

## 공용중인 PSC 거더 교량의 진동사용성 평가

### Vibration Serviceability Evaluation of Prestressed Concrete Girder Bridge

강 성 후\* · 김 보 환\*\* · 박 선 준† · 김 승\*\*

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

(2009년 9월 18일 접수 ; 2010년 2월 1일 심사완료)

**Key Words :** Vibration Serviceability(진동 사용성), Vibration Measuring(진동 측정), Natural Frequency(고유진동수), Vibration Acceleration(진동 가속도)

#### 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 90 m span, width of 5.5 m, and the experiment was gauged by a fluent which is right way and inverse way about dump truck of gross 270 kN. 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 중량화, 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.

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<sup>(1)</sup>가 진동이 인체에 미치는 영향에서 진동주파수와 진동축, 진동의 지속시간에 대해 인체가 어떠한 반응이 나타나는지에 대해 연구를 수행하였고 2000년 한국건설기

† 교신저자; 정회원, 동신대학교 공과대학 토목공학과  
E-mail : parksj@dnu.ac.kr

Tel : (061) 330-3136, Fax : (061) 330-3136

\* 정회원, 동신대학교 공과대학 토목공학과

\*\* 동신대학교 대학원 토목공학과

술연구원<sup>(2)</sup>에서는 교량의 진동·처짐에 대한 사용성 측면에서의 평가절차 수립에 대한 연구를 수행하였다. 2001년 김진기 등<sup>(3)</sup>은 국내의 철도 차량의 진동에 대한 인체 영향 조사는문에서 국내의 철도차량에서 측정된 전신 진동 노출량을 이용하여 진동이 건강에 미치는 영향을 연구하였으며, 2003년 안상섭 등<sup>(4)</sup>은 교량의 진동 사용성 평가를 실시하여 교량의 진동을 평가하는 방법과 타당한 진동 사용성 기준을 제시하였다. 2006년 이성수 등<sup>(5)</sup>은 건물의 사용성 평가에 대한 국내외 진동평가방법에 대해 비교분석하여 결과를 제시하였으며 2008년 이동하<sup>(6)</sup>는 강합성 상자형교량에서 보행자가 받는 진동영향에 대한 연구에서 Meister 평가기준과 ISO평가기준에 준하여 강합성 상자형 교량에서 차량진동에 의해 발생하는 진동이 보행자에게 미치는 영향을 연구하였다.

이 연구에서는 PSC 거더 교량 가운데 WPC 거더교량(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 제구형 단면에 스티로폼을 넣어 슬래브 타설을 위한 확장된 바닥판으로 구성되어 있다.

이 연구에서는 PSC 거더 교량 위를 주행하는 차량하중으로 인해 발생하는 교면진동이 보행자에게 미치는 진동영향을 평가하였으며 그로부터 PSC 교량의 진동사용성을 평가하는데 연구목적이 있다. 이 연구에서 교량의 진동사용성이라 함은 보행자가 느끼는 진동영향에 대한 교량의 사용성을 의미한다.

## 2. 문헌 연구 및 이론적 고찰

### 2.1 Reiher-Meister 허용곡선

인체도 일종의 진동체이기 때문에 고유한 진동수를 가지며 외부로부터 가진이 전달되면 공진하기 때문에, 진동에 관한 인체 감각에 대해서 인체를 기계 전달계(전신진동)로 취급하여 오래 전부터 연구되어 왔다. 이와같이 진동으로 인해 사람들이 느끼는 감각정도를 평가하는 연구는 비교적 다양한 분야에서 연구되어 다양한 용도로 사용되고 있다.

