

# 교량구조물의 진동 사용성 분석

## Evaluation of Comfort Limit on Bridge Vibration

김남식†·전법규\*

Nam-Sik Kim, Bub-Gyu Jeon

**Key Words** : Comfort Limit(사용성 한계), Bridge Structures(교량구조물), Vibration(진동), Acceleration(가속도)

### ABSTRACT

In general, deflection limit criteria of bridge design specifications would have been considered based on the static serviceability and structural stability. Dynamic serviceability induced from bridge vibration, as a comfort limit, actually has not been included in the criteria. Thus, it is necessary for dynamic serviceability to be considered in bridge vibration problems and for comfort limit on vibration to be needed for evaluating dynamic serviceability of bridges. In this paper, comfort limits of bridge structures considering the time duration exposed by vibration were examined with frequency and time dependent comfort limits, and they were evaluated by using the vibration signals measured from the existing bridges. Therefore, it is resulted that the time-dependent comfort limit considering the duration of vibration is an efficient estimate for evaluating dynamic serviceability of bridges.

### 1. 서 론

일반적으로 구조물에서 발생하는 진동문제는 구조물의 안전성 또는 건전성을 평가하기 위한 수단으로 활용되어 왔다. 그러나 구조적으로 특별한 문제가 없더라도 경우에 따라서는 설계나 유지관리 시 구조물의 진동 사용성(dynamic serviceability)을 고려하여야 하는 경우가 발생한다. 특히 도심지 교량구조물의 경우에는 통행자에게 진동으로 인하여 심한 불편감을 느끼게 할 수 있다.

현재 도로교설계기준(2005)<sup>(1)</sup>에는 활하중과 충격에 의한 허용 처짐값을 제시하고 있으나, 이것은 진동 사용성 기준보다는 정적 사용성 및 구조적인 안전성을 강조하고 있는 기준으로 판단된다. 또한 국내 철도교설계기준(2004)<sup>(2)</sup>의 경우에도 열차 통행속도에 따라서 허용 처짐값을 제한하고 있다. 이러한 허용 처짐값 제한규정들은 진동 사용성을 만족하지 못하거나, 반대로 너무 엄격한 규정으로 인하여 경제적인 교량구조물 설계를 방해하는 요인이 될 수도 있다. 따라서 교량구조물의 진동 사용성 측면에서의 현실적인 평가방법과 기준을 마련할 필요가 있다.

인체에 미치는 진동 사용성 기준은 크게 frequency-dependent한 기준과 time-dependent한 기준으로 나눌 수 있다. 인체진동영향에 대한 최초의 연구는 1935년 Reiher & Meister로서, 주파수 성분에 대한 인체실험을 통하여 frequency-dependent한 허용곡선을 제시하였고, Zeller(1956)는 최초로 frequency-dependent한 진동 사용성 기준을 제안하였다.

Dieckmann(1957)은 진동 사용성에 미치는 가장 큰 인자가 주파수라는 것을 입증하였으며, 독일의 DIN 4150(1999)에서는 frequency-dependent한 기준에의존하는 진동 사용성 기준을 사용하고 있다. time-dependent한 기준은 BS 6841(1987)<sup>(3)</sup>에서 처음 제시되어 ISO 2631(1997)<sup>(4)</sup>과 함께 RMS(root mean square)값을 진동 사용성 평가 수단으로 사용하고 있으며, 이는 KS B0710(2001)<sup>(5)</sup>에도 도입되었다. EERI(European Rail Research Institute) D190(1995)에서는 VDV(vibration dose value)와 개념적으로 유사한 진동 사용성 기준을 적용하고 있다.

본 논문에서는 교량의 진동 사용성 기준으로서 진동지속시간(time duration)을 고려한 사용성한계(comfort limit)를 제시하여 이에 대한 현장 검증실험을 진행하였으며, 가속도 기준으로 검증된 사용성한계와 기존의 교량구조물 설계기준과의 비교분석을 통해서 보다 합리적인 진동지속시간에 따른 교량구조물의 진동 사용성 평가기준을 제시하였다.

† 부산대학교 토목공학과  
E-mail : nskim@pusan.ac.kr  
Tel : (051) 510-2352, Fax : (051) 513-9596

\* 부산대학교 토목공학과

## 2. 구조유형별 국내·외 인체진동영향 기준치에 관한 분석

### 2.1 주파수성분에 따른 진동 사용성 기준 분석

인체진동영향에 대한 최초의 연구는 1930년대 Reiher & Meister(1935)의 허용곡선으로서, 5~70Hz 사이의 수직 및 수평진동에 대해서 인체실험을 수행하여 얻어진 것이다. 실험결과로부터, 저주파수 진동성분에 대해서는 속도가 인체에 민감하게 반응하며 고주파수성분에 대해서는 변위가 인체에 민감한 것으로 증명되었다. 독일의 DIN 4150(1951)은 Reiher & Meister 허용곡선을 기준으로 사용하였다. 또한 최초의 주파수성분에 따른 진동 사용성 기준의 제안은 Zeller(1956)로서, 인체에 작용하는 주파수 성분에 따라 가속도 크기로 표현되는 사용성한계를 제시하였다.

진동 사용성에 미치는 가장 큰 영향인자가 주파수라는 것을 입증한 Dieckmann(1957)은 인체를 질량-스프링 시스템으로 모델링하여, 2~7Hz 사이의 진동이 인체에서 두드러지게 증폭된다는 사실을 증명하였다. 따라서 DIN 4150(1999)은 진동신호의 주파수성분에 의존하는 진동 사용성 기준을 사용하고 있다. 아래의 Table 1은 주파수성분에 따른 진동 사용성 기준들을 정리한 것이다.

