

면진장치 장착 스카이 브릿지의 사용성 평가

Serviceability Evaluation of Sky Bridge With Isolation Device

김기철*
Kim, Gee-Cheol

김현수**
Kim, Hyun-Su

김수근***
Kim, Su-Geun

Abstract

In this study, the boundary non-linear analysis of the sky bridge subjected to walking load and running load is performed. The sky bridge is installed in the mid-story between two buildings and the walking load and running load induced by pedestrians are measured by load cell. LRB is modeled as a non-linear hysteresis model to accurately represent the behavior of LRB. For the serviceability evaluation of sky bridge, the acceleration responses of sky bridge are analyzed based on ISO 2631-2 and the velocity response are analyzed based on standards Bachmann & Amann. In serviceability evaluation of this sky bridge, the pedestrian can not perceive the vibration except for resonance running loads consequently. Therefore, it is concluded that this sky bridge haven't problem in the serviceability.

Keywords : Sky bridge, Isolation system, LRB(Lead Rubber Bearing), Serviceability, Walking load, Running load

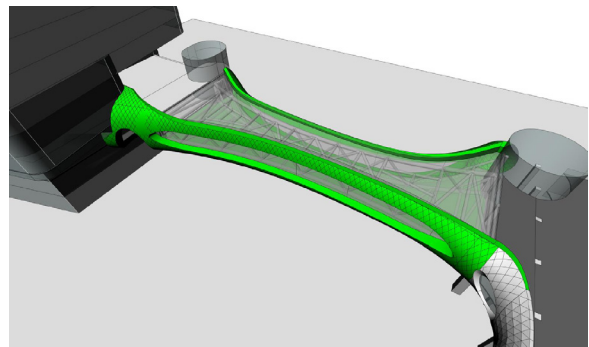
1. 서론

1.1 스카이 브릿지의 진동영향 평가의 필요성

스카이 브릿지는 일반적으로 인접한 고층건물 사이를 연결하기 위해 설치되는 구조물이다. 주로 두 건물 사이에 화재와 같은 비상시 대피 및 피난 통로의 용도로 스카이 브릿지가 많이 설치된다. 본 스카이 브릿지는 건물의 저층부에 연결되어 있어 보행자의 이동통로 및 휴게공간으로 계획되어 있다. 이러한 스카이 브릿지는 이동통로로 활용되기 때문에 다수의 사람이 반복적으로 통행을 하게 되며, 이로 인하여 장경간의 스카이 브릿지에 과도한 진동이 발생하므로 보행자가 불안감을 느끼게 된다. 따라서 보행자 움직임에 의하여 야기되는 보행하중 및 달

리기하중 등에 대한 스카이 브릿지의 사용성 검토가 필요하다¹⁻⁵⁾.

1.2 스카이 브릿지 질량 및 지점조건



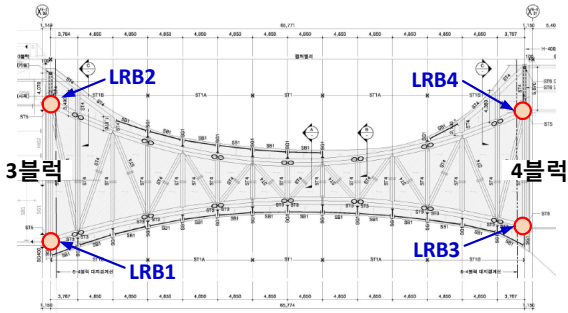
〈Fig. 1〉 Sky bridge

스카이 브릿지는 <Fig. 1>에 보는 바와 같이 구조체 외부에 유리 등과 같은 마감재로 디자인되어 있다. 따라서 이러한 건축적 외장재의 질량은 구조체 질량과 함께 동적거동을 하게 되므로, 동적해석 시 반드시 고려해야 한다. 본 연구과제에서는 이러한 건축적 외장재를 포함한 고정하중을 질량으로 고려하여 구조해석을 수행하였으며, 스카이 브릿지의 입체트러스 골조와 건축적 외장재를 포함한 고정하중

* 정희원, 서일대학교 건축과 교수
Dept. of Architecture Engineering, Seoil University
** 정희원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture & Civil Eng., Sunmoon University
*** 교신저자, 학생회원, 영남대학교 일반대학원 건축학과 석사과정
Dept. of Architecture, Graduate School of Yeungnam
Tel: 053-810-3544 Fax: 053-810-4625
E-mail: step625@ynu.ac.kr

의 질량은 약 1,650kN/g으로 하였다.

