한국소음진동공학회논문집 제 17 권 제 10 호, pp. 923~935, 2007.

교량구조물의 진동 사용성 분석#

Evaluation of Comfort Limit on Bridge Vibration

전 법 규* · 김 남 식†

Bub-Gyu Jeon and Nam-Sik Kim

(2007년 5월 30일 접수 ; 2007년 9월 4일 심사완료)

Key Words · Comfort Limit(사용성한계), 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 불쾌감을 느끼게 할 수 있다.

현재 도로교설계기준(2005)[1]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)[2]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 & Meister[3]로서, 주파수 성분에 대한 인체실험을 통하여 frequency-dependent한 허용곡선을 제시하였고, Zeller(1956)는 최초로 frequency-dependent한 진동 사용성 기준을 제안하였다. Dieckmann(1958)[4]은 진동 사용성에 미치는 가장 큰 인자가 주파수라는 것을 입증하였으며, 독일의 DIN 4150(1999)에서는 frequency-dependent한 기준에

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

이 논문은 2007 춘계 소음진동학술대회 우수논문으로 추천되었음.

의존하는 진동 사용성 기준을 사용하고 있다. Time-dependent한 기준은 BS 6841(1987)[5]에서 처음 제시되어 ISO 2631(1997)[6]과 함께 RMS (root mean square)값을 진동 사용성 평가 수단으로 사용하고 있으며, 우리나라에서도 진동이 인체에 미치는 영향에 관한 연구[7]가 1990년대부터 진행되어, ISO 2631의 내용이 KS B0710(2001)[8]에 도입되었다. EERI(European rail research institute) D190(1995)에서는 VDV(vibration dose value)와 개념적으로 유사한 진동 사용성 기준을 적용하고 있다.

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

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, 5~70 Hz 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, 2~7 Hz 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.

주파수성분에 따른 진동 사용성 기준들의 크기를 비교하기 위하여, 이 논문에서는 진동신호를 조화운동(harmonic motion)으로 가정하여 각각의 기준들을 정량적으로 비교하였다.

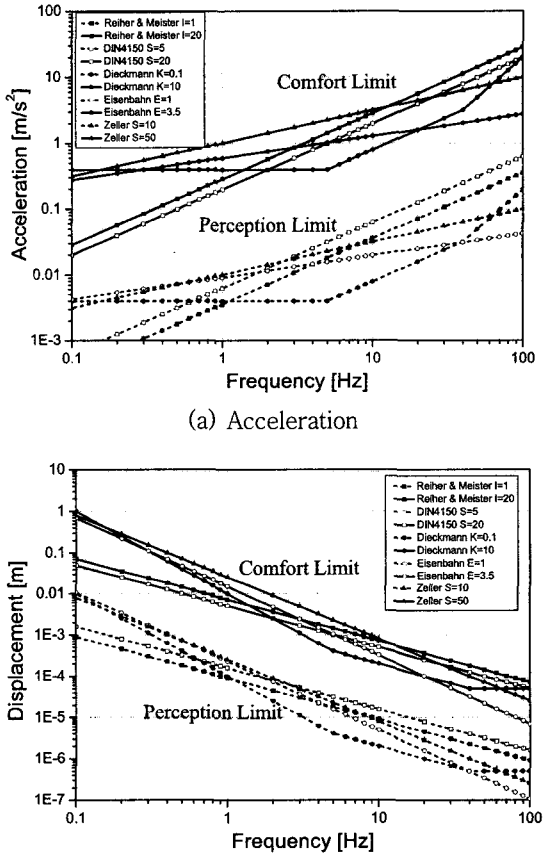
주파수성분에 따른 진동 사용성 기준들의 비교는 다음의 Fig. 1(a), Fig. 1(b)와 같다. 그림에서 보이고 있는 진동 사용성기준은 인체가 불쾌감을 느끼기 시작하는 사용성한계(comfort limit)와 인체가 진동을 감지하는 기준(perception limit)으로 구분하여 정의하였다.

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 m/s^2과 비교한다면, 구조물의 일반적인 고유진동수 범위에서 Fig. 1(a)로부터 얻어진 평균 가속도 크기와 유사함을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 변위성분에 대

Table 1 Frequency-dependent comfort limit

Criteria	Comfort limit	Remarks
Reiher & Meister (1935) $I=10\cdot\log\frac{v}{v_0}$, $I=5.4\cdot\log\frac{\delta}{\delta_0}$ $v_0=0.45mm/s$	20	Result of human-body vibration test Low frequency vibration → velocity High frequency vibration → displacement
Zeller (1956) $S=10\cdot\log\frac{x}{x_s}$ $x=(4\pi^2)^2a^2\cdot f^2$, $x_s=0.1cm^2/s^7$	50	Propose the frequency-dependent acceleration limit
Eisenbahn (1958) $E=3.1\cdot\sqrt[10]{X^3f^5}$	3.5	Application of short time exposure
DIN 4150 (1951) $S=10\cdot\log\frac{v}{v_s}$, $v_s=0.0314cm/s$	20	Modify the Reiher & Meister vibration comfort limit
Dieckmann (1957) $K=Xf^2$ $0.5Hz\le f<5Hz$ $K=5Xf$ $5Hz\le f<40Hz$ $K=200X$ $40Hz\le f<100Hz$	10	Consideration to vertical vibration frequency Sensitive to 2~7 Hz
DIN 4150 (1999)· $K=\frac{0.005Xf^2}{100+f^2}$, $X=1\times10^{-6}m$	1.6	Small vibration on structures

한 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.