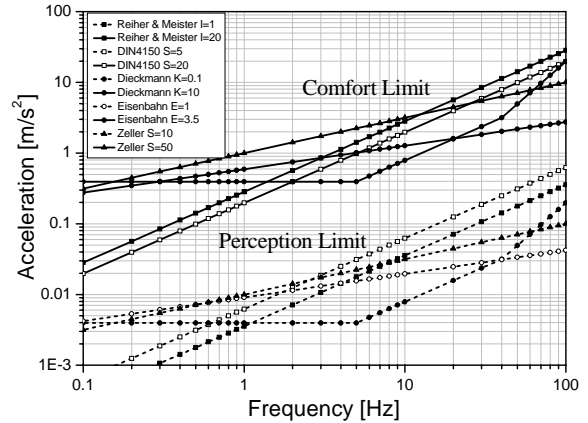
Table 1 주파수성분에 따른 진동 사용성 기준

진동 사용성 기준	사용성 한계	비고
Reiher & Meister (1935) $I = 10 \cdot \log \frac{v}{v_0}, I = 5.4 \cdot \log \frac{\delta}{\delta_0}$ $v_0 = 0.45 \text{ mm/s}$	20	최초의 인체진동실험결과 low frequency vibration → velocity high frequency vibration → displacement
Zeller (1956) $S = 10 \cdot \log \frac{x}{x_s}$ $x = (4\pi^2)^2 a^2 \cdot f^2, x_s = 0.1 \text{ cm}^2/\text{s}^7$	50	frequency-dependent한 가속도 기준 제시
Eisenbahn (1958) $E = 3.1 \cdot \sqrt[3]{X^3 f^5}$	3.5	short time exposure 적용
DIN 4150 (1951) $S = 10 \cdot \log \frac{v}{v_s}, v_s = 0.0314 \text{ cm/s}$	20	Reiher & Meister 기준의 수정
Dieckmann (1957) $K = X \cdot f^2 \quad 0.5 \text{ Hz} \leq f < 5 \text{ Hz}$ $K = 5 \cdot X \cdot f \quad 5 \text{ Hz} \leq f < 40 \text{ Hz}$ $K = 200 \cdot X \quad 40 \text{ Hz} \leq f < 100 \text{ Hz}$	10	vertical vibration frequency 의 영향을 고려 2~7Hz 범위에서 민감하게 느낌.
DIN 4150 (1999) $K = \frac{0.005 \cdot X \cdot f^2}{100 + f^2}$ $X = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$	1.6	건물의 작은 진동규모에 적용

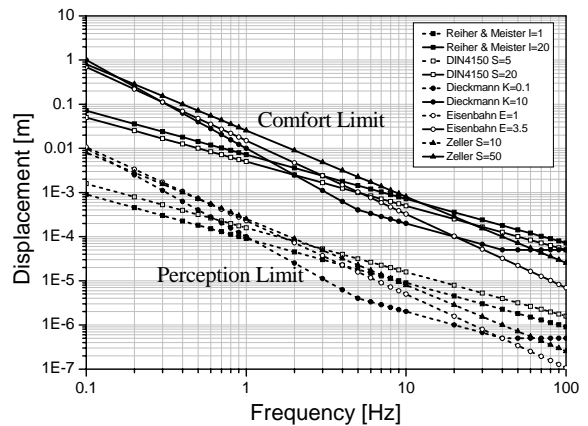
Table 1의 주파수성분에 따른 진동 사용성 기준들의 크기를 비교하기 위하여, 본 논문에서는 진동신호를 조화운동(harmonic motion)으로 가정하여 각각의 기준들을 정량적

으로 비교하였다.

주파수성분에 따른 진동 사용성 기준들의 비교는 다음의 Fig. 1(a), Fig. 1(b)와 같다. 그림에서 보이고 있는 진동 사용성기준은 인체가 불쾌감을 느끼기 시작하는 사용성한계와 인체가 진동을 감지하는 기준인 perception limit으로 구분하여 정의하였다.



(a) 가속도성분, harmonic motion 가정



(b) 변위성분, harmonic motion 가정

Fig. 1 주파수성분에 따른 진동 사용성 기준 비교

Fig. 1(a)는 주파수성분에 따른 가속도 크기의 진동 사용성 기준으로서, 진동주파수가 증가할수록 사용성한계가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 교량구조물의 수직진동에 대한 통상적인 사용성한계인  $1.0 \text{ m/s}^2$ 과 비교한다면, 구조물의 일반적인 고유진동수범위에서 그림 Fig. 1(a)로부터 얻어진 평균 가속도 크기와 유사함을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 변위성분에 대한 진동 사용성 기준이다. 그림에서 나타난 바와 같이, 가속도성분에 대한 진동 사용성 기준과 반대로 변위성분에 대한 진동 사용성 기준은 진동주파수의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다.

인체에 미치는 진동영향을 평가하기 위하여 많은 연구자들에 의해서 주파수성분에 따른 가중치(weighting factor)

의 결정에 대한 접근이 이루어졌다. Fig. 2에 보이고 있는 FWF(frequency weighting filter)는 대략 5~16Hz 사이에서 인체에 가장 영향을 크게 주며 이외의 구간에서는 상대적으로 가중치가 감소하는 것을 의미한다.

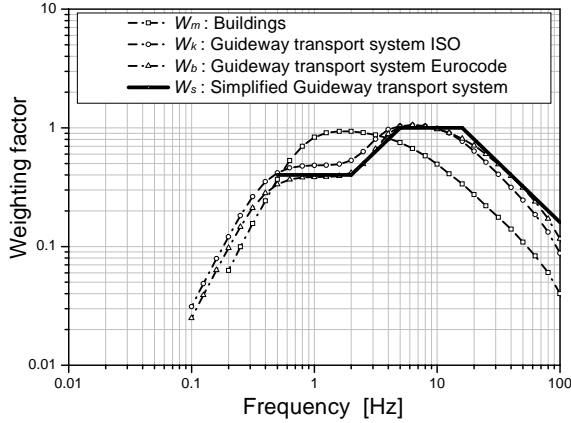


Fig. 2 Frequency Weighting Filter

1975년 ISO에 의해서 처음으로 채택된 FWF는 현재 BS 6841, ISO 2631, DIN 8041 등에서 진동 사용성 평가에 적용하도록 규정하고 있다.