또한 스카이 브릿지는 <Fig. 2>와 같이 4개의 납고무 면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)를 사용하여 건물과 연결되어 있다. 따라서 스카이 브릿지의 정확한 동적해석을 위해서 스카이 브릿지의 지점조건에 대하여 LRB의 물리적 특성을 반영하였다.

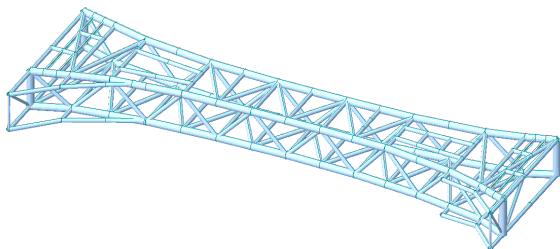


<Fig. 2> LRB location of sky bridge

2. 스카이 브릿지의 동적특성

2.1 스카이 브릿지 해석모델

스카이 브릿지의 구조해석 모델은 <Fig. 3>과 같이 강관 트러스로 구성되어 있으며 상현재 및 하현재 등 부재의 크기는 <Table 1>과 같다. 스카이 브릿지의 경간은 약 65m로 비교적 긴 경간을 가지고 있어 보행자 하중에 의하여 과도한 진동응답이 발생할 가능성 높다.



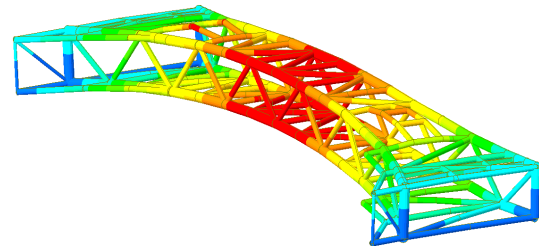
<Fig. 3> Analytical model of sky bridge

<Table 1> Member list of sky bridge

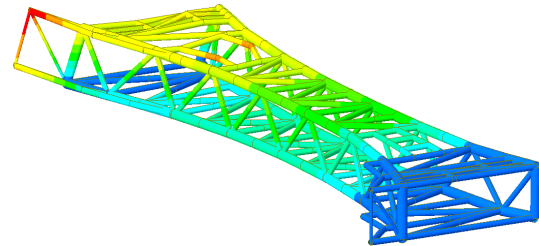
Member	Size(mm)	Member	Size(mm)
Upper chord-1	∅1016×36	Upper chord-2	∅1016×28
Lower chord-1	∅1016×40	Lower chord-2	∅1016×36
Vertical member	∅558.8×30	Horizontal member	∅600×14

2.2 스카이 브릿지의 고유 진동모드

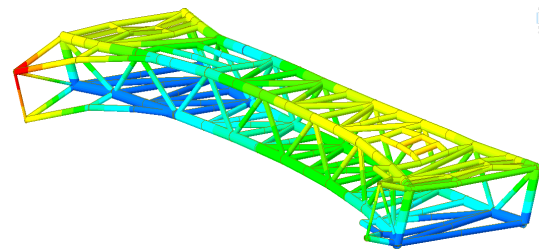
스카이 브릿지의 동적특성을 분석하기 위하여 고유치해석을 수행하였으며 고유치 해석에 의한 주요 저차모드의 진동주기 및 모드형상을 <Fig. 4>에 나타내었다. 부재의 크기가 큰 강관 트러스로 구성된 스카이 브릿지는 강성이 매우 크기 때문에 1차 고유진동주기는 0.42초(2.37Hz)로 경간 길이에 비해서 짧은 것을 알 수 있다. 1차 진동모드를 제외한 진동모드는 국부진동 모드로 진동모드의 질량참여율이 매우 작게 나타나고 있다.



