

공용중인 PSC 거더 교량의 진동사용성 평가

Vibration Serviceability Evaluation of Prestressed Concrete Girder Bridge

박선준† · 강성후* · 김보환** · 김 승 ***

Park, Sun-Joon · Kang, Sung-Hoo · Kim, Bo-Hwoan · Kim, Seung

Keywords : 진동 사용성(Vibration serviceability), 진동 계측(Vibration Measuring), 고유진동수(Natural Frequency)
진동 가속도(Vibration Acceleration)

ABSTRACT

The thesis shows that we gauged vibration of vehicular load regarding WPC girder bridge and researched into dynamic characteristics(natural frequency, vibration acceleration) of WPC girder bridge. By the basic of that, we researched on vibration serviceability by looking over and being compared to vibration criteria we had before. In the thesis, the gauged vibration made an analysis of vertical acceleration through FFT method and evaluated vibration serviceability about vibration sense the body feels by means of the standard of ISO assessment standard and Meister assessment standard by referring to analysis data. This research on bridge is WPC girder bridge of 90m span, width of 5.5m, and the experiment was gauged by a fluent which is right way and inverse way about dump truck of gross 270kN. Acceleration was located in the middle of 1st span, 2nd span, 3rd span. As a result of appraisal standard of Meister, the vibrations of the bridge have distributed between "Level C, Strongly Perceptible" and "Level B, Disturbing". Also the vibration can be attacked with unpleasant feeling. As a result of appraisal standard of ISO, from vibration influence didn't come to 60s, and reduced comfort boundary in part of most rigorous standard that such a case didn't happen.

1. 서 론

최근 경제발전과 생활수준의 향상으로 인하여 도로상의 차량통행량은 늘어나고, 더불어 차량의 증량화, 고속화가 진행되고 있으며, 최근 건설되는 교량들은 기술발전에 힘입어 장대화, 경량화 되어 가고 있는 추세이다. 이에 따라 공용중인 교량에서 나타나는 과도한 진동이 문제가 되어 교량의 사용성을 저하시키고 교량 위를 보행하는 사람들의 쾌감을 감퇴시키는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 특히 물체가 가지고 있는 고유진동수(Natural frequency)와 이 물체에 가해진 하중의 가진진동수(Forced frequency)

가 유사하거나 같을 경우 발생하는 공진현상은 교량의 사용성과 쾌적성을 모두 감소시킨다.

1980년대 접어들어 트럭 및 승용차, 철도 차량 등에 대한 진동의 영향에 대한 연구가 국외에서 진행되었고, 국제표준기구는 1974년 진동이 인체에 미치는 영향을 객관화하기 위해 진동과 관련한 여러 요소들을 모아 ISO2631을 발표하였다. 이 기준은 진동의 주파수 가속도 방향 등을 체계적으로 정리하여 관련 기기와 자동차 등의 제작에 활용토록 한 것이다. 국내에서는 1992년 이상태⁽³⁾가 진동이 인체에 미치는 영향에서 진동주파수와 진동축, 진동의 지속시간에 대해 인체가 어떠한 반응이 나타나는지에 대해 연구를 수행하였고 2001년 김진기⁽¹⁾은 국내의 철도 차량의 진동에 대한 인체 영향 조사논문에서 국내의 철도차량에서 측정된 전신 진동 노출량을 이용하여 진동이 건강에 미치는 영향을 연구하였다. 2008년 이동하⁽²⁾는 강합성 상자형교량에서 보행자가 받는 진동영향에 대한 연구에서 meister 평가기준과

† 교신저자(정회원), 동신대학교 토목공학과
E-mail : parksj@dsu.ac.kr
Tel : (061) 330-3136, Fax : (061) 330-3136

* 동신대학교 토목공학과
** 동신대학교 대학원 토목공학과
*** 동신대학교 대학원 토목공학과

ISO평가기준에 준하여 강합성 상자형 교량에서 차량 진동에 의해 발생하는 진동이 보행자에게 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다.