본 논문에서 적용하고자 하는 FWF는 Fig. 2의  $W_s$  이며 이를 식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$0.5\text{Hz} < f < 2.0\text{Hz}, W(f) = 0.4 \quad (1)$$

$$2.0\text{Hz} < f < 5.0\text{Hz}, W(f) = f/5.0$$

$$5.0\text{Hz} < f < 16.0\text{Hz}, W(f) = 1.00$$

$$16.0\text{Hz} < f < 80.0\text{Hz}, W(f) = 16.0/f$$

예를 들면, 교량구조물에서 측정한 진동신호의 auto spectral density function을  $G_{xx}(f)$ 로 가정하면 식 (2)에서와 같이 FWF를 거친 RMS(root mean square)값의 스펙트럼  $A_{rms,w}(f)$ 를 얻을 수 있다.

$$A_{rms,w}(f) = \sqrt{\int_{f=0.5}^{f=80} G_{xx}(f) W_i(f)^2 df} \quad (2)$$

## 2.2 진동지속시간에 따른 진동 사용성 기준 분석

일반적으로 구조물에서 측정한 진동 가속도신호의 크기는 최대값(peak value)으로 정의할 수 있다. 그러나 진동신호가 복잡한 경우에는 최대값이 그 진동신호를 대표하기에 부적절하므로 평균의 개념인 RMS값으로 대신한다. 아래의 식 (3)은 FWF가 적용된 가속도신호  $aw(t)$ 에 대한 RMS값을 나타내고 있다. RMS값은 일반적으로 진동 사용성을 평가하기에 적절한 대푯값으로 증명되어 있다. 그러나

Handbook of Human Vibration<sup>(6)</sup>에 의하면 진동신호의 fluctuation이 큰 경우에는 최대값을 적절하게 반영하기가 곤란하며, 또한 서로 다른 진동지속시간을 비교하는 경우에는 RMS값을 사용하기가 적절하지 못하다. 따라서 ISO 2631에서는 crest factor(=peak value/frequency weighted RMS value)가 9 이하인 경우에 사용하도록 규정하고 있다.

$$a_{rms,w} = \sqrt{\frac{1}{T} \int a_w^2(t) dt}, \quad (3)$$

진동신호의 fluctuation이 큰 경우에는 최대값의 영향을 충분히 고려하기 위하여 RMQ(root mean quad)값을 사용할 수 있다. 여기서 식 (4)와 같이 계산되는 RMQ값은 RMS값에 비하여 최대값의 비중을 크게 함으로서 불규칙한 진동신호의 대표값을 보다 적절하게 유도할 수 있다. 따라서 crest factor가 9보다 큰 경우에 사용하는 것이 바람직하다. 여기서 RMS와 RMQ의 단위는  $\text{m/s}^2$ 이다.

$$a_{rmq,w} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int a_w^4(t) dt}, \quad (4)$$

서로 다른 진동신호의 지속시간이 다른 경우에는 RMS값이나 RMQ값은 지속시간에 대한 평균개념으로 계산되기 때문에 진동지속시간에 따른 사용성을 평가하기에 적절하지 않을 수 있다. 이러한 경우에 식 (5)와 같이 VDV(vibration dose value)를 사용함으로써 진동지속시간에 따른 진동 사용성 평가를 가능하게 한다. 따라서 진동신호의 시작점을 정의하기 어려운 경우나 crest factor가 상당히 큰 경우에 VDV를 사용하는 것이 바람직하다. 현재 ISO와 BS 기준에서 VDV를 진동 사용성 평가를 위한 지표로 포함시키고 있다. VDV의 단위는  $\text{m/s}^{1.75}$ 이다.

$$VDV = \sqrt[4]{\int_{t=0}^{t=T} a_w^4(t) dt} \quad (5)$$

앞에서 열거한 RMS값, RMQ값, VDV를 서로 비교하기 위하여 진동신호를 조화운동으로 가정한다면 다음의 식 (6), (7)과 같이 정의할 수 있다. 결국 VDV는 진동의 지속시간이 길어짐에 따라서 증가하는 값을 나타낸다.

$$a_{rms,w} = |a_w|_{\max} / \sqrt{2} \quad (6)$$

$$VDV = a_{rms,w} \sqrt[4]{1.5T} = a_{rmq,w} \sqrt[4]{T} \quad (7)$$

다음의 Table 2는 진동지속시간이 고려된 진동 사용성 기준을 정리한 것이다.

Table 2 진동지속시간에 따른 진동 사용성 기준

기준	사용성 한계	비 고
BS 6841 (1987) $a_{rms,w} = \sqrt{\frac{1}{T} \int a_w^2(t) dt}$	0.8	진동지속시간이 다른 신호, Transient signal fluctuation이 큰경우에서 부적절함.
ISO 2631 (1997) $a_{rms,w} = \sqrt{\frac{1}{T} \int a_w^2(t) dt}$	0.8	Frequency Weighting filter (Wb) 사용. Crestfactor $\frac{Peakvalue}{Weighted RMS value} < 9$
DIN V ENV 12299(2001) $a_{95} = 95^{th} percentile of a_{rms,w}$	4	For small vibrations
ERRI D190 (1995) $LI_h = 107.77 \sqrt[3]{\int_0^T  a_w(t) ^3 dt}$	45	10% uncomfortable
Root Mean Quad (RMQ) $a_{rmq,w} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int a_w^4(t) dt}$		Crestfactor $\frac{Peakvalue}{Weighted RMS value} > 9$
Vibration Dose Value $VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t) dt}$		used by the BS and ISO

BS 6841(1987)과 ISO 2631(1997)에서는 진동 사용성 평가를 위하여 RMS값을 사용하고 있으며, 사용성한계로 0.8m/s<sup>2</sup>을 정의하고 있다. 또한 EERI(European Rail Research Institute) D190(1995)에서는 VDV와 개념적으로 유사한 진동 사용성 기준을 적용하고 있다. 이 기준은 사용성한계를 만족하지 못할 확률이 10%인 기준을 제시하였다.

### 3. 국내 교량구조물 진동 사용성 허용기준 분석

앞 장에서 정리한 진동 사용성 기준을 교량구조물을 대상으로 타당성을 검증하기 위하여, 현재 국내에서 적용되고 있는 도로교설계기준(2005) 및 철도교설계기준(2004)의 허용치짐 규정을 이용하였다. 실제 교량구조물의 차량에 의한 진동신호는 비교적 불규칙하며, 또한 설계기준에서 제시한 허용치짐값은 진동 사용성 평가와 직접적인 연관은 작은 것으로 판단된다. 그러나 교량구조물에 대한 진동 사용성 기준이 미흡한 국내실정에서 진동 사용성 기준(안)을 제시하기 위한 선행연구가 필요하며, 이러한 목적으로 국내 교량설계기준에서 정의된 허용치짐값을 기존 진동 사용성 기준에 맞추어 비교분석하였다.

#### 3.1 도로교 진동 사용성 허용기준 분석

다음의 Table 3은 국내 도로교설계기준에서 제시된 허용치짐값을 기준으로 frequency weighted dynamic displacement의 계산절차를 정리한 것이다.