지금까지 연구된 것 중 대표적인 것으로 Reiher-Meister의 허용곡선(Fig. 1)을 들 수 있으며, 이 기준은

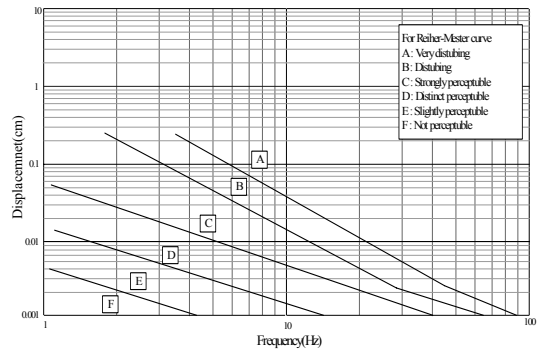


Fig. 1 Allowable curve of Reiher-Meister

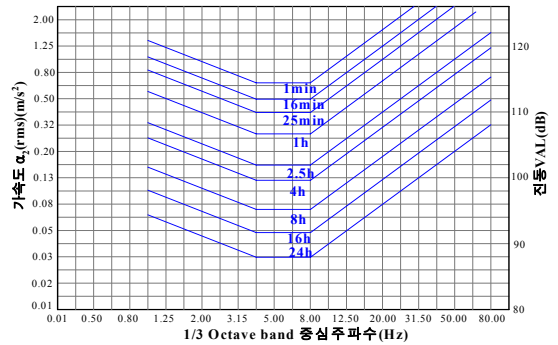


Fig. 2 ISO Reduced comfort boundary

철도 승객들의 진동수준을 평가하기 위하여 피실험자들을 대상으로 감각을 파악하여 분류한 후 차트로 제시한 것으로 여러 문헌에 인용될 정도로 객관성을 인정받아 왔다. Fig. 1의 곡선은 진동의 수준을 매우 불쾌한 수준인 A에서부터 진동을 감지하지 못하는 F까지 6단계로 구분하고 있다. 또한 진동을 평가하기 위하여 진동수와 변위를 같이 고려하고 있으며, 진동응답은 조화진동의 형태라고 가정하고 있다.

### 2.2 ISO 허용곡선

ISO의 3가지 평가기준(폭로한계, 피로능력감퇴경계, 쾌감감퇴경계) 가운데 가장 엄격한 쾌감감퇴경계(reduced comfort boundary) 기준을 Fig. 2에 나타내었다. 인체가 느끼는 진동은 심장을 원점으로 하는 직교좌표이며, 적용 주파수 영역은 1~80 Hz 수준, 진동량은 가속도실효치(RMS:  $m/s^2$ )로 나타낸다.

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 직접관련된 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 (1)과 같은 관계식이 성립한다.

$$\frac{u_p}{u_s} = \sqrt{2} \quad (1)$$

### 2.3 가속도 응답을 이용한 진동사용성 검토

일반적으로 교량의 동적변위와 고유진동수를 분석하여 Fig. 1의 Reiher-Meister 곡선에 적용하면 진동사용성을 평가할 수 있지만, 실제 모든 교량으로부터 신뢰성 있는 동적변위 응답을 얻어내기란 쉽지 않다. 이에 반해 교량의 가속도 응답은 상대적으로 간편하게 구할 수 있다. 경우에 따라 교량의 동적변위를 사용하여 진동사용성을 평가하기 어려운 문제점을 해결하기 위한 방안으로 안상섭 등<sup>(4)</sup>은 Fig. 1의 Reiher-Meister 곡선이 조화진동에 대한 감각곡선이라는 점을 고려하여 가속도 값으로 변환한 후 Fig. 3과 같은 곡선을 제시하였으며, 가속도를 기준으로 교량의 사용성을 평가하는 기준들을 같이 비교하여 교량구조물의 진동사용성 평가를 위한 가능성을 제시하였다. 비교된 기준들은 헝가리 기준(MSW 15021), Conn에 의해 제시된 기준, Goldman 차트(1948) 등이다.