본 연구에서는 PSC 거더 교량 가운데 WPC 거더 교량(Wide-flange prestressed concrete girder bridge)을 연구대상으로 하였다. WPC 거더 교량이란 확폭플랜지 박스형 거더형태로 중립축을 상향 이동시켜 상·하 플랜지의 응력균형으로 최적 단면에 의해 효율을 극대화 시킨 교량으로 체구형 단면에 스티로폼을 넣어 슬래브 타설을 위한 확장된 바닥판으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 PSC 거더 교량 중 공용중인 WPC 거더 교량의 차량하중으로 인한 인체의 진동 사용성을 평가하고자 한다. 이를 위한 현장실험은 실험차량의 중량을 고정한 상태에서 주행속도를 변수로 하였으며, 얻어진 동적응답 자료분석을 통하여 인체의 진동사용성을 평가하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 Meister 진동감각평가법

인체도 일종의 진동체이기 때문에 고유한 진동수를 가지며 외부로부터 가진이 전달되면 공진하기 때문에, 진동에 관한 인체 감각에 대해서 인체를 기계 전달계(진신진동)로 취급하여 오래 전부터 연구되어 왔다. 이 가운데 Rieher-Meister는 진동수에 따른 감각곡선을 정의하였으며 이 감각곡선은 인체감각의 기준으로 여러 분야에서 활용되어 왔다. Fig.1은 Meister 진동감각곡선을 나타낸 것이다. Meister 진동감각곡선은 횡축을 주파수(Hz), 종축을 진동가속도로 놓고 대규모 실험을 통해 서있는 상태와 누워있는 상태에서 수평, 수직방향의 진동을 가하여 구해진 값을 6단계의 향으로 분류하였으며, 이는 최근까지 많은 분야에서 이용되고 있다.

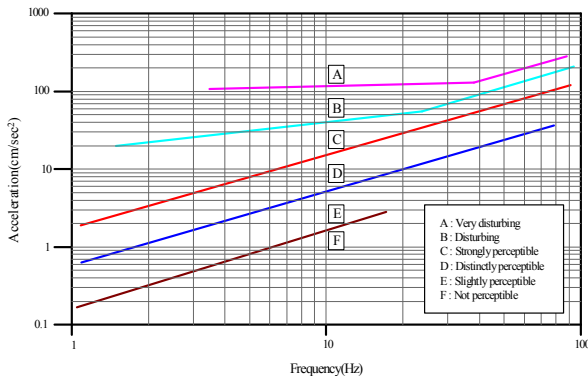


Fig. 1 Meister assessment standard

2.2 ISO 진동감각평가법

항공·육상·수상용의 수하물과 공업·농업용의 기계류에 대한 진동이 인체의 쾌적성이나 작업능률에 미치는 악영향을 평가하는데 한계로 규정되었으며, 주로 전신진동이 대상으로 되고 있다. 적용 주파수 영역은 1~80Hz 수준이고, 진동가속도의 RMS(Root Mean Square; 실효값)값을 사용하고 있다.

평가 가능한 진동의 주파수 범위는 1~80HZ이며, 이 주파수 범위 내에서 주기적, 랜덤, 비주기적인 진동에 적용되며, 잠정적으로는 연속충격형인 진동에도 적용된다.

인체가 느끼는 진동은 심장(Heart)을 원점으로 하는 직교좌표이며, 진동량은 가속도실효치(RMS: m/s^2)로 나타낸다. 진동레벨(VL : Vibration Level)은 식(1)로 구해진다.

$$VL = 20\log\left(\frac{a}{a_0}\right) [dB] \quad (1)$$

a_0 : 기준 진동가속도($10^{-5}m/s^2$)

a : 진동감각보정인 주파수 보정한 진동가속도 실효값(RMS : m/s^2), ISO2631 규정이용

RMS 값은 관심있는 시간동안 파형의 제곱평균에 제곱근을 씌운 값으로, 진동을 측정할 때 많이 사용한다. 또한 파형의 시간에 대한 변화량을 고려하고, 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로, 진동크기의 표현에 가장 널리 사용된다. peak값은 파형의 가장 큰 값(u_p)을 나타내며, 짧은 시간과 충격 등의 크기를 나타내는데 유용하다. RMS(u_s)값과 peak(u_p)값은 식(2)와 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{u_p}{u_s} = \sqrt{2} \quad (2)$$