여기서 고유진동수는 교량의 경간 길이로부터 근사적으로 얻었으며, 진동 사용성 평가를 위한 동적변위는 허용치

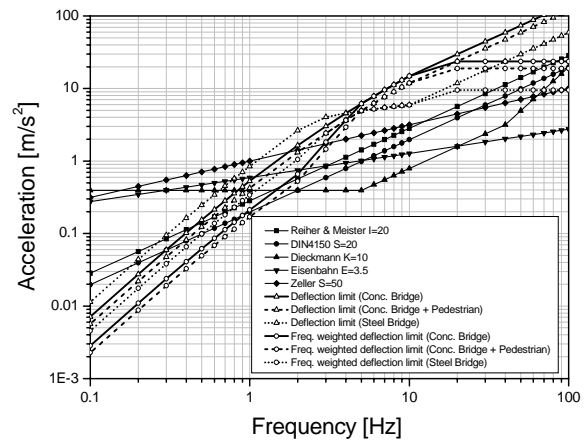
짐값에 충격계수를 곱해서 구하였다. 최종적으로 frequency weighted dynamic displacement는 얻어진 동적변위에 그림 Fig. 2에서 정의한 FWF를 곱하여 얻을 수 있다.

Table 3 도로교설계기준(2005)의 허용치짐값 및 frequency weighted dynamic displacement

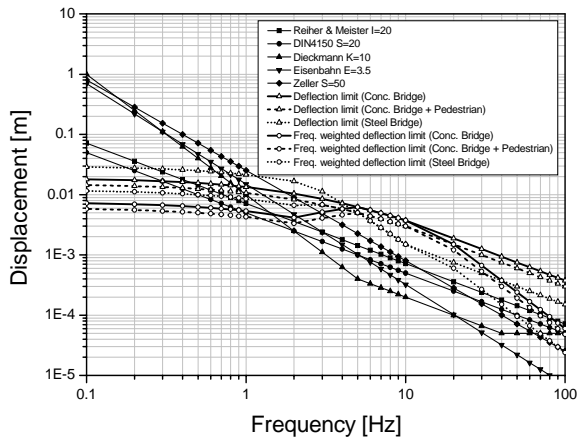
허용치짐 기준	콘크리트교		플레이트거더교
	단순경간 또는 연속경간	보행자가 있는 도시지역	단순지지 및 연속 거더
충격계수	$\delta_{max} = L/800$	$\delta_{max} = L/1000$	$\delta_{max} = L/2000, L \leq 10m$ $\delta_{max} = L / (\frac{20000}{L}), 10m < L \leq 40m$ $\delta_{max} = L/500, L > 40m$
고유진동수	$I = \frac{15}{40+L} \leq 0.3$		
동적변위	$f(Hz) \approx \frac{100}{L}$		
frequency weighted dynamic displacement	$\delta_{dynamic} = \delta_{max} \times I$  $\delta_{dynamic,w} = \delta_{dynamic} \times W_b$		

앞장에서 정의된 frequency-dependent한 사용성한계와 도로교설계기준(2005)의 허용치짐값으로부터 계산된 가속도, 속도, 변위성분과의 비교는 각각 Fig. 3(a), Fig. 3(b)와 같다. 여기서 허용치짐값으로부터 계산된 가속도, 속도, 변위성분은 FWF가 적용된 경우와 적용되지 않은 경우로 구분되며, 교량의 진동신호는 조화운동을 하는것으로 가정한 것이다.

Fig. 3(a)의 도로교설계기준으로부터 얻어진 가속도성분을 비교하면, 교량구조물의 일반적인 고유진동수범위인 1~10Hz 구간에서 전반적으로 진동 사용성 기준보다 큰 값이 얻어지고 있다. 이것은 도로교설계기준의 허용치짐값으로부터 유추한 허용 가속도값이 사용성한계를 초과하는 것으로 볼 수 있다. 특히 교량구조물의 고유진동수가 증가함에 따라서 진동 사용성이 불리해지는 경향을 보이고 있다.



(a) 가속도성분



(b) (변위성분)

Fig. 3 Frequency-dependent 사용성한계와 도로교설계기준의 비교

Fig. 3(b)에서는 도로교설계기준으로부터 얻어진 허용치짐값의 동적변위성분을 진동 사용성 기준과 비교하였다. Fig. 3(a)와 마찬가지로 변위성분도 사용성한계를 초과하는 결과를 나타내고 있다. 따라서 향후 교량구조물의 진동 사용성 평가와 기준을 정립하기 위하여 기준에 사용하고 있는 교량설계기준의 허용치짐값과의 연계성을 면밀히 분석하고자 한다.

### 3.2 철도교 진동 사용성 허용기준 분석

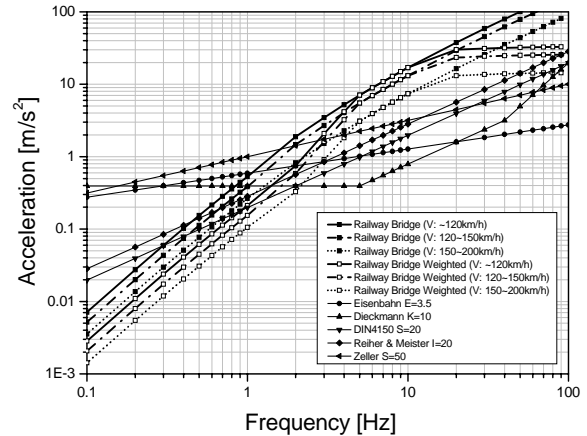
Table 4는 현재 철도교설계기준(2004)에서 적용하고 있는 허용치짐값을 정리한 것이다. 도로교설계기준과의 차이점은 열차의 주행속도에 따라서 허용치짐 규정을 구분하였다. 이것은 열차의 통과속도(V)와 교량의 경간길이(L)에 의해서 결정되는 진동지속시간을 부분적으로 고려하여 진동 사용성을 규정하고자 하는 의미를 포함하고 있다. 또한 열차의 주행속도가 증가함에 따라서 열차주행의 안정성을 높이며 공진의 가능성을 배제하기 위하여 더욱 엄격한 허용치짐기준을 적용하고 있다.