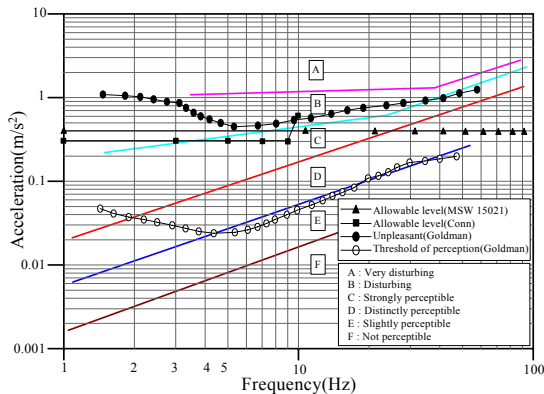


Fig. 3 Acceleration transform curves of Reiher-Meister

## 3. 진동 실험

### 3.1 대상교량 및 측정장비

이 연구의 대상교량은 총 연장 90.2 m, 폭 5.5 m의 도로교로서 상부구조는 3경간 WPC 거더교 형식이며, Fig. 4는 실험대상인 WPC 거더 교량의 전경이다. 대상교량의 진동 응답 특성을 분석하기 위해서 1경간, 2경간 중앙에 transducer 타입의 가속도계(이하, 가속도계)를 설치하였고 2경간, 3경간 중앙에는 piezometer 타입의 모듈화 되어있는 BMIII(Blastmate III, Instantel Co. CANADA)를 설치하여 진동가속도 응답을 측정하였다.

또한, 차량주행 실험 시 교량의 진동 응답을 무리 없이 받아들이기 위해 200 Hz의 sampling rate로 측정하였다. Fig. 5는 모니터링 시스템의 구성을,



Fig. 4 WPC girder bridge

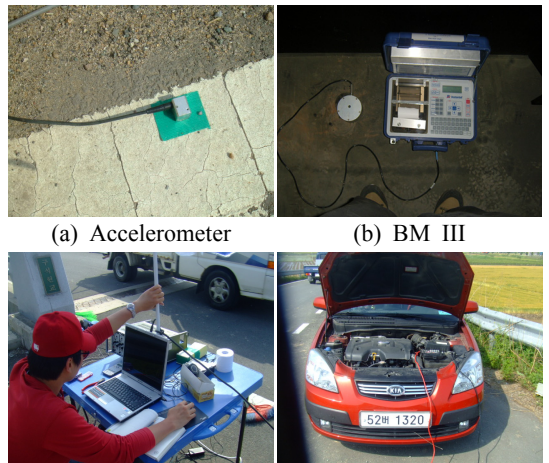


Fig. 5 Experiment sensors set up and measurement

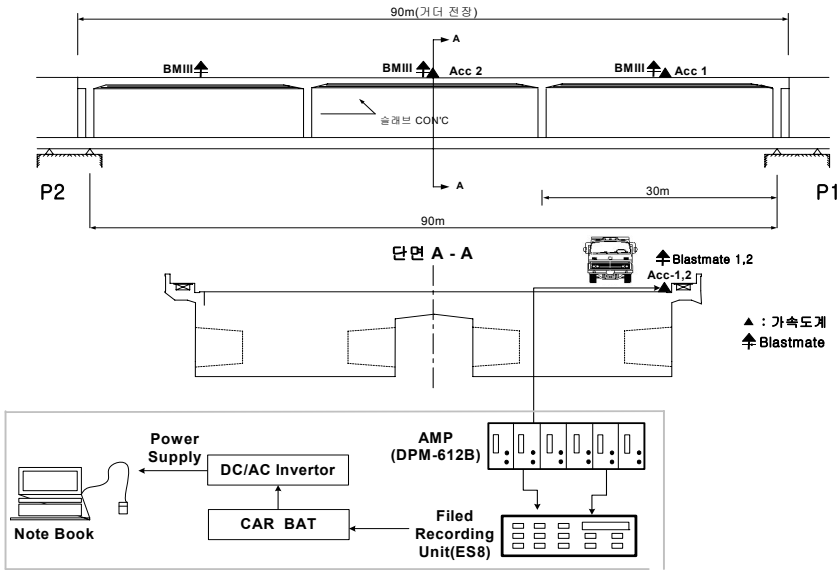


Fig. 6 Monitoring system

Fig. 6은 대상 교량의 제원과 주행실험부터 모니터링까지의 과정을 개략적으로 나타낸 그림이다.