3. 진동 실험

3.1 대상교량 및 측정장비

본 연구의 대상교량은 총 연장 90.2m, 폭 5.5m의 도로교로써 상부구조는 3경간 WPC 거더교 형식이며, Fig. 2는 실험대상인 WPC 거더 교량의 전경이다. 대상교량의 진동 응답 특성을 분석하기 위해서 1경간, 2경간 중앙에 transducer 타입의 가속도계(이

하, 가속도계)를 설치하였고 2경간, 3경간 중앙에는 Piezometer 타입의 모듈화 되어있는 BMIII (Blastmate III, Instantel Co. CANADA)를 설치하여 진동가속도 및 속도응답을 측정하였다.

또한, 차량주행 실험 시 교량의 진동 응답을 무리 없이 받아들이기 위해 200Hz의 Sampling rate로 측정하였다. Fig. 3은 모니터링 시스템의 구성을, Fig. 4는 대상 교량의 제원과 주행실험부터 모니터링까지의 과정을 개략적으로 나타낸 그림이다.



Fig. 2 WPC girder bridge

었다. 또한 P2에서 P1방향으로 20km/h 5회 주행하여 총 20회 실험이 이루어졌다. 주행차선은 P1에서 P2 방향으로 주행했을 때와 P2에서 P1 방향으로 주행했을 때 동일한 차선을 이용하였다. 또한, 교량의 진동 응답을 명확하게 모니터링하기 위하여 시험차량이 측정구간에 영향을 미치지 시작하는 시점부터 측정구간을 벗어난 후에 나타나는 자유진동 부분까지 측정하였다.

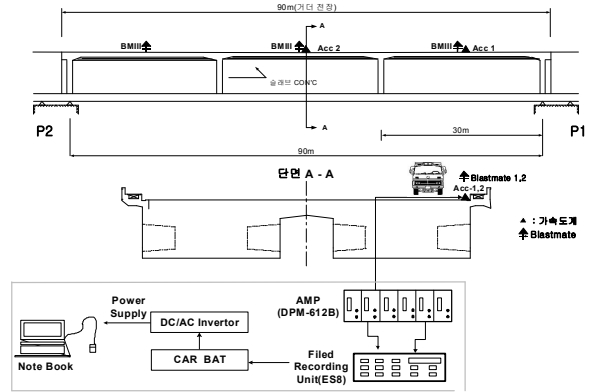


Fig. 4 Monitoring system



(a) Accelerometer



(b) BM III



(c) Controller



(d) AC/DC inverter

Fig. 3 Experiment sensor set up and measurement

3.2 실험방법

대상교량에서는 정확한 실험 Data를 얻기 위해 차량의 통행을 제한한 상태에서 차량중량이 제공된 시험차량을 이용하였다. 3축 덤프트럭의 총중량은 270kN, 전륜중량 70kN, 중륜·후륜중량은 각각 100kN 이었다.

주행실험은 Fig. 4에서 제시된 P1에서 P2방향으로 각각 20km/h 6회, 40km/h 6회, 50km/h 3회를 실시하

4. 실험결과분석

4.1 진동가속도

Table 1에는 차량 주행시험으로부터 얻어진 진동 가속도 응답결과를 평가기준과 비교검토하기 위하여 peak값과 RMS값으로 구분하여 표현하였다. Fig. 5는 P1에서 P2방향으로 주행 시, Fig. 6은 P2에서 P1 방향으로 주행 시 얻어진 진동가속도 시간이력 응답 중 한 가지 경우를 보여주고 있다. Fig. 6, 7에서 실험조건을 설명하기 위해 사용된 기호는 Table 1에서 설명하였다. 진동가속도 응답의 peak값을 살펴보면 20km/h 주행 시 0.511m/s^2 , 40km/h 주행 시 0.329m/s^2 , 50km/h 주행 시 0.387m/s^2 까지 얻어짐을 알 수 있다.