(a) Acceleration

(b) Displacement

Fig. 1 Frequency-dependent comfort limit(in harmonic motion)

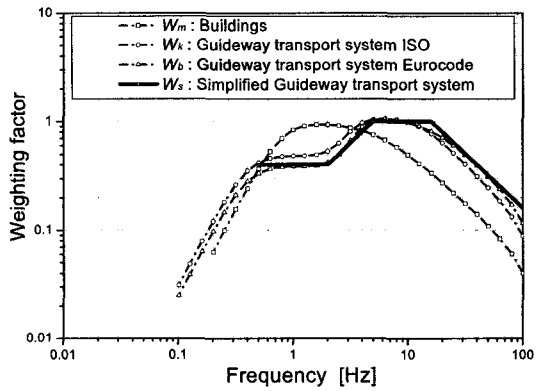


Fig. 2 Frequency weighting filter

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 5~16 Hz 사이에서 인체에 가장 영향을 크게 주며 이외의 구간에서는 상대적으로 가중치가 감소하는 것을 의미한다.

1975년 ISO에 의해서 처음으로 채택된 FWF는 현재 BS 6841, ISO 2631, DIN 8041 등에서 진동 사용성 평가에 적용하도록 규정하고 있다. 이 논문에서 적용하고자 하는 FWF는 Fig. 2의 Ws이며 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} &0.5\text{Hz} < f < 2.0\text{Hz},\ W(f) = 0.4 \\ &2.0\text{Hz} < f < 5.0\text{Hz},\ W(f) = f/5.0 \\ &5.0\text{Hz} < f < 16.0\text{Hz},\ W(f) = 1.00 \\ &16.0\text{Hz} < f < 80.0\text{Hz},\ W(f) = 16.0/f \end{aligned} \tag{1}$$

예를 들면, 교량구조물에서 계측된 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.

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

2.2 진동지속시간에 따른 진동 사용성 기준 분석

일반적으로 구조물에서 계측된 진동 가속도신호의 크기는 최대값(peak value)으로 정의할 수 있다. 그러나 진동신호가 복잡한 경우에는 최대값이 그 진동신호를 대표하기에 부적절함으로 평균의 개념인 RMS값으로 대신한다. 식 (3)은 FWF가 적용된 가속도신호 $a_w(t)$에 대한 RMS값을 나타내고 있다. RMS값은 일반적으로 진동 사용성을 평가하기에 적절한 대표값으로 증명되어 있다. 그러나 Griffin, M. J[9]는 진동신호의 변동성이 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.

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

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 m/s^2이다.

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

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 사용함으로서 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 $m/s^{1.75}$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. Table 2는 진동지속시간이 고려된 진동 사용성 기준을 정리한 것이다.

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

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

BS 6841(1987)과 ISO 2631(1997)에서는 진동 사용성 평가를 위하여 RMS값을 사용하고 있으며, 사용성한계로 $0.8\,m/s^2$을 정의하고 있다. 또한 EERI 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

Table 2 Time-dependent comfort limit

Criteria	Comfort limit	Remarks
BS 6841 (1987) & ISO 2631 (1997) $a_{rms,w} = \sqrt[2]{\frac{1}{T}\int a_w^2(t)dt}$	0.8	In cases of variable time duration signal, transient signal and occasional shocks would be inappropriate Used frequency weighting filter (Wb) Crestfactor $\frac{Peak value}{Weighted\ RMS\ value} < 9$
DIN V ENV 12299(2001) $a_{95} = 95^{th} percentile\ of\ a_{rms,w}$	4	For small vibrations
ERRI D190 (1995) $LI_h = 107.77\sqrt[3]{\int_0^T \lvert a_w(t)\rvert^3 dt}$	45	10% uncomfortable
Root mean quad (RMQ) $a_{rmq,w} = \sqrt[4]{\frac{1}{T}\int a_w^4(t)dt}$		Crestfactor $\frac{Peak value}{Weighted\ RMS\ value} > 9$
Vibration dose value $VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t)dt}$		Used by the BS and ISO

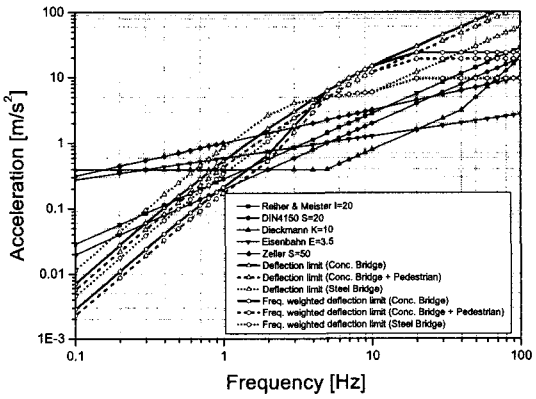
앞 장에서 정리한 진동 사용성 기준을 교량구조물을 대상으로 타당성을 검증하기 위하여, 현재 국내에서 적용되고 있는 도로교설계기준(2005) 및 철도교설계기준(2004)의 허용처짐 규정을 이용하였다. 실제 교량구조물의 차량에 의한 진동신호는 비교적 불규칙하며, 또한 설계기준에서 제시한 허용처짐값은 진동 사용성 평가와 직접적인 연관은 작은 것으로 판단된다. 그러나 교량구조물에 대한 진동 사용성 기준이 미흡한 국내실정에서 진동 사용성 기준(안)을 제시하기 위한 선행연구가 필요하며, 이러한 목적으로 국내 교량설계기준에서 정의된 허용처짐값을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