### 3.2 실험방법

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

주행실험은 Fig. 4에서 제시된 P1에서 P2방향으로 각각 20 km/h 6회, 40 km/h 6회, 50 km/h 3회를 실시하였다. 또한 P2에서 P1방향으로 20 km/h 5회 주행하여 총 20회 실험이 이루어졌다. 주행차선은 P1에서 P2방향으로 주행했을 때와 P2에서 P1방향으로 주행했을 때 동일한 차선을 이용하였다. 또한, 교량의 진동응답을 명확하게 모니터링하기 위하여 시험차량이 측정구간에 영향을 미치지 시작하는 시점부터 측정구간을 벗어난 후에 나타나는 자유진동 부분까지 측정하였다.

## 4. 결과분석 및 진동사용성 평가

### 4.1 진동가속도

Table 1에는 차량 주행시험으로부터 얻어진 진동가속도 응답결과를 평가기준과 비교검토하기 위하여

Table 1 Results of dynamic driving test

Experiment cases	Responses of acceleration (m/s <sup>2</sup> )		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)		

peak값과 RMS값으로 구분하여 표현하였다.

Fig. 7은 P1에서 P2방향으로 주행 시, Fig. 8은 P2에서 P1방향으로 주행 시 얻어진 진동가속도 시간이력 응답 중 한 가지 경우를 보여주고 있다. Figs. 7, 8에서 실험조건을 설명하기 위해 사용된 기호는 Table 1에서 설명하였다. 진동가속도 응답의 peak값을 살펴보면 20 km/h 주행 시  $0.511 \text{ m/s}^2$ , 40 km/h 주행 시  $0.329 \text{ m/s}^2$ , 50 km/h 주행 시  $0.387 \text{ m/s}^2$ 까지 얻어짐을 알 수 있다.

차량 주행속도에 대한 가속도의 진폭은 P1에서 P2방향으로 주행 시 20 km/h에서 상대적으로 큰 값으로 나타났고, 40 km/h, 50 km/h로 속도를 높여 갈수록 감소하는 경향을 보였다. Fig. 9는 주행속도에 따라 1경간과 2경간 중앙에 설치한 가속도계에서 얻어진 peak값을 비교한 그래프이다. 주행속도별 측정 횟수가 달라 절대적인 비교는 어렵지만 20 km/h에서

50 km/h의 범위에서는 속도가 증가해 감에 따라 가속도 응답의 peak값이 다소 감소해 감을 알 수 있다. 이는 교량의 고유진동수와 차량의 가진진동수가 20 km/h 주행속도 영역에서 가까워지기 때문이라 판단된다.