차량 주행속도에 대한 가속도의 진폭은 P1에서 P2 방향으로 주행 시 20km/h에서 상대적으로 큰 값으로 나타났고, 40km/h, 50km/h로 속도를 높여 갈수록 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7은 주행속도에 따라 1경간과 2경간 중앙에 설치한 가속도계에서 얻어진 peak 값을 비교한 그래프이다. 주행속도별 측정 횟수가 달라 절대적인 비교는 어렵지만 20km/h에서 50km/h의 범위에서는 속도가 증가해 감에 따라 가속도 응답의 peak 값이 다소 감소해 감을 알 수 있다. 이는 교량의 고유진동수와 차량의 가진진동수가 20km/h 주행속도 영역에서 가까워지기 때문이라 판단된다.

Table 1 Results of dynamic driving test

Experiment Cases	Responses of acceleration (m/s ²)		Natural Frequency (Hz)
	Peak	RMS	
A-20-1-1	0.511	0.361	3.14
A-20-1-2	0.379	0.268	3.15
A-20-1-3	0.414	0.293	3.80
A-20-2-1	0.437	0.309	3.22
A-20-2-2	0.400	0.283	3.22
A-20-2-3	0.398	0.281	3.40
A-40-1-1	0.329	0.232	3.17
A-40-1-2	0.299	0.210	3.30
A-40-1-3	0.447	0.316	3.50
A-40-2-1	0.290	0.205	3.17
A-40-2-2	0.279	0.197	3.19
A-40-2-3	0.365	0.258	3.40
A-50-1-1	0.387	0.274	3.12
A-50-1-2	0.226	0.160	3.13
A-50-1-3	0.348	0.246	3.10
B-20-3-1	0.265	0.187	3.13
B-20-3-2	0.253	0.179	3.13
B-20-3-3	0.348	0.246	-
B-20-4-1	0.313	0.221	3.13
B-20-4-2	0.225	0.159	3.13
B-20-4-3	0.398	0.281	-
B-20-5-2	0.390	0.276	3.13
B-20-5-3	0.348	0.246	3.50

Reference

A, B : Driving direction (A= P1-> P2, B=P2->P1)
 20, 40, 50 : Driving velocity(km/h)
 1, 2, 3, 4, 5 : The number of time
 1, 2, 3 : Pick up position(span)

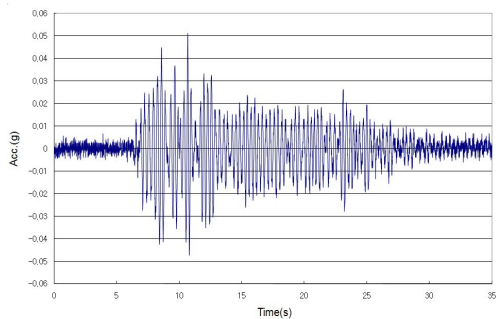


Fig. 5 A-20-2-1 (Acc 1)

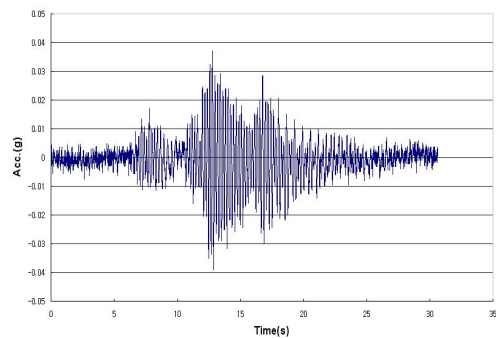


Fig. 6 B-20-3-2 (Acc 2)