3.1 도로교 진동 사용성 허용기준 분석

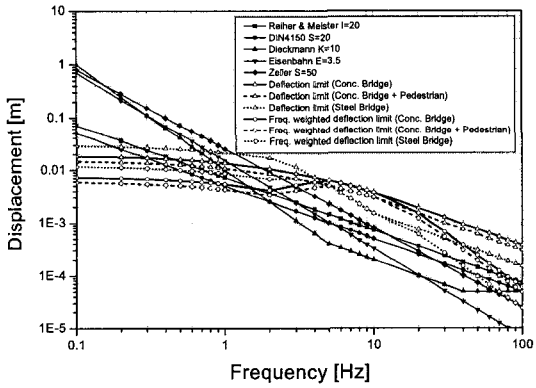
Table 3은 국내 도로교설계기준(2005)에서 제시된 허용처짐값을 기준으로 인체진동영향을 고려한 동적 최대변위(frequency weighted dynamic displacement)의 계산절차를 정리한 것이다. 여기서 고유진동수는 교량의 경간 길이로부터 근사적으로 얻었으며, 진동 사용성 평가를 위한 동적변위는 허용처짐값에 충격계수를 곱해서 구하였다. 최종적으로 인체진동영향을 고려한 동적 최대변위는 얻어진 동적변위에 FWF를 곱하여 얻을 수 있다.

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

도로교설계기준으로부터 얻어진 가속도성분을 비교하면, 교량구조물의 일반적인 고유진동수범위인 1~10 Hz 구간에서 전반적으로 진동 사용성 기준보



(a) Acceleration



(b) Displacement

Fig. 3 Comparison of frequency-dependent comfort limit with Korea Highway Bridge Design Specifications(2005)

Table 3 Allowable displacement limit[(1)] and frequency weighted dynamic displacement

	Concrete bridge		Steel bridge
Allowable displacement limit	Single or continuous bridge $\delta_{\max} = L/800$	Urban bridge with pedestrian $\delta_{\max} = L/1000$	Simple or continuous girder $\delta_{\max} = L/2000,\ L \le 10m$ $\delta_{\max} = L/(\frac{20000}{L}),\ 10m < L \le 40m$ $\delta_{\max} = L/500,\ L > 40m$
Impact factor	$I = \frac{15}{40+L} \le 0.3$		
Natural frequency	$f(Hz) \approx \frac{100}{L}$		
Dynamic displacement	$\delta_{dynamic} = \delta_{\max} \times I$		
Frequency weighted dynamic displacement	$\delta_{dynamic,w} = \delta_{dynamic} \times W_b$		

Table 4 Allowable maximum displacement limit of Korea Railway Bridge Design Specifications(2004)

Velocity \ Span length	$0 < L < 50m$	$L \geq 50m$
$V \leq 120km/h$	$\delta_{max} = L/800$	$\delta_{max} = L/700$
$120km/h < V \leq 150km/h$	$\delta_{max} = L/1100$	$\delta_{max} = L/900$
$150km/h < V \leq 200km/h$	$\delta_{max} = L/1600$	
High-speed railway(france)	$\delta_{max} = L/1700$	

다 큰 값이 얻어짐을 Fig. 3(a)에서 알 수 있다. 이것은 도로교설계기준의 허용처짐값으로부터 유추한 허용 가속도값이 사용성한계을 초과하는 것으로 볼 수 있다. 특히 교량구조물의 고유진동수가 증가함에 따라서 진동 사용성이 불리해지는 경향을 보이고 있다.

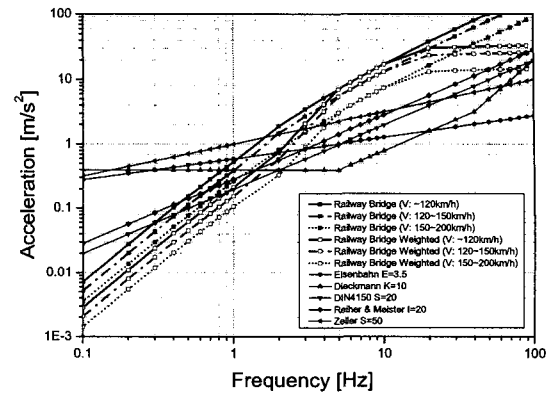
Fig. 3(b)에서는 도로교설계기준으로부터 얻어진 허용처짐값의 동적변위성분을 진동 사용성 기준과 비교하였다. 변위성분 또한, 사용성한계를 초과하는 결과를 나타내고 있다.

3.2 철도교 진동 사용성 허용기준 분석

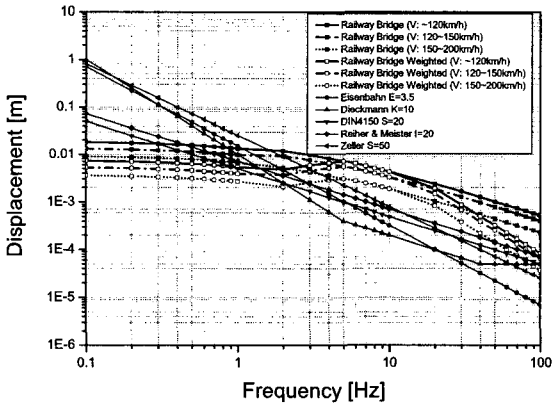
현재 철도교설계기준(2004)에서 적용하고 있는 허용처짐값을 정리하면 Table 4와 같다. 도로교설계기준(2005)과의 차이점은 열차의 주행속도에 따라서 허용처짐 규정을 구분하였다. 이것은 열차의 통과속도(V)와 교량의 경간길이(L)에 의해서 결정되는 진동지속시간을 부분적으로 고려하여 진동 사용성을 규정하고자 하는 의미를 포함하고 있다. 또한 열차의 주행속도가 증가함에 따라서 열차주행의 안정성을 높이며 공진의 가능성을 배제하기 위하여 더욱 엄격한 허용처짐기준을 적용하고 있다.

Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 frequency-dependent한 진동 사용성기준과 철도교설계기준의 허용처짐값을 기준으로 계산한 허용 가속도성분, 속도성분, 변위성분을 비교한 것이다. 3.1항의 도로교설계기준을 적용한 경우와 마찬가지로 진동신호가 조화운동을 하는 것으로 가정한 상태에서, 허용처짐값의 동적 가속도성분, 변위성분을 계산한 것이다.

가속도성분을 진동 사용성기준과 비교하면, 교량구조물의 고유진동수가 5~20 Hz 구간에서 사용성한계를 초과하고 있다. 특히 열차속도가 느린 경우에 사용성한계와 차이가 더욱 크게 발생하는 것을



(a) Acceleration



(b) Displacement

Fig. 4 Comparison of frequency-dependent comfort limit with Korea Railway Bridge Design Specifications(2004)

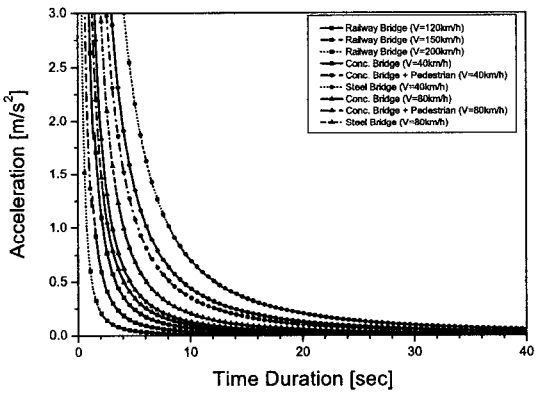
Fig. 4(a)에서 알 수 있다. 따라서 진동 사용성 평가를 위한 중요한 인자로서 진동지속시간을 고려하여야 하며, 사용성한계와 강성한계(stiffness limit) 사이의 연관성을 구체적으로 규명할 필요가 있다. Fig. 4(b)의 동적 허용 변위성분에 대한 비교에서도 교량구조물의 고유진동수가 5 Hz 이상에서 사용성한계를 초과하고 있다. 그러나 고유진동수가 낮은 구간에서는 오히려 엄격한 강성한계가 적용되고 있는 것으로 판단된다.

4. 교량구조물의 진동 사용성 평가기준(안) 제안

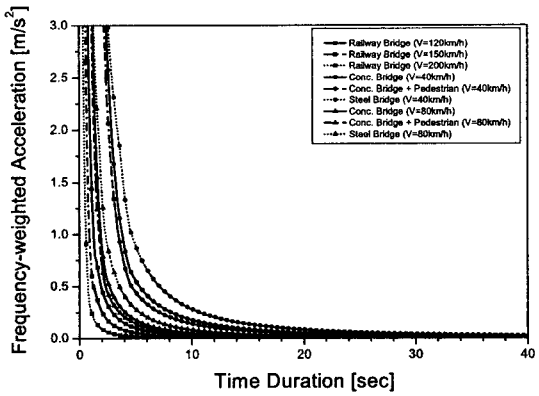
3장에서 분석한 바와 같이, 국내 도로교설계기준과 철도교설계기준에서 제시한 허용처짐값을 기준으로 진동 사용성을 분석하였다. 이것은 진동 사용성

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.

차량이나 열차의 통행속도와 교량의 경간 길이에 따라 얻어지는 진동지속시간에 따른 동적 허용 가속도성분은 Fig. 5(a), Fig. 5(b)와 같다. 여기서 교량설계기준의 허용처짐값을 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. 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.



(a) Maximum acceleration



(b) Weighted maximum acceleration

Fig. 5 Allowable acceleration limit considering vibration time duration on conventional bridge design specifications

이 논문에서는 교량구조물의 진동 사용성을 평가하기 위한 기준(안)으로서 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.

Fig. 6과 같이 Bruggers, W. B[10]는 진동지속시간(2~32초 구간)이 증가함에 따라서 점진적으로 감소하는 가속도 기준(안)을 제시하였다. 만약 진동가속도 신호가 조화운동이라고 가정한다면, VDV와 RMS값의 상관관계는 식(7)과 같이 $\sqrt[4]{T}$에 의해서 결정될 수 있다.

사용성한계는 BS 6841과 ISO 2631에서 제시하고 있는 RMS값 0.8 m/s^{2}로 정의 하였으며, 약간 불

Table 5 Comfort limit(ISO 2631)

Vibration value / Comfort level	RMS(m/s^2)	RMQ(m/s^2)
Comfortable	0.8	0.89
A little uncomfortable	0.4	0.44