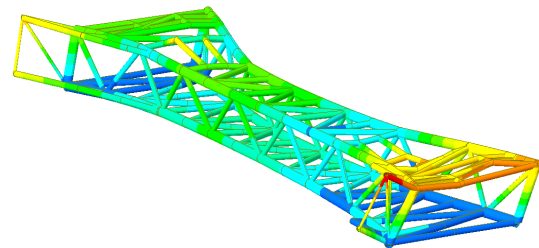
(a) 1st mode(0.4226sec)



(b) 2nd mode(0.3484sec)



(c) 3rd mode(0.3085sec)



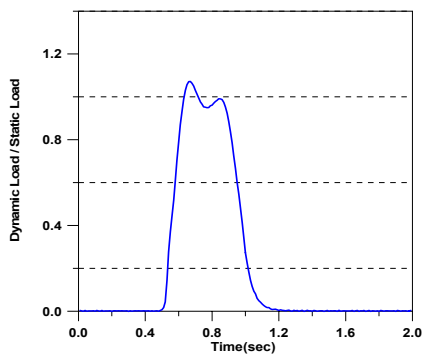
(d) 4th mode(0.2512sec)

<Fig. 4> Natural mode shape and period

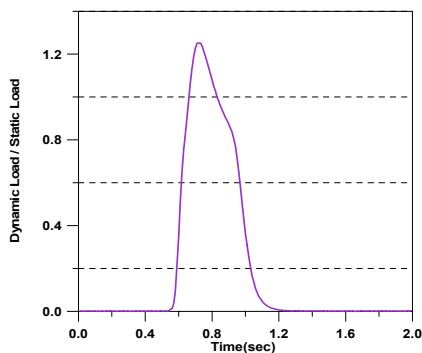
보행하중 및 달리기하중에 의한 스카이 브릿지 구조물의 진동응답은 연직방향(Z방향)의 진동모드에 의하여 좌우되므로 연직방향에 대한 진동모드를 분석한다. 1차 모드 이후의 진동모드는 국부진동 모드로 전체적인 스카이 브릿지의 변위응답에 끼치는 영향은 매우 미비하나 가속도응답의 경우에 다소 영향을 끼칠 수 있다. 보행하중과 달리기하중에 의한 스카이 브릿지의 진동영향을 평가하기 위해서 1차 진동모드의 진동주기를 보행하중 및 달리기하중의 동적하중 주기를 선정하였다.

3. 보행자 하중 및 LRB 이력모델

3.1 보행자 하중



(a) Walking load



(b) Running load

〈Fig. 5〉 Dynamic loads induced by pedestrian

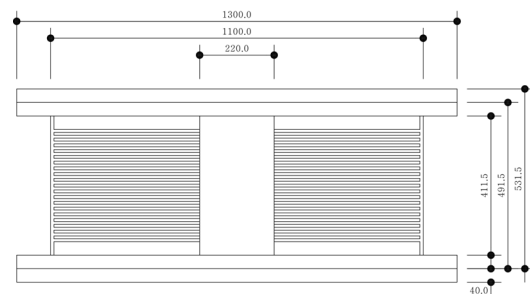
보행자 하중은 동적하중 계측 장비(Load cell)를 이용하여 계측하였으며 계측한 보행자 하중을 적용하여 스카이 브릿지의 시간이력해석을 수행하였다. 보행자에 의하여 야기되는 동적하중은 보행하중과 달리기하중으로 〈Fig. 5〉와 같다. 보행자 하중은 동적하중을 보행자의 몸무게로 정규화 하여 나타냈다⁹⁾.

보행하중의 하중-시간 이력 그래프에서는 두 개의 피크(Peak)값이 나타난다. 첫 번째 피크값은 보행자 발의 뒤꿈치(Heel)가 바닥에 닿을 때 발생하는 성분이며, 두 번째 피크값은 발가락(Toe lift-up)이 바닥판에 접촉하여 나타나는 성분이다. 첫 번째 피크값은 몸무게보다 약간 높은 값을 가지고, 그 후에 약간 떨어지다 두 번째 피크값에 이르고 다시 줄어드는 형태를 가지고 있다.