Table 4 철도교설계기준(2004)의 허용치짐값

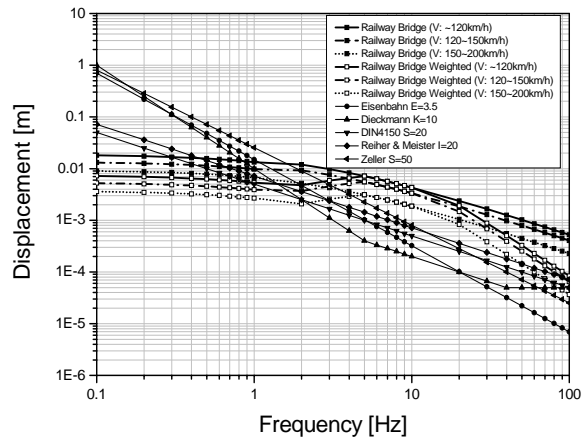
열차속도	경간길이	$0 < L < 50m$	$L \geq 50m$
$V \leq 120km/h$		$\delta_{max} = L/800$	$\delta_{max} = L/700$
$120km/h < V \leq 150km/h$		$\delta_{max} = L/1100$	$\delta_{max} = L/900$
$150km/h < V \leq 200km/h$		$\delta_{max} = L/1600$	
고속철도(프랑스기준 적용)		$\delta_{max} = L/1700$	

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 frequency-dependent한 진동

사용성기준과 철도교설계기준의 허용치짐값을 기준으로 계산한 허용 가속도성분, 속도성분, 변위성분을 비교한 것이다. 3.1항의 도로교설계기준을 적용한 경우와 마찬가지로 진동신호가 조화운동을 하는 것으로 가정한 상태에서, 허용치짐값의 동적 가속도성분, 속도성분, 변위성분을 계산한 것이다.



(a) 가속도성분



(b) 변위성분

Fig. 4 Frequency-dependent 사용성한계와 철도교설계기준의 비교

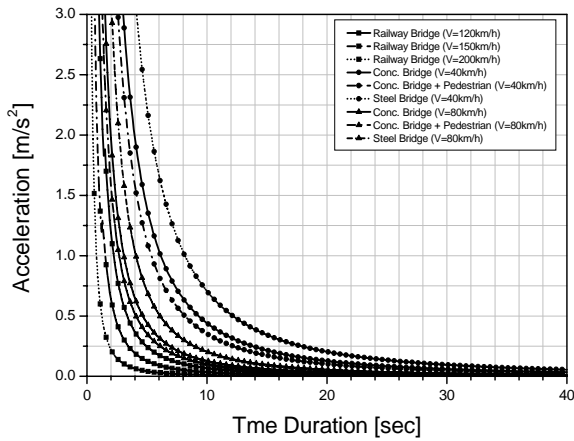
Fig. 4(a)와 같이 가속도성분을 진동 사용성기준과 비교하면, 교량구조물의 고유진동수가 5~20Hz 구간에서 사용성한계를 초과하고 있다. 특히 열차속도가 느린 경우에 사용성한계와 차이가 더욱 크게 발생하는 것으로 나타난다. 따라서 진동 사용성 평가를 위한 중요한 인자로서 진동지속시간을 고려하여야 하며, 사용성한계와 강성한계(stiffness limit) 사이의 연관성을 구체적으로 규명할 필요가 있다.

Fig. 4(b)의 동적 허용 변위성분에 대한 비교에서도 교량

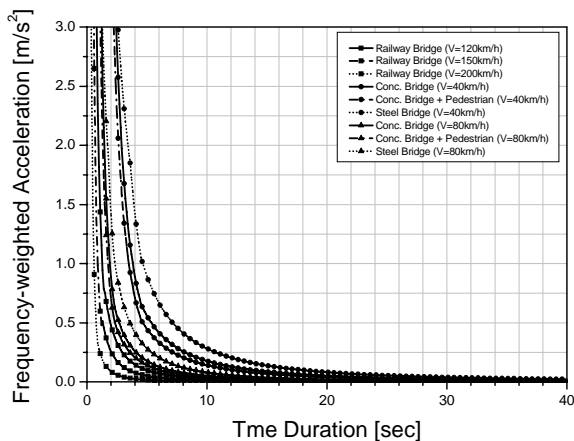
구조물의 고유진동수가 5Hz 이상에서 사용성한계를 초과하고 있다. 그러나 고유진동수가 낮은 구간에서는 오히려 엄격한 강성한계가 적용되고 있는 것으로 판단된다.

#### 4. 교량구조물의 진동 사용성 평가기준(안) 제안

3장에서 분석한 바와 같이, 국내 도로교설계기준과 철도교설계기준에서 제시한 허용치집값을 기준으로 진동 사용성을 분석하였다. 이것은 진동 사용성 기준에서 규정한 사용성한계와 교량설계기준에서 규정한 강성한계와의 연관성을 확인하기 위한 것이다. 그러나 진동 사용성을 평가하기 위한 중요한 인자로서 진동지속시간을 고려하는 것이 타당하며 이에 대한 기존 교량설계기준의 검토가 필요하다.



(a) 최대가속도성분 적용



(b) FWF를 적용한 가속도성분 적용

Fig. 5 진동지속시간에 따른 교량설계기준의 허용 가속도성분 비교

Fig. 5(a), Fig. 5(b)는 차량이나 열차의 통행속도와 교량의 경간길이에 따라 얻어지는 진동지속시간에 따른 동적 허용 가속도성분을 나타낸 것이다. 여기서 교량설계기준의 허용치집값을 기준으로 최대 가속도성분을 계산하였으며, 또한 FWF를 적용한 가속도성분을 얻었다. 결과로부터 진동지속시간이 증가함에 따라서 허용 가속도성분의 크기가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이것은 교량의 진동 사용성을 정량적으로 평가할 때 진동지속시간의 영향이 매우 큰 것으로 간주할 수 있다.

Fig. 5(a), Fig. 5(b)에서 공통적으로 나타나는 경향은 철도교에 비해서 도로교의 허용 가속도성분이 크게 나타났으며, 특히 통행속도가 낮은 경우에 허용 가속도성분은 크게 얻어졌다. 따라서 교량구조물의 진동 사용성을 평가할 경우에는 통행 차량이나 열차에 탑승한 승객에게 영향을 미치는 진동지속시간을 적절히 고려하는 것이 타당하다.

본 논문에서는 교량구조물의 진동 사용성을 평가하기 위한 기준(안)으로서 Fig. 6과 같이 가속도성분에 대한 사용성한계를 제시하고자 한다. 이미 언급한 바와 같이, 교량구조물의 진동 사용성은 진동지속시간의 영향을 고려하여 평가하는 것이 타당하다는 결론을 잠정적으로 얻었다. 따라서 진동지속시간의 영향을 충분히 반영할 수 있는 VDV를 사용하여 기존 교량구조물의 진동 사용성을 평가하고자 한다.

