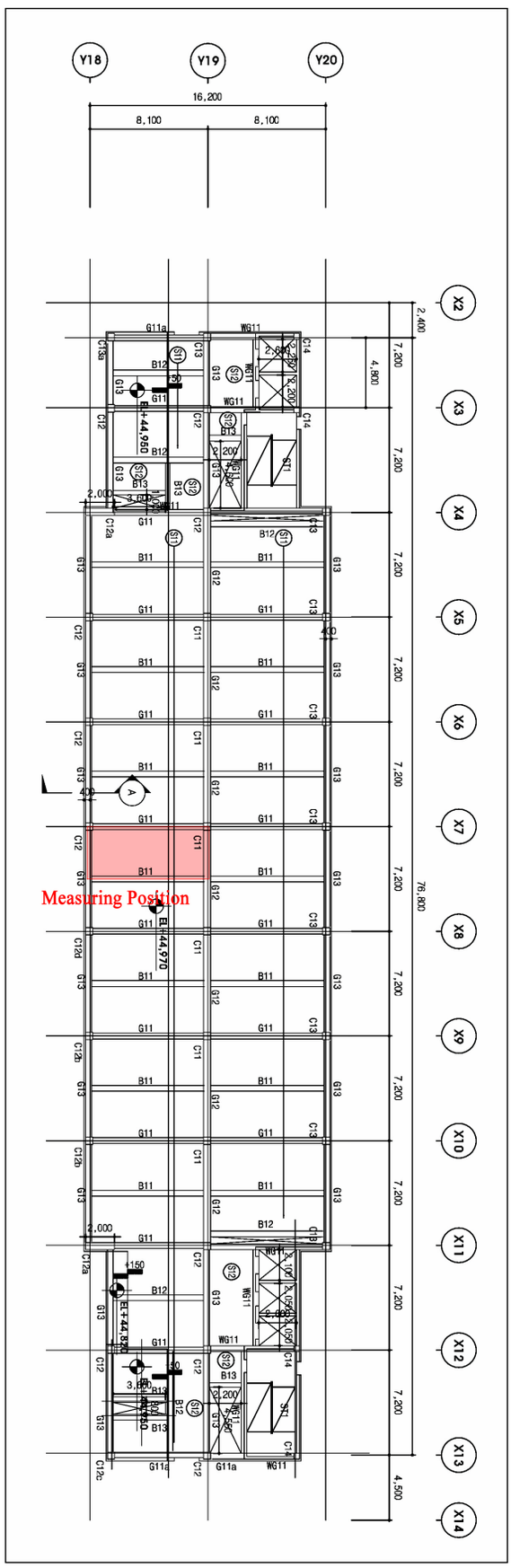

Figure 4. Structural Plan(13th Floor)

1,800초 내외로 계측하였고, 충격하중 실험은 같은 위치에서 5번 반복하여 실험하였다.