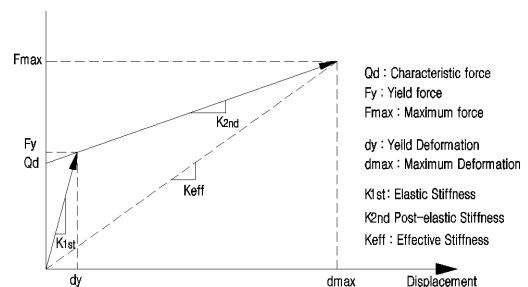
달리기하중의 하중-시간 이력 그래프는 충격하중과 비슷하게 하나의 피크값을 가지고 있다. 보행하중의 경우 피크값 부근에서 하중의 변화가 거의 없으나, 달리기하중의 경우 하중의 양상이 급속하게 변화하는 것을 볼 수 있다.

3.2 LRB의 비선형 모형화

스카이 브릿지의 받침부에 사용된 LRB는 직경 1,100mm, 삽입 납봉 직경 220mm의 면진베어링으로 〈Fig. 6〉과 같다. LRB의 물성치는 〈Table 2〉와 같다. 스카이 브릿지의 지점조건에 LRB의 물성치를 적용한 비선형 이력모델을 적용한 후 시간이력해석을 수행하였다. LRB의 비선형 이력모델은 〈Fig. 7〉과 같다.



〈Fig. 6〉 Dimension of Lead Rubber Bearing



〈Fig. 7〉 Nonlinear hysteresis model of LRB

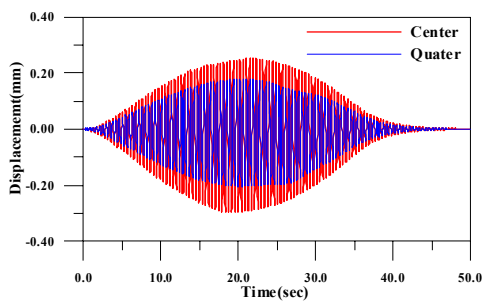
<Table 2> LRB design characteristics

Vertical load (kN)	9,716	Horizontal load (kN)	614
Design basis pressure (MPa)	13	Shear elastic modulus G(MPa)	0.392
Vertical stiffness (kN/mm)	5,222	1 st stiffness (kN/mm)	21.1
2 nd stiffness (kN/mm)	1.62	Characteristic force (kN)	303
Effective stiffness (kN/mm)	3.199	Equivalent damping	0.292

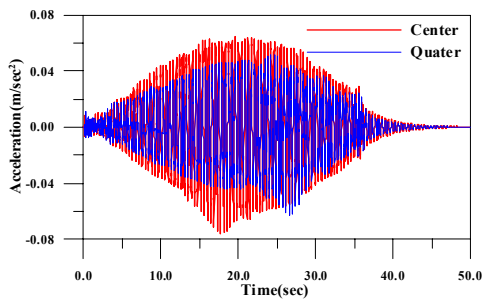
4. 보행자 하중에 의한 스카이 브릿지의 진동응답

스카이 브릿지의 사용성을 평가하기 위하여 보행 하중(3인 공진 보행, 3인 일반 보행) 및 달리기하중(2인 공진 달리기)에 의한 스카이 브릿지의 진동응답을 검토하였다.

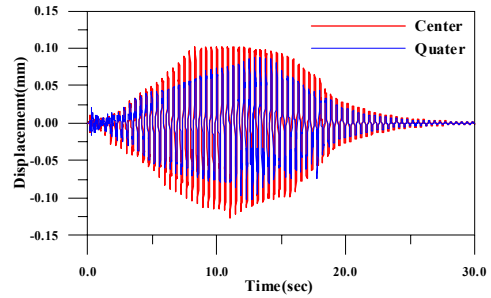
일반적으로 스카이 브릿지는 경간 중앙과 경간 1/4에서 진동응답이 크게 나타나기 때문에 이 점에서의 변위응답 및 가속도응답을 분석하였다.