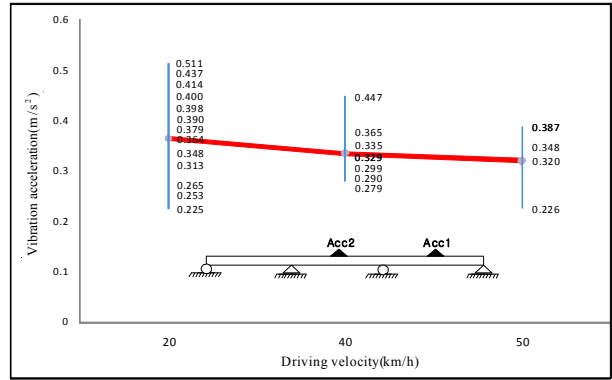


Fig. 7 Acceleration responses by vehicle velocities

4.2 고유진동수

가속도계와 BMIII로부터 얻은 가속도 응답을 FFT 분석하여 산출한 고유진동수를 Table 1과 Fig. 8, 9에 제시하였다. 분석결과 WPC 거더 교량의 고유진동수는 3.10Hz에서 최대 3.80Hz까지 얻어졌다. 3.40Hz 이상의 고유진동수는 주로 BMIII 계측기로부터 얻어진 가속도 응답의 분석결과이다.