Bruggers, W. B<sup>(7)</sup>는 Fig. 6과 같이 가속도 기준의 사용성한계는 진동지속시간(2~32초 구간)이 증가함에 따라서 점진적으로 감소하는 기준(안)을 제시하였다. 만약 진동가속도 신호가 조화운동이라고 가정한다면, VDV와 RMS값의 상관관계는 식(7)과 같이  $\sqrt[4]{T}$ 에 의해서 결정될 수 있다.

Bruggers, W. B는 Comfort Related Design of Railway Bridge에서 사용성한계는 BS 6841과 ISO 2631에서 제시하고 있는 RMS값  $0.8m/s^2$ 로 정의 하였으며, 약간 불편한 정도를  $0.4m/s^2$ 로 정의하고 있다. 사용성한계인 RMS값  $0.8m/s^2$ 을 식(7)을 사용하여 VDV로 환산하면  $1.05m/s^{1.75}$ 이다.

본 논문에서 제시할 진동지속시간을 고려한 교량구조물의 진동 사용성 기준의 계산된 RMQ값의 범위는 Table 5와 같다.

Table 5 진동 사용성 범위(Comfort and uncomfort limit)

기준	대푯값	RMS( $m/s^2$ )	RMQ( $m/s^2$ )
Comfortable		0.8	0.89
a little uncomfortable		0.4	0.44

사용성한계의 VDV는  $1.05m/s^{1.75}$ 를 기준으로 2~32초 구간의 진동지속시간에 해당하는 값을 식(7)에 대입함으로써 구할 수 있다. 이를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다.

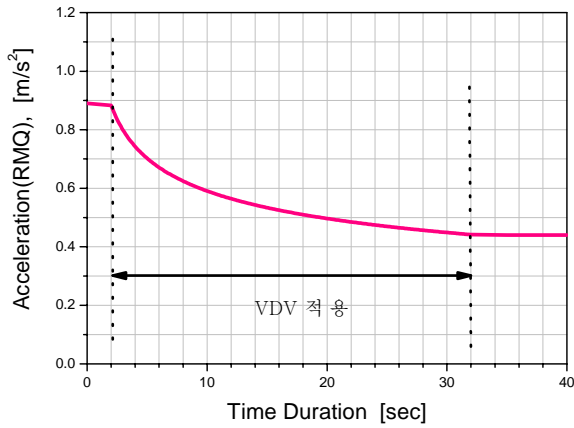


Fig. 6 진동지속시간을 고려한 교량구조물의 진동 사용성 기준

## 5. 실교량 진동 사용성 평가

### 5.1 실교량 진동신호 측정

교량의 진동 사용성 평가를 위해 현재 공용 중인 대상교량(도로교, 철도교, 보도교)을 선정하여 가속도신호를 측정하였다.

다음의 Fig. 7(a~c)은 대표적인 대상 교량을 나타내고 있으며, Fig. 7(d)는 현장측정에 사용된 DAQ시스템을 보이고 있다.



Fig. 7 측정 대상 및 측정 장비

교량의 진동은 차량 통행시 영향을 많이 받는 위치에서 측정하는 것이 타당하여 인체가 안락함에 지배적인 영향을 미치는 수직방향으로만 측정하였다. 각각 가속도 신호는 경간의 중앙부에서 측정하였고, 도로교(광안대교)의 경우에만 최외측에 가속도센서를 부착하였다.

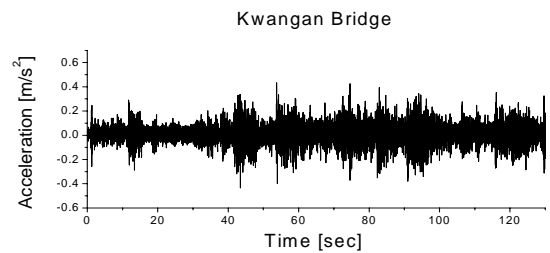
가속도 신호는 ICP Type의 가속도센서 1채널을 수직방향으로 설치하였다. 광안대교는 취득속도(sampling rate)를 100Hz로 하여 측정하였으며, 이를 제외한 모든 대상교량은 400Hz로 측정하였다.

Table 6은 진동측정 대상 교량의 대략적인 개요이다. 대상은 도로교를 제외하고, 진동이 심하게 발생한다고 추정되는 교량을 임의로 선정하여 각각 수회의 진동측정을 실행하였으며, 광안대교의 경우 중차량(트레일러 및 화물차량) 통행량이 많은 오후 3~6시 사이에 측정하였다. 철도교는 부산지하철 1,3호선의 강박스 교량 두 곳을 대상으로 하였고, 보도교는 부산 해운대에 위치한 경간이 긴 육교를 선정하여 측정하였다.

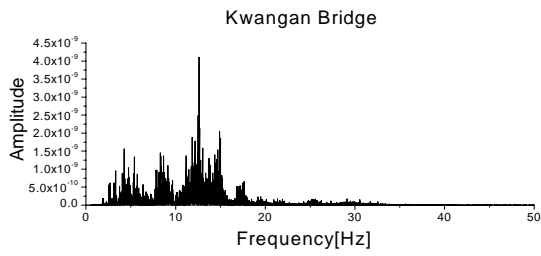
Table 6 진동측정 대상 교량

대상교량	위 치	경간 길이(m)	측 정 위 치	구 조 형 식
광안대교	부산 광안리	900	경간 중앙 최외측	현수교
지하철 교량 1	부산지하철 1호선 온천장역↔부산대학교역 구간	34.16	경간 중앙 강박스 하부	강박스 거더교
지하철 교량 2	부산지하철 3호선 강서체육공원역↔강서구청역 구간	130	경간 1/4지점 강박스 하부	3경간 연속 강박스 거더교
보도교	부산 해운대	(≒)26	경간 중앙	변단면 거더교

Fig. 8에서 Fig. 11까지는 각 대상교량의 가속도신호 중 최대값이 얻어진 측정신호이다. 아래 Fig. 8은 광안대교의 경우로, 통행차량 교량의 설계하중에 비하여 상당히 작은 하중을 보이고 있기 때문에, 차량 주행에 의한 가속도신호의 변화 양상을 파악할 수 없다. 또한, 교량의 노면조도는 동적응답에 직접적인 영향을 주기 때문에 노면이 불량할 경우 진동 평가에도 불리하게 나타날 수 있으므로 상시진동 측정값을 크게 신뢰할 수는 없다.<sup>(8)</sup> 광안대교의 측정신호는 통행하중에 의해서 나타나는 진동특성은 관찰되지 않았다.