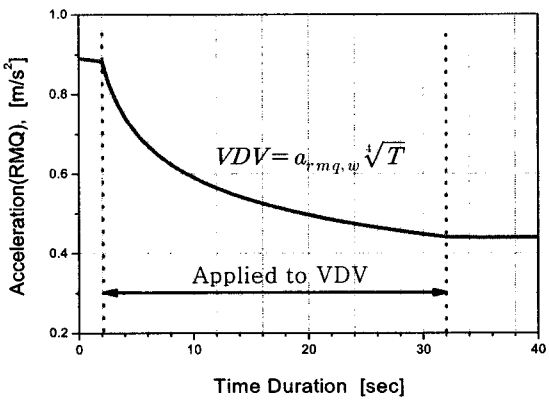


Fig. 6 Time-dependent comfort limit on bridge structures

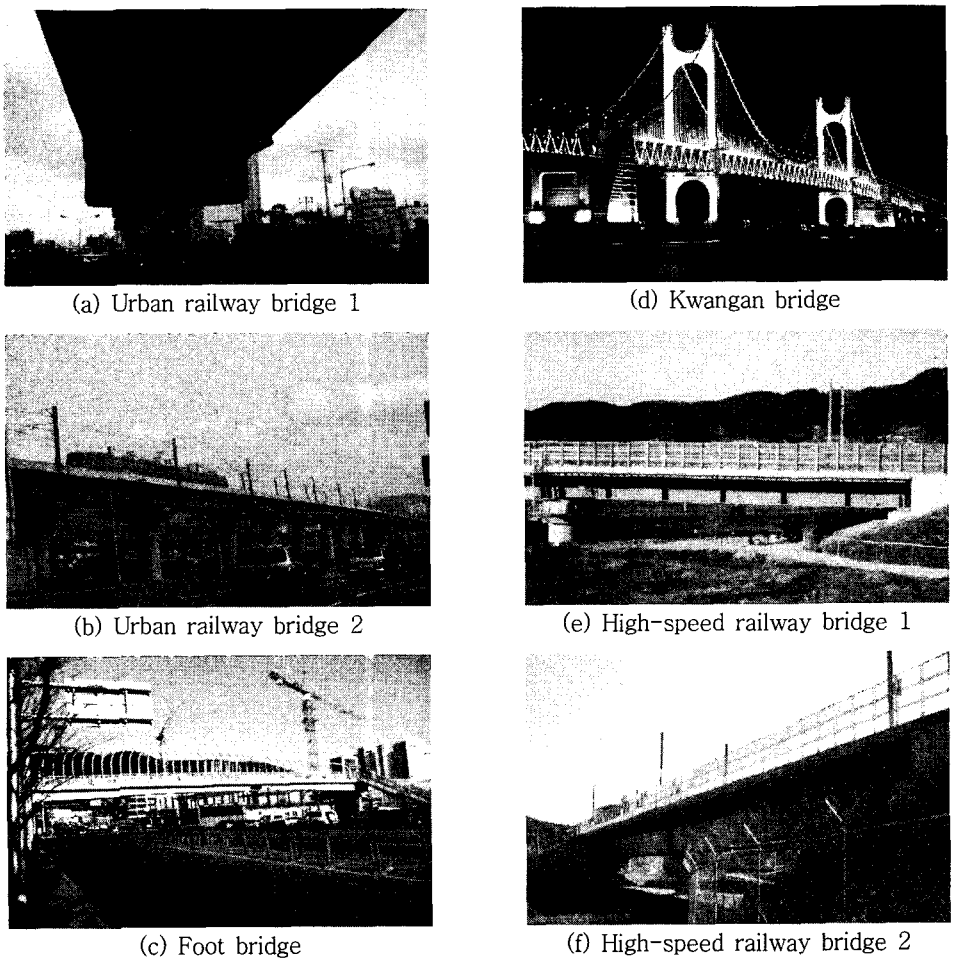
편한 정도를 0.4 m/s^{2}로 정의하고 있다. 사용성한계인 RMS값 0.8 m/s^{2}을 식(7)을 사용하여 VDV로 환산하면 1.05 m/s$^{1.75}$이다. 이 논문에서 제시할 진동지속시간을 고려한 교량구조물의 진동 사용성 기준의 범위는 Table 5와 같다. 사용성한계의 VDV는 1.05 m/s$^{1.75}$를 식(7)에 대입하여 2~32초 구간에 해당하는 값을 구하였고, 상하한값은 Table 5의 RMQ값으로 하였다. 이를 그래프로 나타낸 것이 Fig. 6이다.

5. 실교량 진동 사용성 평가

5.1 실교량 진동신호 측정

교량의 진동 사용성 평가를 위해 현재 공용 중인 대상교량(도로교, 도시철도교, 보도교, 고속철도교)을 선정하여 가속도신호를 측정 하였다. 다음의 Fig. 7은 대표적인 대상 교량을 나타내고 있다.

교량의 진동은 차량 통행 시 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 100 Hz로 하여 측정하였으며, 고속철도교량은 1,000 Hz로 측정하였다. 이를 제외한 모든 대상교량은 400 Hz로 측정하였다. 대상은 도로교를 제외하고, 진동이 심하게 발생한다고 추정되는 교량을 임의로 선정하여 각각 수회의 진동측정을 실행 하였으며, 광안대교의 경우 중차량(트레일러 및 화물차량)통행량이 많은 오후 3~6시 사이



(a) Urban railway bridge 1 (d) Kwangan bridge

(b) Urban railway bridge 2 (e) High-speed railway bridge 1

(c) Foot bridge (f) High-speed railway bridge 2

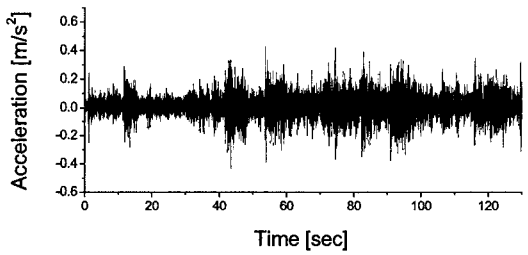
Fig. 7 Measurement bridge

에 측정하였다. 도시철도교량은 부산지하철 1, 3호선의 강박스 교량 두 곳을 대상으로 하였고, 보도교는 부산 해운대에 위치한 경간이 긴 육교를 선정하여 측정하였으며, 고속철도교량은 포항산업과학연구원(RIST) 토목구조연구실로부터 측정 자료를 지원받아 분석하였다. Table 6은 진동측정 대상 교량의 대략적인 개요이다.