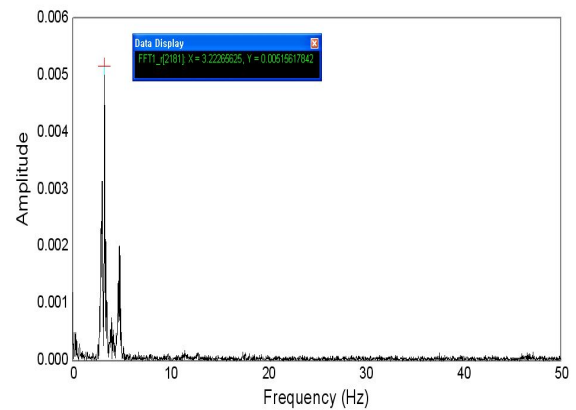


Fig. 8 A-20-2-1 : 3.22Hz

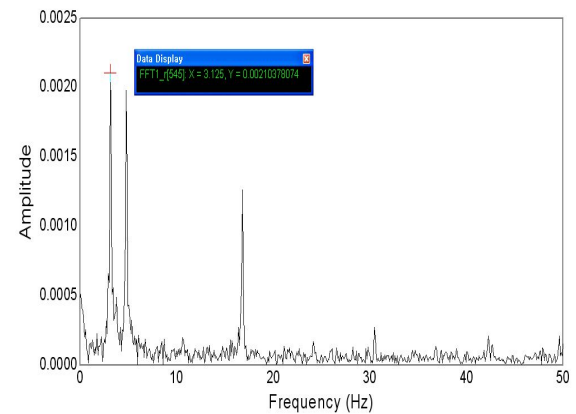


Fig. 9 B-20-3-1 : 3.13Hz

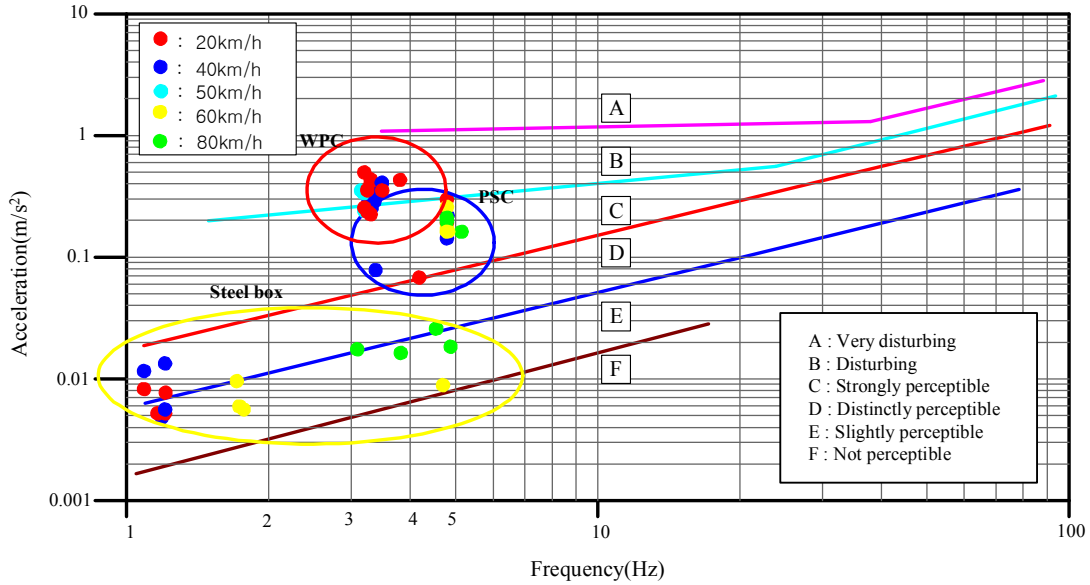


Fig. 10 Meister's Vibration influence evaluation

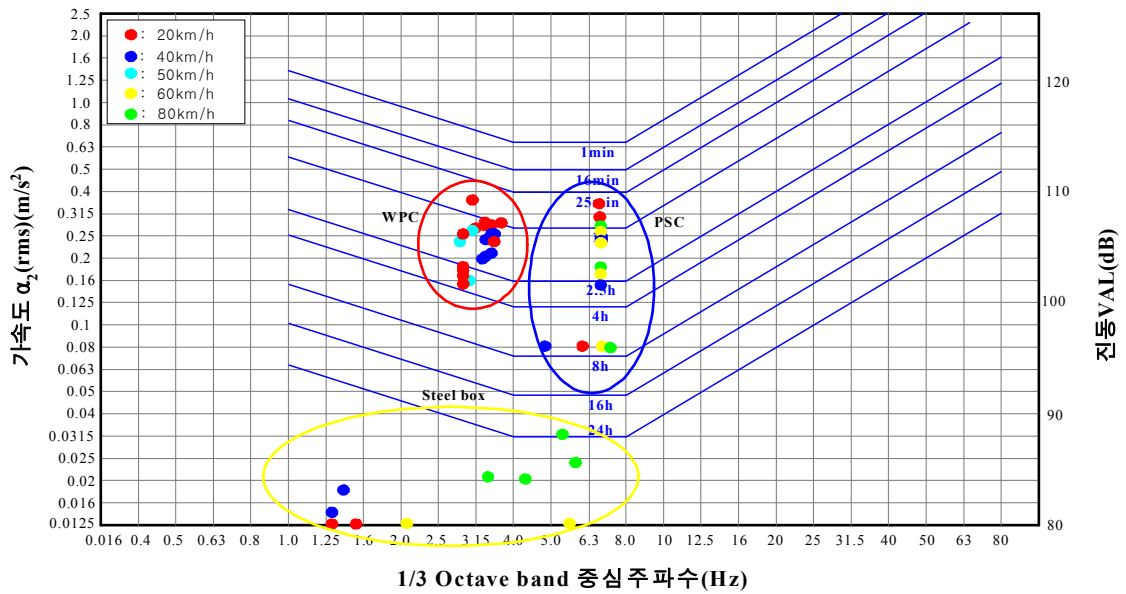


Fig. 11 ISO Vibration influence evaluation

고유진동수 분석 시 가속도계로부터 얻어진 시간 이력은 차량 통과이후의 자유진동 부분만을 고려한 것과 다르게, BMIII는 모듈화 되어있는 계측기의 특성상 차량이 주행하는 동안에 포함된 진동가속도이력 전체를 대상으로 진동수 분석이 이루어진 결과 고유진동수에 편차가 발생된 것이라 판단된다.

결과적으로 고유진동수는 가속도계를 사용하여 계측한 시간이력을 FFT분석한 결과가 더 신뢰도를 확보하고 있다고 판단되며, 이로부터 연구대상 WPC 고유진동수는 3.2Hz 대역으로 결정할 수 있다.

4.3 Meister 평가기준

Fig. 10은 본 연구의 대상 교량인 WPC 거더교와 기준에 이동하⁽²⁾가 연구결과로 제시한 PSC 거더교, 강바닥판을 사용하는 Steel box 거더교의 진동가속도 응답을 상호 비교하기 위하여 Meister 평가기준에 동시에 나타내었다. 평가결과 WPC교량의 진동응답 정도는 20km/h, 40km/h, 50km/h로 주행했을 시 주행속도와는 크게 상관없이 강하게 진동을 느끼는 "Level C, Strongly perceptible"과 진동으로 인해 불안감을 느끼는 "Level B, disturbing" 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 차량 주행속도 20km/h~50km/h 범위에서

WPC 교량은 주행속도에 상관없이 보행자가 불쾌감을 느끼는 정도의 진동응답을 보이고 있음을 의미한다.