### 4.2 고유진동수

가속도계와 BMIII로부터 얻은 가속도 응답을 주파

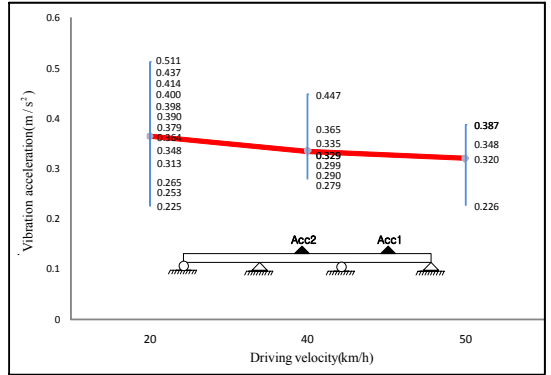


Fig. 9 Acceleration responses by vehicle velocities

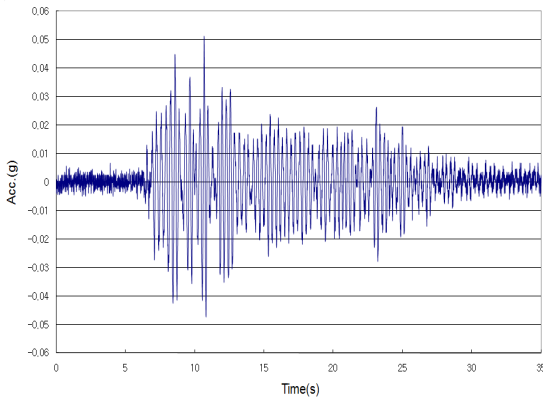


Fig. 7 A-20-2-1(Acc 1)

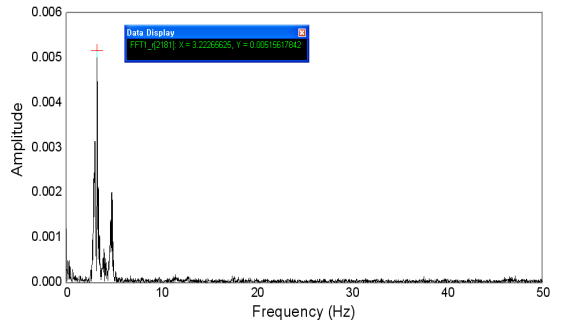


Fig. 10 A-20-2-1 : 3.22 Hz

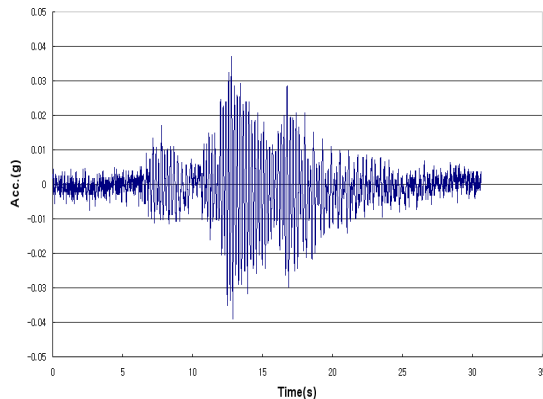


Fig. 8 B-20-3-2(Acc 2)

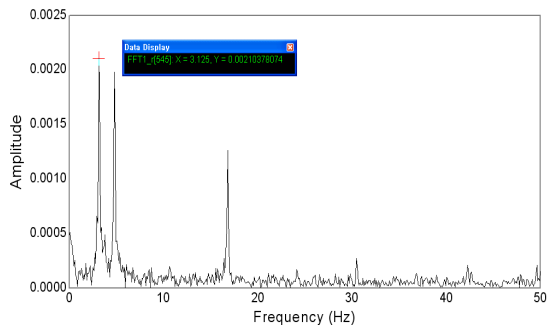


Fig. 11 B-20-3-1 : 3.13 Hz

수분석하여 산출한 고유진동수를 Table 1과 Figs. 10, 11에 제시하였다. 분석결과 WPC 거더 교량의 고유진동수는 3.10 Hz에서 최대 3.80 Hz까지 얻어졌다. 3.40 Hz 이상의 고유진동수는 주로 BMIII 계측기로부터 얻어진 가속도 응답의 분석결과이다.

고유진동수 분석 시 가속도계로부터 얻어진 시간이력은 차량 통과이후의 자유진동 부분만을 고려한 것과 다르게, BMIII는 모뎀화 되어있는 계측기의 특성상 차량이 주행하는 동안에 포함한 진동가속도 이력 전체를 대상으로 진동수 분석이 이루어진 결과 고유진동수에 편차가 발생한 것이라 판단된다.