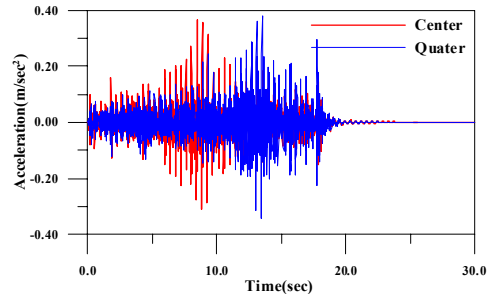
(a) Displacement time history (Resonance walking load)



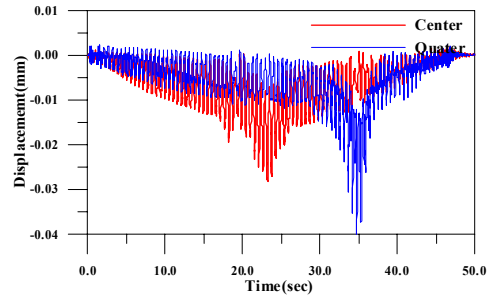
(b) Acceleration time history (Resonance walking load)



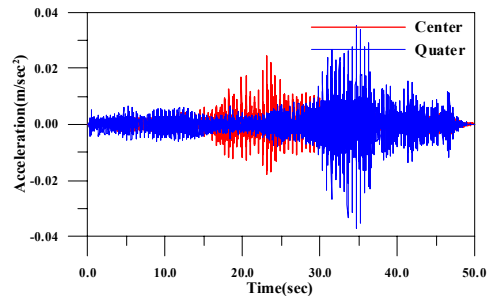
(c) Displacement time history (Resonance running load)



(d) Acceleration time history (Resonance running load)



(e) Displacement time history (Normal walking load)



(f) Acceleration time history (Normal walking load)

<Fig. 8> Vibration response

본 스카이 브릿지는 강관 트러스로 구성되어 있어 강성이 크기 때문에 보행하중과 달리기하중에 의한 변위응답은 구조적으로 문제가 없을 것으로 판단되나 가속도응답은 비교적 크게 나타나고 있다. <Fig. 8>는 보행하중 및 달리기하중에 의한 진동응답(변위 및 가속도) 시간이력 그래프로 보행하중 및 달리기하중의 주기를 스카이 브릿지에 공진하도록 하였기 때문에 전형적인 공진 진동응답을 보여주고

있다. 일반 보행하중의 주기는 0.55s이다. <Table 3>은 경간 중앙과 경간 1/4에서의 최대변위응답 및 최대가속도응답을 나타낸 것이다.

<Table 3> Maximum vibration response

Load type	Response type	Span length	
		1/2	1/4
Resonance walking load (3 person)	Maximum displacement(mm)	0.297	0.205
	Maximum acceleration(m/s ²)	0.0757	0.0633
Normal walking load (3 person)	Maximum displacement(mm)	0.028	0.040
	Maximum acceleration(m/s ²)	0.0243	0.0373
Resonance running load (2 person)	Maximum displacement(mm)	0.126	0.102
	Maximum acceleration(m/s ²)	0.363	0.381

5. 스카이 브릿지의 진동영향 평가

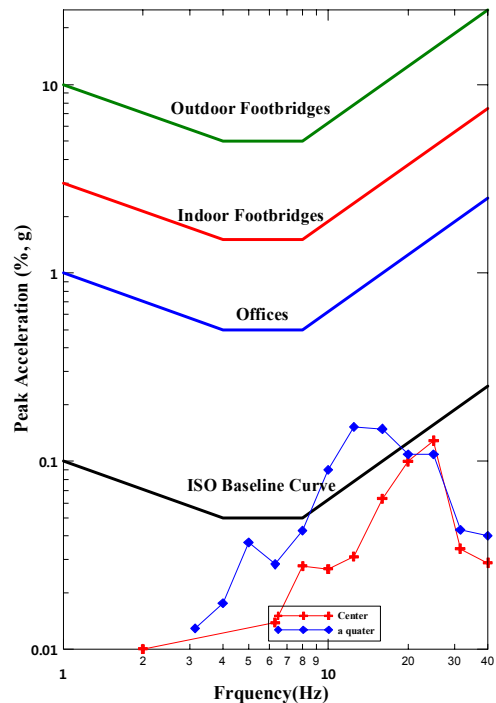
5.1 스카이 브릿지의 사용성 평가

본 연구과제에서는 스카이 브릿지를 사용하고 있는 사람들의 공포감 등의 심리적 안정성에 대한 검토를 위하여 가속도 응답 기반의 사용성 평가를 수행하였다. 구조물의 사용성 평가에 널리 사용되고 있는 ISO 2631-2(AISC #11)⁷⁾ 기준에 근거하여 스카이 브릿지의 사용성을 평가하였다.