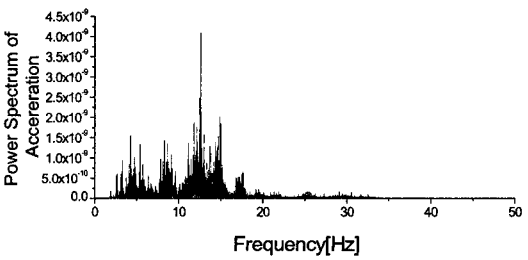
Fig. 8에서 Fig. 13까지는 각 대상교량의 가속도신호 중 최대값이 얻어진 측정신호이다. Fig. 8은 광안대교의 경우로, 통행차량 교량의 설계하중에 비하여

Table 6 Bridge structures description

Name	Location	Span length(m)	Measuring point	Structure type
Kwangan bridge	Busan Kwanganli	500	Midspan	Suspension bridge
Urban railway bridge 1	Busan subway Onchunjang ↔ Pusan National Univ.	34.16	Midspan	Steel box
Urban railway bridge 2	Busan subway Sport park ↔ Gangseo-gu office	50	Midspan	3rd continuous steel box
Foot bridge	Busan Haeundea	(≒)26	Midspan	Steel girder
High-speed railway bridge 1	Gyeongbu line Daejeon→ Kimchun at 174km E-won Bridge	40	Midspan	Preflex beam
High-speed railway bridge 2	Gyeongbu line Daejeon→ Kimchun at 177 km Ji-tan Bridge	50	Midspan	2nd continuous preflex beam