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

### 4.3 진동사용성 평가

이 논문의 연구 대상인 WPC 교량의 진동사용성 평가를 위하여 우선적으로 교량 위에서 보행자가 느끼는 진동레벨을 Fig. 3에서 제시한 바 있는 Reiher-Meister의 가속도 변환곡선을 사용하여 검토하였으며 그 결과를 Fig. 12에 제시하였다. 평가결과 WPC 교량의 진동응답 정도는 20 km/h, 40 km/h, 50 km/h로 주행했을 시 주행속도와는 크게 상관없이 전체응답의 30%가 강하게 진동을 느끼는 “level C, strongly perceptible”, 응답의 70%는 진동으로 인해 불안감을 느끼는 “level B, disturbing” 수준으로 나타났다. 이러한 결과는 실험차량의 주행속도 20 km/h ~ 50 km/h

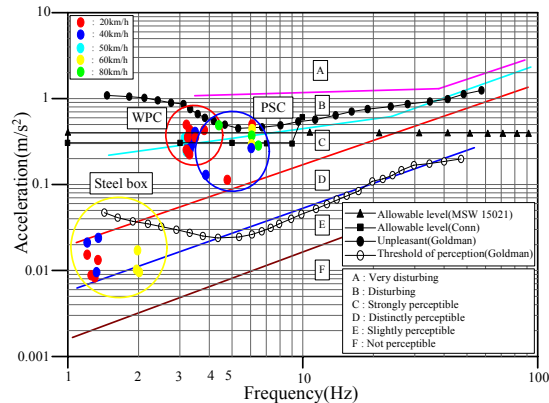


Fig. 12 Evaluation by transform curves of Reiher-Meister

범위에서 WPC 교량은 주행속도에 상관없이 보행자가 불쾌감을 느끼는 정도의 진동응답을 보여 보행자를 기준으로 할 때 적절한 수준의 진동사용성을 확보하고 있지 못하다는 것을 의미한다.

Fig. 12에는 기준에 이동하<sup>(6)</sup>가 연구결과로 제시한 PSC I형 거더교(30 m@2=60 m), 강바닥판을 사용하는 steel box 거더교(45 m@2=90 m)의 진동가속도 응답을 상호 비교하여 나타내었다. 비교결과 WPC 교량은 PSC 교량에 비해 상대적으로 저진동수와 큰 가속도 응답을 보이는것을 알 수 있다. 이러한 원인은 동일 시간일 경우 기존 PSC 교량의 거더에 비해 단면 축소가 가능한 WPC 교량의 구조적인 특징으로 인해 강성과 고유진동수가 일정부분 감소하게 되는 내적인 요인과 교량의 노면조도와 동일하지 못한 실험차량, 구조형식의 상이함 등의 외적인 요인이 복합적으로 영향을 미치기 때문이라 판단된다.

그러나 Fig. 12 상의 교량 간 상호비교는 실험실 내에서 이루어지는 실험처럼 모든 실험변수들을 통일 시킬 수 없는 한계를 가지고 있기 때문에 정량적인 비교에 있어서는 신중해야 하며, 전체적인 경향을 정성적으로 비교하는 수준에서 논의되는 것이 바람직하다.

Fig. 13은 ISO의 3가지 평가기준(폭로한계, 피로능력감퇴경계, 쾌감감퇴경계) 가운데 가장 엄격한 쾌감감퇴경계를 적용하여 검토 한 것으로써, WPC 교량의 경우 보행자가 약 25분 정도 진동에 노출되어 있을 때 쾌감감퇴가 발생한다는 것을 알 수 있다. 보행자의 속도를 2~3km/h로 가정할 때 25분