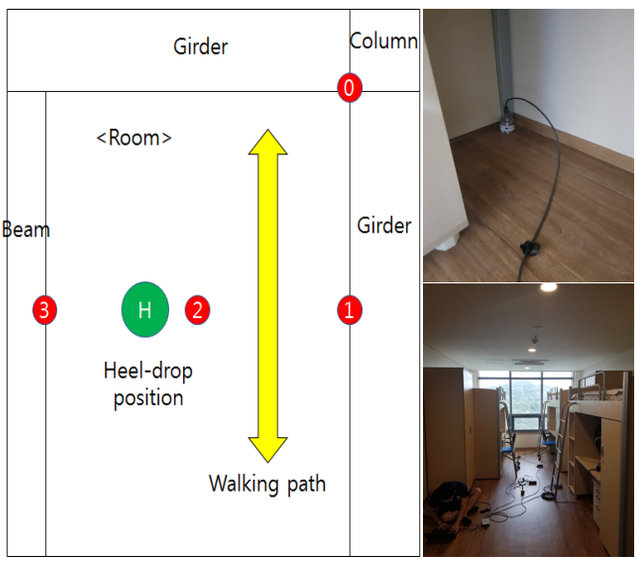

Figure 5. Room Measurement Position

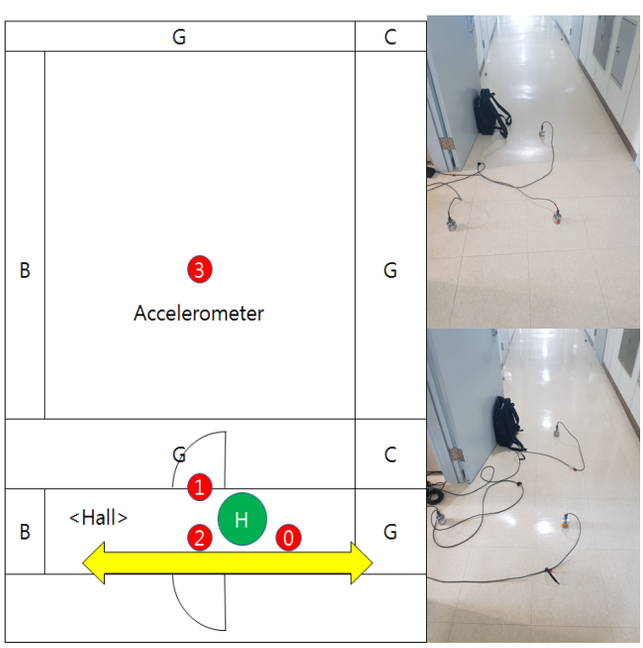

Figure 6. Hall Measuring Position

Table 5. Measuring Accelerometer

Room	Hall
Ch0 : Column Ch1 : Girder Ch2 : Center of Slab Ch3 : Beam	Ch0 : Hall outside Ch1 : Door Ch2 : Hall center Ch3 : Room center

3.2.2 바닥 진동 계측 결과 평가

Table 6과 Table 7은 각층 방의 제곱평균제곱근 값과 최대가속도 값을 나타낸 표이며, Figure 7은 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 또한, Table 8과 Table 9는 각층 복도의 제곱평균제곱근 값과 최대가속도 값을 나타낸 표이며, Figure 8은 이를 도식화하여 나타낸 것이다.

Table 6. Root Mean Square of Room

Story	Column	Girder	Slab	Beam
12F	0.0007	0.0009	0.0015	0.0009
13F	0.0003	0.0004	0.0006	0.0005
14F	0.0010	0.0014	0.0020	0.0019

Table 7. Maximum Responsre Acceleration Value of Room (unit:㎝/s^2)

Story	Column	Girder	Slab	Beam
12F	0.003	0.004	0.006	0.004
13F	0.002	0.003	0.007	0.006
14F	0.004	0.006	0.009	0.008

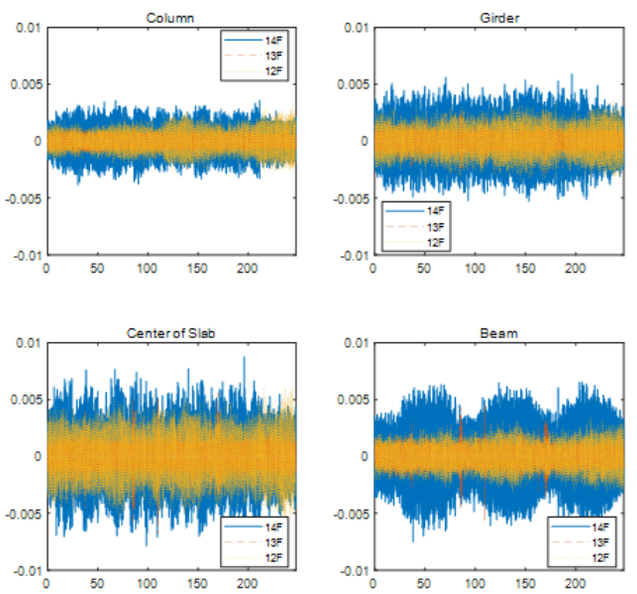

Figure 7. Root Mean Square and Maximum Response Acceleration(Room)