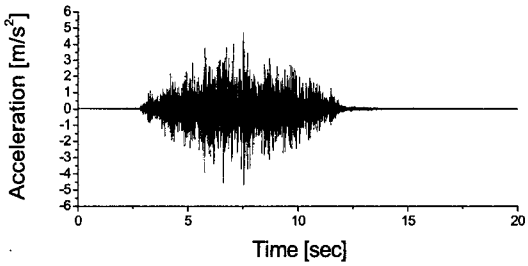


(a) Measured time history

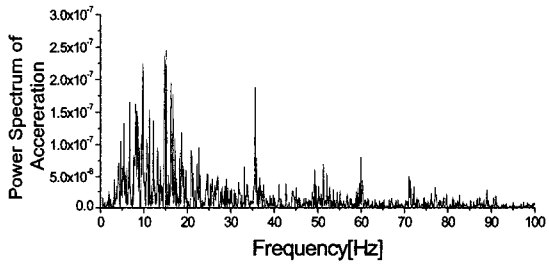


(b) Weighted power spectrum

Fig. 8 Kwangan bridge

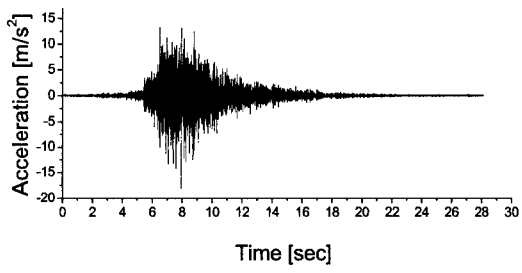


(a) Measured time history

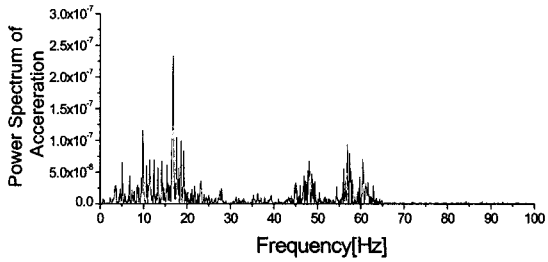


(b) Weighted power spectrum

Fig. 9 Urban railway bridge 1

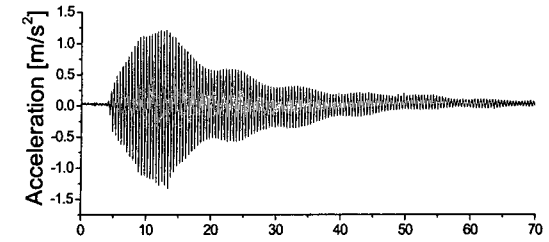


(a) Measured time history

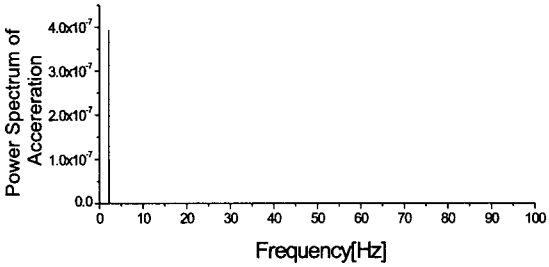


(b) Weighted power spectrum

Fig. 10 Urban railway bridge 2

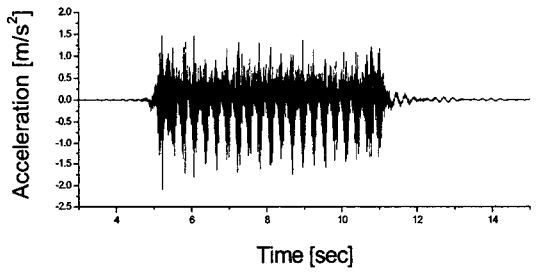


(a) Measured time history

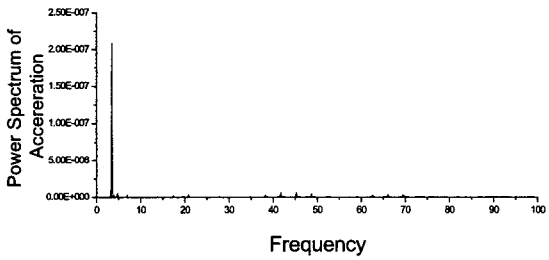


(b) Weighted power spectrum

Fig. 11 Foot bridge



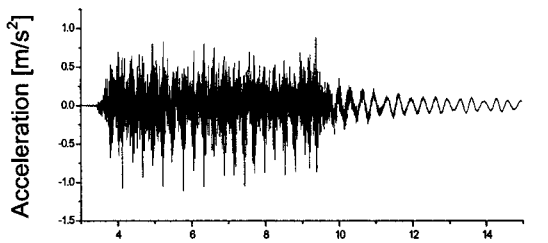
(a) Measured time history



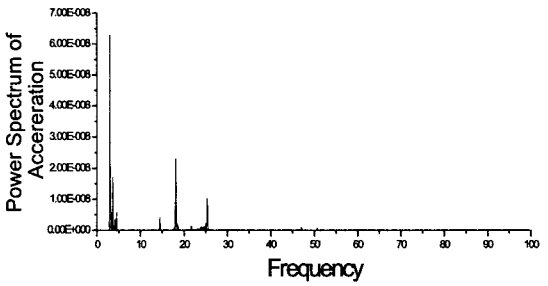
(b) Weighted power spectrum

Fig. 12 High-speed railway bridge 1

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[11]. 광안대교의 측정신호는 통행하중에 의해서 나타나는 진동특성은 관찰되지 않았다.



(a) Measured time history



(b) Weighted power spectrum

Fig. 13 High-speed railway bridge 2

도시철도교량 1, 2의 측정된 가속도 값은 다음의 Fig. 9~10이다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 지하철 교량 2에서 대상교량 중 가속도신호 크기가 가장 큰 진동특성을 보이고 있다.

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.

우리나라 고속철도교량의 동적 성능 기준에서 허용 최대연직가속도는 0.35 g으로 약 3.43 m/s^{2}이다. 고속철도교량 1, 2의 최대가속도는 모두 허용 최대연직가속도를 만족하고 있으며, 기준값의 약 40~70 %사이에 분포하고 있으며 도시철도교량에 비하여 최대연직가속도가 상당히 낮다[12].

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

Table 7 Frequency weighted dynamic displacement

Items \ Bridges	Kwangan bridge	Urban railway bridge 1	Urban railway bridge 2	Foot Bridge	High-speed railway bridge 1	High-speed railway bridge 2
Natural frequency[Hz]	0.2	2.9	2	3.8	4.0	3.08
Impact factor	0.028	0.2	0.17	0.23	0.1875	0.1667
Weighting factor	0	0.58	0.4	0.76	0.8	0.616
Maximum acceleration [m/s^2]	0.6	5.25	15.8	0.64	2.1	1.1
Maximum displacement [mm]	380	16	100	10	3.3	2.9
Dynamic displacement [mm]	11	32	17	0.26	0.62	0.48
Frequency weighted dynamic displacement [mm]	0	1.8	6.8	0.19	0.5	0.29

Table 8 Weighted vibration value

Vibration value \ Bridge	Kwangan bridge	Urban railway bridge 1	Urban railway bridge 2	Foot bridge	High-speed railway bridge 1	High-speed railway bridge 2
WRMS (m/s^2)	0.0666	0.2606	0.5173	0.1363	0.0867	0.0535
WRMQ (m/s^2)	0.1003	0.4820	1.1990	0.2192	0.1404	0.0803
WVDV (m/s$^{1.75}$)	0.3590	1.2194	4.2896	0.9328	0.2825	0.1616
WVDV (m/s^2)	0.104	0.577	1.864	0.322	0.1413	0.0808
Crest factor	7.6	15.62	25.69	0.95	12.8	39

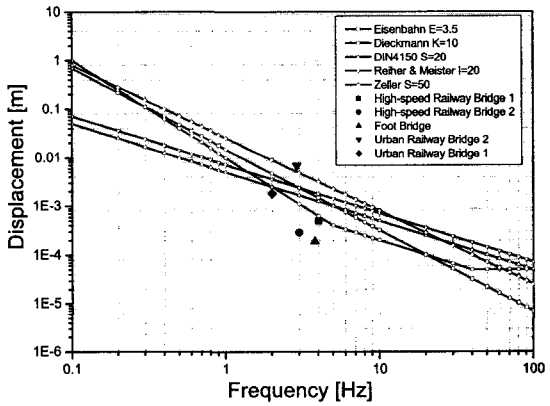


Fig. 14 Comparison of frequency-dependent comfort limit with frequency weighted dynamic displacement