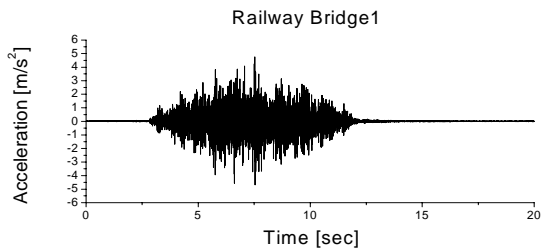
(a) Measurement Data



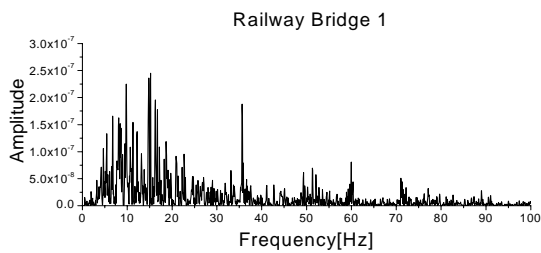
(b) Weighted Power Spectrum

Fig. 8 광안대교 진동 측정값

다음의 Fig. 9~10은 부산지하철 교량을 대상으로 비교적 진동의 영향이 큰 구간을 선정하여 측정된 것으로, 보도교 및 도로교에 비해 철도교는 통과 열차의 하중이 크고 연속적이며 강박스 거더교의 특성상 진동이 심하여 뚜렷한 진동특성을 나타내고 있다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 지하철 교량 2에서 대상교량 중 가속도신호 크기가 가장 큰 진동특성을 보이고 있다.

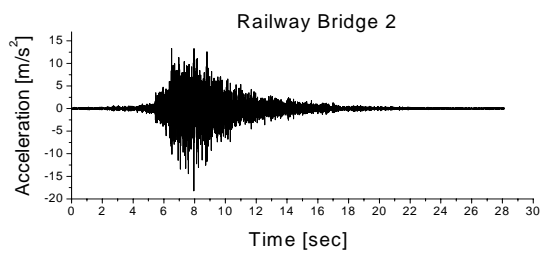


(a) Measurement Data

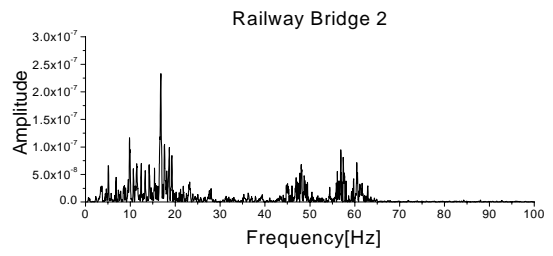


(b) Weighted Power Spectrum

Fig. 9 지하철 교량 1의 진동 측정값



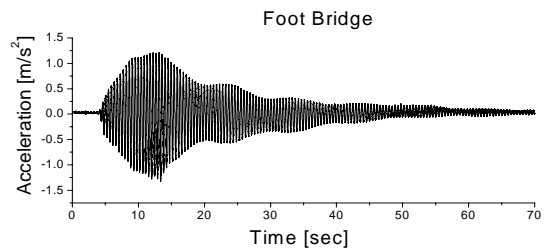
(a) Measurement Data



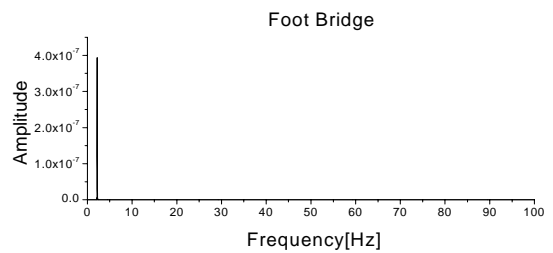
(b) Weighted Power Spectrum

Fig. 10 지하철 교량 2의 진동 측정값

보도교의 경우 가장 큰 가속도 크기는 2명이 교량 중앙에서 일정한 주기로 점프하는 경우 얻어졌으며, 이는 교량에 공진을 부분적으로 유도하는 것이다. 일정한 주기를 갖는 하중이 작용하기 때문에 조화운동에 가까운 가속도신호가 측정되었으며, Fig. 11(b)와 같이 뚜렷한 1차 진동모드가 얻어졌다.



(a) Measurement Data



(b) Weighted Power Spectrum

Fig. 11 보도교의 진동 측정값

각 대상교량의 전체적인 weighted power spectrum은 Fig. 2의 FWF가 적용되어 인체에 유해한 주파수인 5~16Hz구간이 증폭되어 나타나고 있다.

## 5.2 진동신호 분석

일반적으로 인체에 영향을 주는 주파수 범위는 0.5~80Hz로 알려져 있으며, 인체에 유해한 주파수범위는 5~16Hz이다. 따라서 최대 가속도값이 얻어진 측정데이터에 FWF를 적용하여 BS 6841, ISO 2631/1에서 제시하고



있는 RMS값, RMQ값 및 VDV를 진동수준의 대푯값으로 하여 기존의 frequency-dependent한 사용성한계와 비교하였다.

Table 7 FWF가 적용된 진동수준의 대푯값

구분	광안대교	지하철 교량 1	지하철 교량 2	보도교
WRMS ( $m/s^2$ )	0.0666	0.2606	0.5173	0.1363
WRMQ ( $m/s^2$ )	0.1003	0.4820	1.1990	0.2192
WVDV ( $m/s^{1.75}$ )	0.3590	1.2194	4.2896	0.9328
WVDV ( $m/s^2$ )	0.104	0.577	1.864	0.322
Crest factor	7.6	15.62	25.69	0.95

앞서 Table 1에서 crest factor가 9 이하인 작은 진동수준에 대해서는 RMS값을 기준으로 진동 사용성을 평가할 수 있으나, 간헐적으로 발생하는 충격과 같이 진동의 fluctuation이 큰 경우에는 높은 crest factor를 갖기 때문에 RMS값 보다는 RMQ값 혹은 VDV를 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 12는 frequency-dependent한 기존의 사용성한계와 대상교량의 FWF가 적용된 진동수준의 대푯값을 비교한 것이다. 여기서 crest factor가 9 이하인 광안대교 및 보도교의 경우 WRMS값을 사용하였으며, crest factor가 9이상인 지하철 교량1,2에서는 WRMQ값을 대푯값으로 사용하였다.