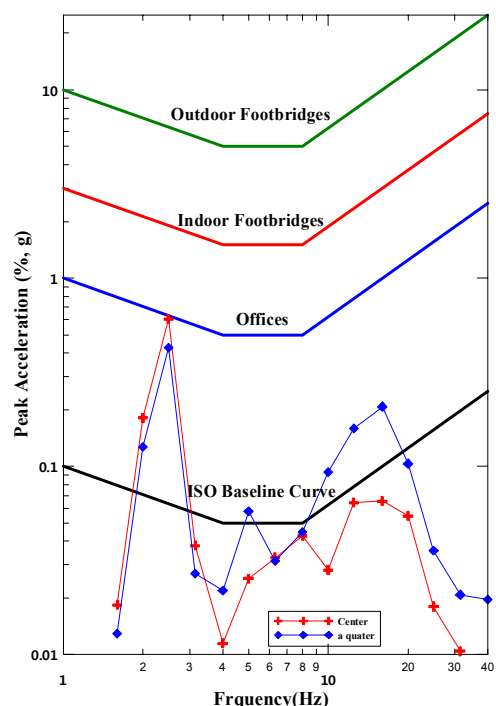
진동응답은 1/3 옥타브밴드의 중심 주파수(1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4.0, 5.0, 6.3, 8.0, 10.0, 12.5, 16.0, 20.0, 25.0, 31.5, 40.0Hz)를 기준으로 하여 최대 가속도의 % 중력가속도로 평가한다. 보행하중 및 달리기하중에 의한 스카이 브릿지 중앙부에서 연직방향 가속도응답을 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수를 기준으로 하여 그래프를 나타냈다.

<Fig. 9>에서 보는 바와 같이 보행하중에 의한 진동응답은 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 2.5Hz에서 가장 큰 진동응답을 나타내고 있다. 그리고 달리기

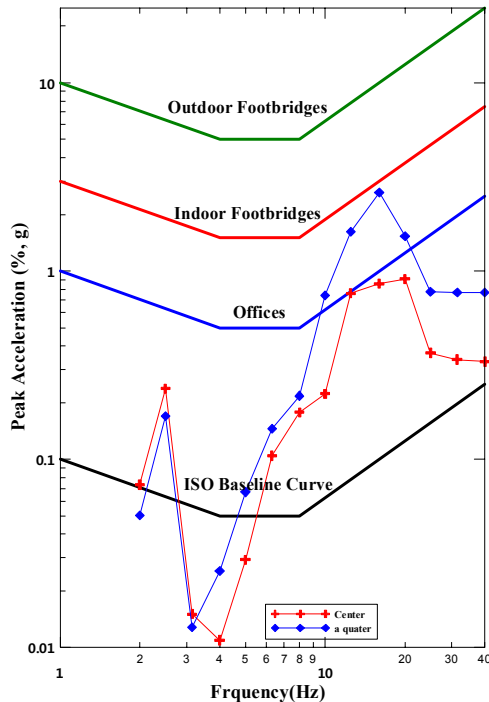
하중에 의한 진동응답은 16.0Hz에서 가장 큰 진동응답을 보여주고 있다. 그리고 보행하중과 달리기하중에 의한 응답은 고차 모드(국부 진동모드)의 영향을 받으므로 10.0Hz 이상의 진동수에서도 응답이 크게 나타나고 있다.



(a) Normal walking (3 person)



(b) Resonance walking (3 person)



(c) Resonance running (2 person)

〈Fig. 9〉 Serviceability check of sky bridge

보행하중 및 달리기하중에 의한 진동(가속도) 응답이 ISO 2631-2 기준의 'Indoor Footbridges' 기준치를 벗어나지 않는다. 따라서 사람의 움직임에 의하여 야기되는 스카이 브릿지 진동에 사용성은 문제가 없을 것으로 판단된다.