WPC 거더 교량과 PSC 거더 교량, 강바닥판을 사용하는 Steel box 교량의 진동응답을 상호 비교해 보면 WPC 거더 교량이 비교 대상 교량에 비해 상대적으로 큰 진동 응답을 보이는데, 이러한 원인은 동일 시간에 대한 기존 교량의 거더에 비해 단면 감소가 가능한 WPC 교량의 구조적인 특성이 반영된 결과라 할 수 있다.

4.4 ISO 평가기준

Fig. 11은 본 연구의 대상 교량인 WPC 거더교와 기존에 이동하⁽²⁾가 연구결과로 제시한 PSC 거더교, Steel box 거더교의 진동가속도 응답을 상호 비교하기 위하여, ISO의 3가지 평가기준(폭로한계, 피로능률감퇴경계, 쾌감감퇴경계) 가운데 가장 엄격한 쾌감감퇴경계(Reduced comfort boundary)를 적용하여 검토한 것이다. Fig. 11은 WPC 교량의 경우 보행자가 약 25분 정도 진동에 노출되어 있을 때 쾌감감퇴가 발생한다는 것을 의미하는 것으로써, 이는 Steel box 거더 교량에 비해 쾌감감퇴 발생시점이 상대적으로 빠르다는 의미이기도 하다. 그러나 보행자의 속도를 2~3km/h로 가정할 때 25분 동안 진동에 노출되기 위해서는 교량의 길이가 832m~1,250m라는 것을 의미하므로 ISO 기준에서 제시하는 쾌감감퇴는 WPC 거더교에서는 발생하지 않는다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 PSC 거더 교량 중 공용중인 WPC 거더 교량의 진동 사용성을 보행자 기준으로 평가하였다. 이를 위하여 실험차량의 주행속도를 주요변수로 하여 교면의 진동 가속도 응답을 계측 및 분석하였다. 분석된 결과는 Meister와 ISO 평가기준에 의하여 비교·검토되었다.

WPC 거더 교량이 보이는 진동가속도 응답을 Meister 평가기준에 준하여 검토한 결과 "Level C, Strongly perceptible"과, "Level B, disturbing"사이에 분포되어 있었으며, 보행자가 불쾌감을 느끼는 수준의 진동이 발생한다는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 ISO 평가 기준 가운데 가장 엄격한 쾌감감퇴경계 기준에 의하면 WPC 교량의 보행자는 쾌감감퇴가 일어나지 않는다는 결과가 얻어져 상반된 결과를 보이고 있다. 본 연구에서는 실험차량의 주행속도만을 변수로 사용하였으나 보다 일반화된 진동응답 예측

과 진동사용성 평가를 위해서는 노면의 조도, 실험차량의 중량 등을 변수로 포함시키고, 해석적인 방법을 통해 교량의 폭, 거더 수 등을 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kim, J. K., Hong, D. P., Choi, B. J., Cheung, W. S., 2001, "Assessing the Effects of Vibration Transmitted by Domestic Train Health on Human," Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp.455-458
2. Lee, D. H., 2008, "Vibration effects of the pedestrians on Steel box girder bridges," Master Thesis, Dong Shin University
3. Lee, S. T., Vibration through the Influence of human, 1992, KSNVE, Vol. 2 No. 2 pp 253-258
4. Lee, W. J., "Improved Analysis Method for Serviceability of Highway Bridges," 2006, Master Thesis, Yonsei University
5. Yi, J. H., Lee, J. J., Lee, C. G., Lee, W. T., Yun, C. B., "Ambient Vibration Tests for Enhanced Bridges Integrity Assessment," 2004, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference pp. 611-614
6. Jeon, B. G., Kim, N. S., "Evaluation of Comfort Limit on Bridge Vibration," 2007, Vol. 17, No. 10, pp. 923-935