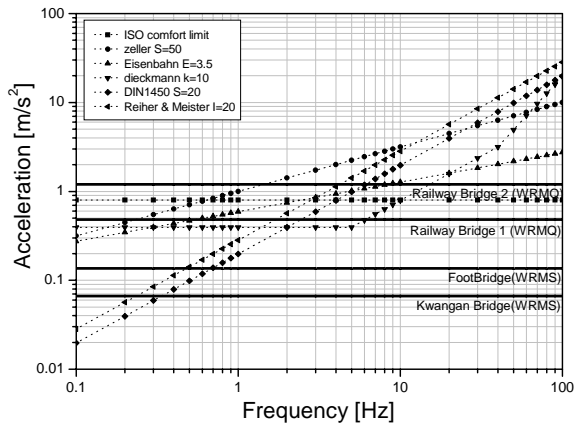


Fig. 12 사용성한계와 FWF가 적용된 대푯값 비교

Fig. 12에서 보도교와 광안대교는 진동 수준이 매우 낮은 반면, 철도교는 저주파수에서 진동 사용성 한계를 초과하는 모습을 보이고 있다. 이는 일반적으로 차량의 총 중량에 비례하여 동적변위가 증가하는 경향이 있으므로 통과 차량이 무거운 철도교에서 가속도신호의 크기가 크게 나타난 것으로 판단된다.

VDV의 경우는 RMS값과 달리 지속시간에 대한 평균 개념으로 계산되지 않기 때문에 진동신호의 시작점을 정의

하기 어려운 경우나 진동지속시간에 따른 진동 사용성을 평가하기에 매우 유리하다.

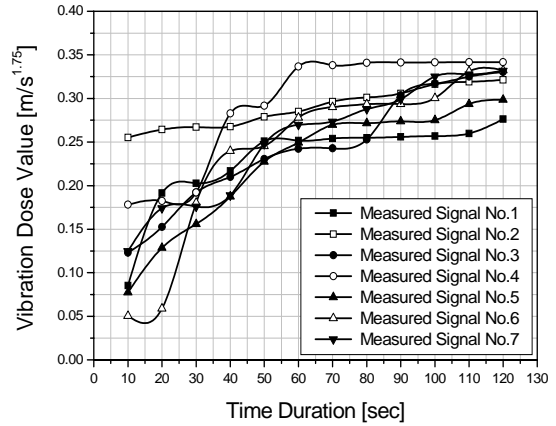


Fig. 13 광안대교의 계측신호의 진동지속시간에 따른 VDV

Fig. 13은 측정신호의 진동지속시간에 따른 VDV의 변화를 나타낸 것으로, VDV는 4제곱근으로 진동지속시간이 길수록 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다.

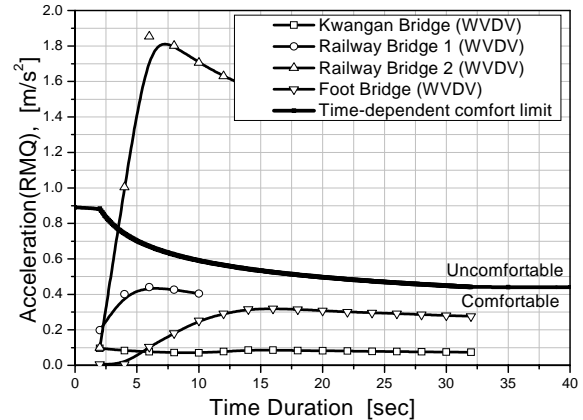


Fig. 14 Time-dependent 사용성한계와 교량별 환산 WVDV값의 비교

Fig. 14는 Fig. 6에서 제시한 time-dependent한 사용성한계의 타당성을 검증하기 위하여 식 (8)을 사용하여 VDV의 단위를  $m/s^2$ 으로 변환하여 진동지속시간에 따른 WVDV(weighted vibration dose value)와 사용성한계를 비교한 것으로 각 대상교량의 가장 큰 VDV를 가지는 자료를 바탕으로 지하철 교량의 경우 진동지속시간만을 고려하였고, 광안대교와 보도교의 경우 VDV적용 구간인 2~32초 사이의 지속시간에 한하여 time-dependent한 사용성한계와 비교한 것이다

$$\frac{VDV(m/s^{1.75})}{T^{0.25}} = VDV(m/s^2) \quad (8)$$

여기서 T는 진동지속시간을 의미한다.

VDV(m/s<sup>1.75</sup>)는 모든 측정데이터 합이 4제곱근이므로 그림 Fig. 13과 같이 진동지속시간이 증가함에 따라 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이지만, m/s<sup>2</sup>의 단위로 환산한 VDV는 일정한 값에 수렴한 후에 제안된 사용성한계와 같은 하향곡선을 그리는 경향을 나타내고 있다.

## 6. 결론

교량의 진동 사용성 평가는 교량과 차량사이의 상호작용 및 노면조도 등에 영향을 받으며, 실질적으로 교량을 통과하는 보행자보다는 차량승객에게 진동영향의 가능성이 높다고 간주할 수 있다. 또한 일반적으로 철도교를 통과하는 차량하중이 보도교 및 도로교와 비교해서 연속된 여러축을 가지는 상대적으로 매우 큰 하중특성을 갖고 있기 때문에 진동 사용성 관점에서 영향이 클 것으로 판단된다. 따라서 교량의 진동 사용성 문제는 철도교량에서 더욱 심각하게 접근할 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 논문에서 진동지속시간을 고려한 time-dependent한 사용성한계는 기존의 frequency-dependent한 사용성한계들과 달리 일정한 대푯값으로 정의되는 것이 아니라 진동지속시간에 따라 변화하는 기준이기 때문에 대상 구조물에 가해지는 진동지속시간의 예측이 가능하다면 보다 정확한 진동 사용성 평가가 가능하다. 또한 현재 사용되고 있는 교량 허용치짐기준과 연계하여 진동 사용성 기준을 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다

## 참 고 문 헌

- (1) 한국도로교통협회, 2005, “도로교설계기준”, 건설교통부.
- (2) 한국철도시설공단, 2004, “철도교설계기준”, 건설교통부.
- (3) British Standard Institution, 1987, BS6841 British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock,
- (4) ISO, 1997, ISO 2631 Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole-body vibration
- (5) 한국표준협회, 2001, “KS B 0710 기계적 진동 및 충격-인체 피폭 전신진동의 평가”
- (6) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Elsevier Academic Press, London.
- (7) Bruggers, W. B., 2002, Comfort Related Design of Railway Bridge, Delft University of Technology.
- (8) 이일근 등, 2003, “교량의 진동 사용성 평가” 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 553~558.