Table 8. Root Mean Square of Hall

Story	Column	Girder	Slab	Beam
12F	0.0009	0.0007	0.0008	0.0015
13F	0.0007	0.0005	0.0006	0.0014
14F	0.0009	0.0008	0.0008	0.0013

Table 9. Maximum Response Acceleration Value of Hall (unit:㎝/s^2)

Story	Column	Girder	Slab	Beam
12F	0.0037	0.003	0.0034	0.0066
13F	0.0032	0.0025	0.0031	0.0063
14F	0.0044	0.0034	0.0039	0.0088

Figure 9 및 Figure 10은 상시 진동에 대한 주파수 응답 그래프를 나타낸 것이다. Figure 11부터 Figure 14까지는 ISO 2631-1 에 근거하여 수직방향 전신진동에 대한

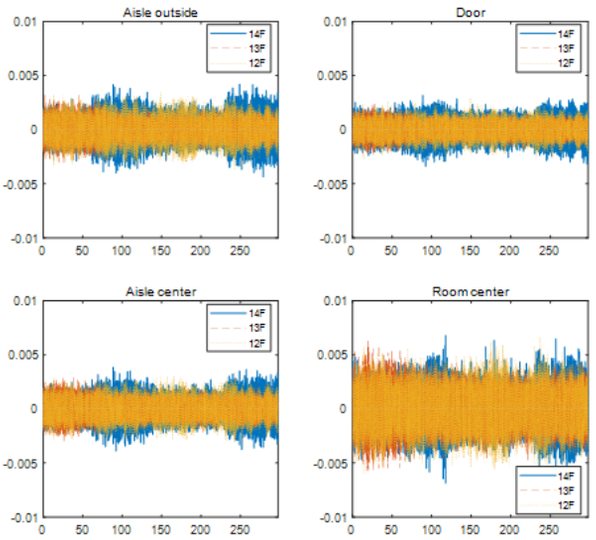

Figure 8. Root Mean Square and Maximum Response Acceleration(Hall)