5.2 스카이 브릿지의 인지도 평가

연결 통로로 사용되고 있는 스카이 브릿지의 일반적인 보행 진동에 대한 인지도를 평가하기 위하여 공진 보행하중과 공진 달리기하중 그리고 일반적인 비공진 보행하중을 적용하여 스카이 브릿지의 최대 가속도응답을 분석하였다. 진동에 대한 인지도 평가는 <Table 4>와 같이 Bachmann & Ammann²⁾이 제시한 최대 가속도 인지도 평가기준을 적용하여 평가하였다^{8),9)}.

일반 보행하중의 경우 최대 가속도가 24.3mm/sec²으로 진동을 인지하지 못하는 수준을 보이고 있으며, 공진 보행하중의 경우 최대 가속도가 75.7mm/sec²으로 진동을 약간 인지하는 수준 그리고 공진 달리기하중의 경우에 최대 가속도 363mm/sec²으로 진동을 확실히 인지하는 수준으로 나타났다.

〈Table 4〉 Acceptance criteria for physiological vibration effects⁸⁾

Degree of recognition	Acceleration (mm/s ² , a _{ref} =1um/s ²)	Velocity (mm/s, v _{ref} =1nm/s)
	1~10 Hz	10~100 Hz
Imperceptible	10(60dB)	0.16(82dB)
Just imperceptible	40(72dB)	0.64(96dB)
Clearly imperceptible	125(81dB)	2.00(106dB)
Annoying	400(92dB)	6.40(116dB)
Unpleasant	1000(100dB)	16.00(124dB)

6. 결론

본 연구에서는 보행하중 및 달리기하중에 의한 스카이 브릿지의 사용성 평가 및 인지도 평가를 수행하기 위하여 면진장치가 장착된 스카이 브릿지의 경계비선형 시간이력해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

스카이 브릿지 받침부에 정착된 면진장치의 비선형 이력모델 적용을 통하여 스카이 브릿지의 정확한 진동해석이 가능하다. 그리고 보행자에 의하여 야기되는 보행하중과 달리기하중의 적용을 통하여 스카이 브릿지 진동에 대한 객관적인 진동영향 평가가 가능하다.

대상 스카이 브릿지에 대한 진동영향 평가를 수행한 결과, 인위적으로 공진이 발생하는 경우를 제외하고 보행자가 진동을 인지하지 못하므로 스카이 브릿지의 사용성에 문제가 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(17AUDP-B100343-03)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Lee et al (2009), A Study on the Vibration of Structures Connected by a Sky-Bridge, Proceedings of Architectural Institute of Korea, Vol.29, No.1, pp.25-28
 2. Ahn et al (2007), Design and Dynamic Behavior of Sky-Bridge for High Rise Buildings, Proceedings of Korea Concrete Institute, Vol.19, No.1, pp.143-146
 3. Hyun-Su Kim (2013), Vibration Characteristics Evaluation According to Natural Periods of Structures and Location of a Sky-bridge, Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.14, No.6, pp.3068-3073
 4. Ellingwood B and Tallin A. (1984), Structural Serviceability: Floor Vibrations, Journal of Structural Engineering Division, ASEC, Vol.110, No.2, pp.401-417
 5. Hyun-Su Kim (2009), Efficient Dynamic Analysis of High-rise Buildings Having Belt Walls Connected by a Sky-Bridge, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.22, No.3, pp.231-242
 6. Rainer J.H. and Pernica G. (1986), Vertical Dynamic Forces from Footsteps. Noise and Vibration Section, Division of Building Research. National Research Council Canada. pp.12-21.
 7. International Standard Organization, ISO 2631-2, valuation of human exposure to whole body vibration - Part 2
 8. Bachmann H., Ammann W (1987), Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, Structural Engineering Documents 3e. IABSE. pp.14-26.
 9. Bachmann H., et al (1995), Vibrations Problems in Structures: Practical Guidelines, BIRKHAUSER VERLAG, pp.14-26.
- Received : May 16, 2017
 - Revised : May 30, 2017
 - Accepted : May 30, 2017