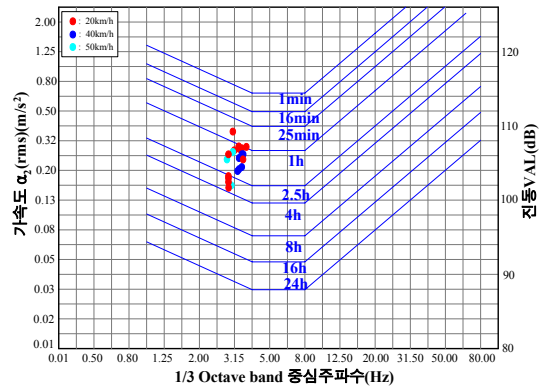


Fig. 13 ISO Vibration influence evaluation

동안 진동에 노출되기 위해서는 교량의 길이가 832 m ~1,250 m는 되어야 한다는 것으로 해석할 수 있으므로 ISO 기준에서 제시하는 쾌감감퇴는 WPC 거더교에서는 현실적으로 발생하지 않는다는 결론에 이르게 되며, 이는 일반적인 현상과 일치하지 않는 모순임을 알 수 있다. 즉, ISO 곡선은 빌딩 등과 같은 건물의 진동에 대한 평가기준으로써 이 연구 대상인 교량의 진동사용성 평가를 위해서는 부적합하다는 것을 의미한다.

## 5. 결 론

이 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 분석하였으며, 분석된 결과는 Reiher-Meister의 가속도 변환곡선과 ISO 평가기준에 의하여 비교·검토되었다.

Reiher-Meister의 가속도 변환곡선에 준하여 검토한 결과 WPC 거더 교량 위를 보행하는 보행자가 느끼는 진동수준은 주행속도와는 크게 상관없이 전체응답의 30%가 강하게 진동을 느끼는 “level C, strongly perceptible”, 응답의 70%는 진동으로 인해 불안감을 느끼는 “level B, disturbing” 수준으로 나타나 이 연구의 실험결과를 근거로 판단할 때 WPC 교량은 적절한 수준의 진동사용성을 확보하고 있지 못하다는 것을 의미한다.

또한 ISO 기준에서 제시하는 쾌감감퇴가 발생하기 위해서는 교량길이가 최소 832 m이상 되어야 한다는 결과가 얻어져 일반적인 현상과 괴리감이 있는 결론에 이르게 된다. 즉, ISO 곡선은 교량의 진동사용성을 평가하는데는 부적합하다는 것을 알 수 있었다.

이 연구에서는 실험차량의 주행속도만을 변수로 사용하였으나 보다 일반화된 진동응답 예측과 진동사용성 평가를 위해서는 노면의 조도, 실험차량의 중량 등을 변수로 포함시키고, 해석적인 방법을 통해 교량의 폭, 거더 수 등을 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, S. T., 1992, “Vibration Through the Influence of Human,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2 No. 2, pp. 253~258
- (2) Korea Institute of Construction Technology, 2000, “Development of Evaluation Procedures for Vibration and Displacement Serviceability of Bridges,” Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation.
- (3) 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 KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 455~458.
- (4) Ahn, S. S. and Lee, I. K., 2003, “Consideration of Dynamic Serviceability Assessment of Bridges,” Korean Society of Steel Construction, Vol. 15, No. 4, pp. 84~89.
- (5) Lee, S. S., Chum, H. M., Lee, J. W., Hong, K. P., 2006, “A Comparative Study on the Evaluation Scales Suggested in Floor Vibration Evaluation Methods,” Architectural Institute of Korea, Vol. 22, No. 3, pp. 3~10.
- (6) Lee, D. H., 2008, “Vibration Effects of the Pedestrians on Steel Box Girder Bridges,” Master Thesis, Dong Shin University.
- (7) Lee, W. J., 2006, “Improved Analysis Method for Serviceability of Highway Bridges,” Master Thesis, Yonsei University.
- (8) Yi, J. H., Lee, J. J., Lee, C. G., Lee, W. T., Yun, C. B., 2004, “Ambient Vibration Tests for Enhanced Bridges Integrity Assessment,” Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 611~614.
- (9) Jeon, B. G. and Kim, N. S., 2007, “Evaluation of Comfort Limit on Bridge Vibration,” Vol. 17, No. 10, pp. 923~935.