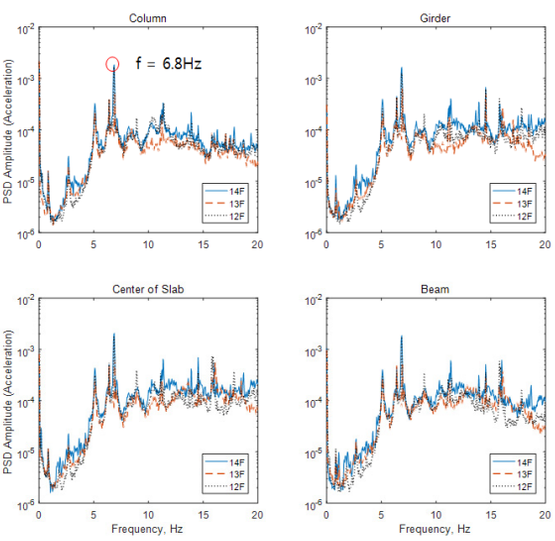

Figure 9. Ambient Vibration of Room

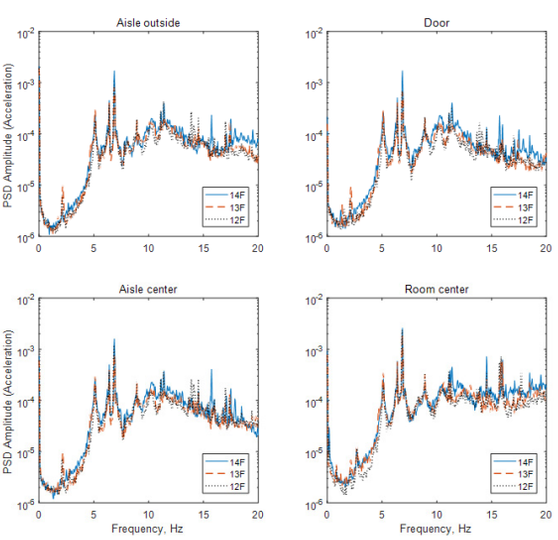

Figure 10. Ambient vibration of Hall

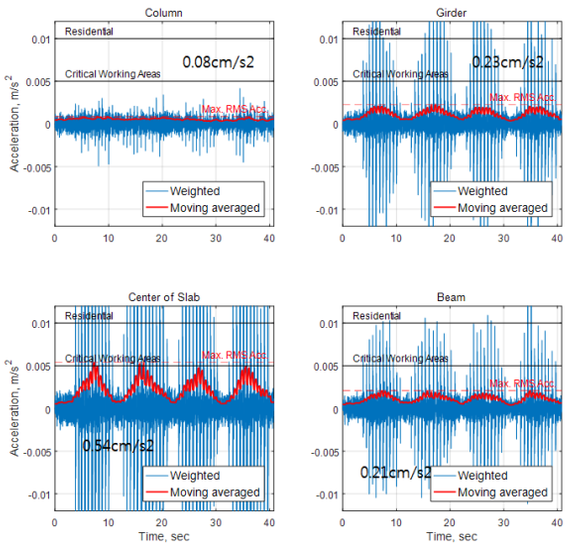

Figure 11. 12th Floor Result of Room (Walking)

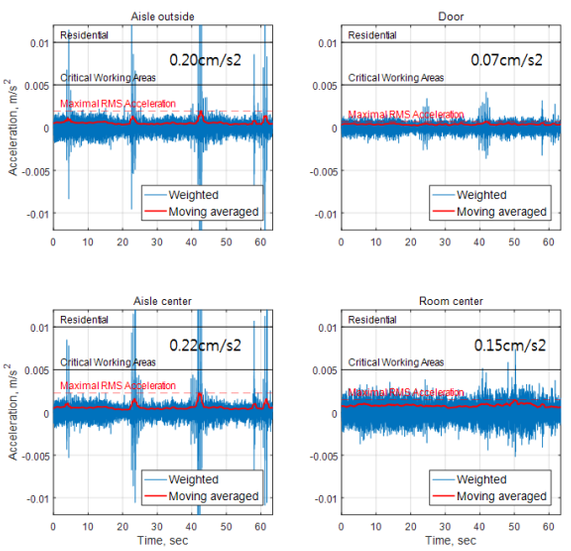

Figure 12. 12th Floor Result of Hall (Walking)

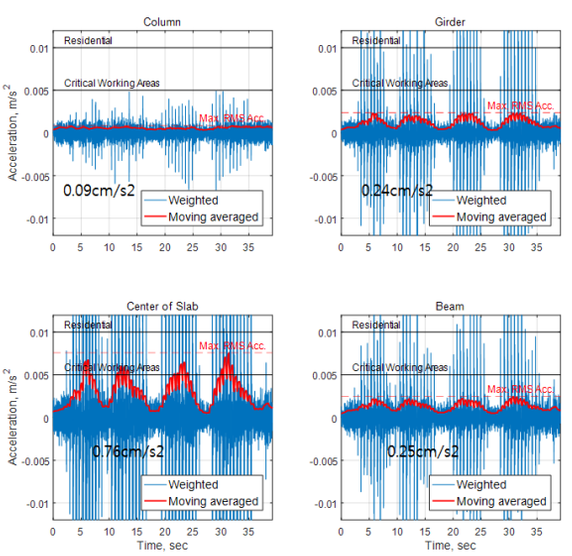

Figure 13. 13th Floor Result of Room (Walking)

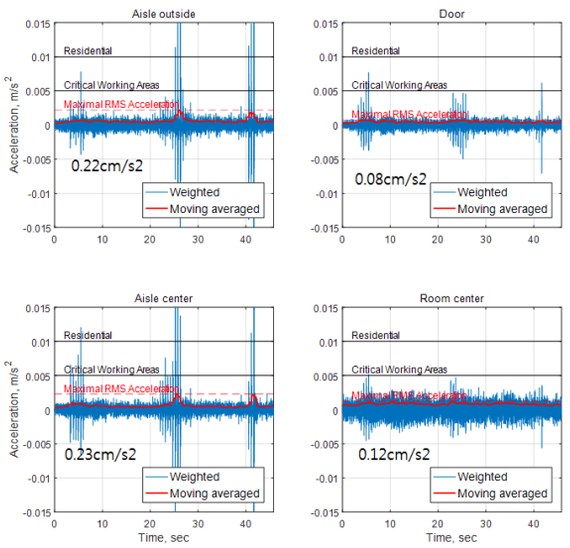

Figure 14. 13th Floor Result of Hall (Walking)

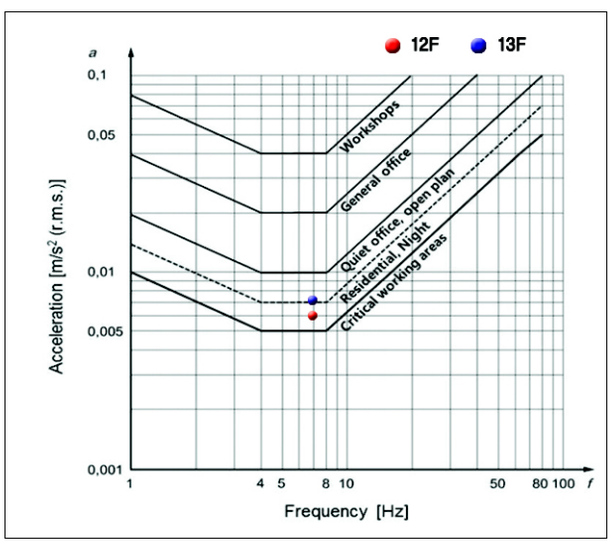

Figure 15. ISO 10137 Result (12th and 13th Room)

가중함수를 적용한 1인 보행 진동 신호와 이를 평균한 신호를 나타낸다. 여기서 검은 선은 ISO 10137에서 규정한 진동 허용치를 나타낸다. 본 연구의 경우 주거용도로 사용되므로 최대 RMS 가속도가 “Residential” 수준에 상응하는 0.01m/s^2 넘지 않아야 한다.

Figure 11부터 Figure 14까지의 검토결과에 근거하여 볼 때, 슬래브의 고유진동수는 6.8Hz로 추정되며, 통상적인 슬래브의 고유진동수가 약 15~20Hz 정도임을 감안하였을 때, 본 구조물의 슬래브는 굉장히 유연한 바닥구조로 판단된다. 이러한 유연한 바닥구조로 인해 생활 진동에 의하여 공진의 가능성이 상대적으로 높을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 1인 보행 진동의 검토결과, 복도에서 계측된 진동보다 방 내부에서 계측된 진동이 대체로 더 크게 나타났다. 이는 복도의 슬래브 경간이 방의 슬래브 경간보다 짧기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

대학교 학생생활관으로 사용되고 있는 건물의 12층. 13층 및 14층에서 진동으로 인한 민원이 발생하고 있어 해당 부분의 안전성 및 사용성을 검토한 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 슬래브의 고유진동수는 6.8Hz로 추정되며, 통상적인 슬래브의 고유진동수가 약 15Hz 정도임을 감안하였을 때, 본 구조물의 슬래브는 유연한 바닥구조로 판단된다. 1인 보행 진동의 검토결과, 복도에서 계측된 진동보다 방 내부에서 계측된 진동이 대체로 더 크게 나타났다. 이는 복도의 슬래브 경간이 방의 슬래브 경간보다 짧기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 슬래브의 고유진동수가 낮기 때문에 생활 진동에 의하여 공진의 가능성이 상대적으로 높을 수 있으며, 계측된 RMS 가속도 수준은 ISO 10137에서 규정된 허용 범위 내에 있으나 13층의 경우, 기준한계선에 노출되어 있어 민감함 사람에게는 취침시간에 다소 불편함을 느낄 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. International Organization for Standardization, ISO 2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part 1: General Requirements, ISO, Geneva, Switzerland, 1997.
2. International Organization for Standardization, Mechanical vibration and shock Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003.
3. AISC, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago, 1999.
4. SCI, Design of Floors for Vibration : A New Approach, The Steel Construction Institute, 2009.

접수 2019. 1. 14
1차 심사완료 2019. 2. 14
2차 심사완료 2019. 2. 25
2차 재심완료 2019. 2. 26
게재확정 2019. 3. 1