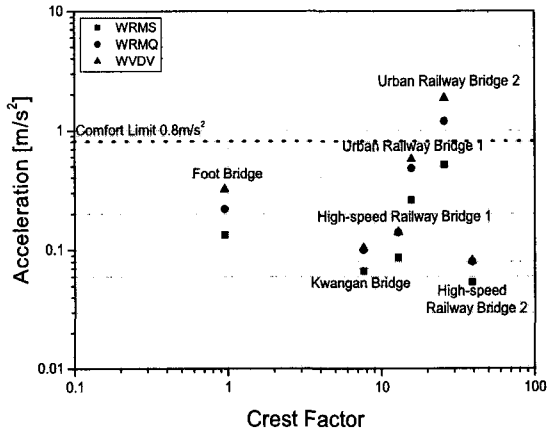


Fig. 15 Comparison of comfort limit(ISO 2631) with weighted vibration value

5.2 진동신호 분석 결과

최대 가속도값이 얻어진 측정데이터를 Table 7과 같이 정리하여 기존의 frequency-dependent한 기준들과 비교하여 보았다. 고속철도교량 1, 2를 제외한 교량은 측정 시 최대 가속도값에 초점을 맞추어 고유진동수를 포착하는 것이 곤란하여 Table 3의 간단한 고유진동수 계산식을 사용하여 구해진 고유진동수를 사용하였다. 충격계수 및 동적최대변위, 인체진동을 고려한 동적최대변위 또한, Table 3을 이용하여 계산하였다. 인체진동영향을 고려한 동적최대변위와 frequency-dependent한 기준을 비교하였을 경우, 도시철도교량 2는 모든 기준을 초과하고 있음이 Fig. 14에 나타나 있다.

Crest factor가 9 이하인 작은 진동수준에 대해서

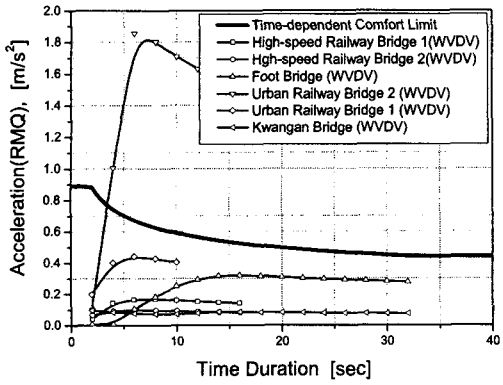


Fig. 16 Time-dependent comfort limit and WVDV

는 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. ISO 2631에서 제시하고 있는 진동사용성 평가기준인 0.8 m/s^2에 대해 crest factor를 고려하여 각각 RMS및 RMQ값을 사용하여 비교 하였을 때, 도시철도교량 2의 경우 0.482 m/s^2(RMQ)로 진동사용성한계를 초과한 값을 나타내고 있음을 Table 8과 Fig. 15를 통해서 알 수 있다.

4장에서 제시한 time-dependent한 사용성한계의 타당성을 검증하기 위하여 식(8)을 통해 VDV의 단위를 m/s^2으로 변환하여 Fig. 16과 같이 각 대상교량의 가장 큰 VDV를 가지는 자료를 사용하여 진동지속시간에 따른 WVDV(weighted vibration dose value)와 사용성한계를 비교하였다. 여기서 T는 진동지속시간을 의미한다.

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

도시철도교량 2의 경우 비교적 짧은 진동지속시간에서 진동 사용성 기준을 초과하였고 타 교량은 진동사용성한계를 만족하여 frequency-dependent한 진동사용성기준 및 ISO 2631의 진동사용성한계와 교량의 진동대표값과의 비교와 같은 결과가 확인되었다. 이 연구에서 제시하는 진동 사용성 평가 기준은 진동지속시간의 변화에 따라 변화하는 평가기준이며, VDV 또한 진동지속시간에 따라 유동적이므로 진동 지속시간을 고려해야할 대상에 대하여 상당히 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 논문에서 제시한 진동지속시간에 따른 진동사용성 평가 기준은 4제곱근으로 RMS에 비하여 최대값이 잘 반영되며, 하나의 대표값으로서 진동지속시간에 따른 평가가 불가한 RMS및 RMQ와는 달리 진동지속시간에 따라 유동적인 기준으로 진동지속시간을 고려해야 할 대상에 대하여 상당히 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

공용중인 교량을 대상으로 한 진동사용성 평가에서 도시철도 강교량의 경우에 진동사용성을 만족하지 못하는 경우가 확인됨에 따라, 차후 도시철도 강교량에 대한 진동사용성 연구를 진행하고자 하며, 교량-차량 상호작용해석을 통한 진동사용성 평가로 진동사용성을 만족하는 설계방법과 허용처짐기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심기술C02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었다. 포항산업과학연구원(RIST) 토목구조연구실 이정휘 박사님의 계측자료 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Korea Road and Transportation Association, 2005, Korea Highway Bridge Design Specifications, Ministry of Construction and Transportation.

(2) Korea Rail Network Authority, 2004, Korea Railway Bridge Design Specifications, Ministry of Construction and Transportation.

(3) Reiher, H. and Meister, F. J., 1931, "Human Sensitivity to Vibrations", Forsch. auf dem Geb. des Ingen, Vol. 2, No. 11, pp. 381~386.

(4) Dieckmann, D., 1958, "A Study of the Influence of Vibrations on Man", Ergonomics, Vol. 1, No. 4, pp. 347~355.

(5) British Standard Institution, 1987, BS6841

British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Expose to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock.

(6) ISO, 1997, ISO 2631 Mechanical Vibration and Shock-evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration.

(7) Lee, S.-T., 1992, "Effect of Human Response to Vibration", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 253~258.

(8) Korean Standards Association, 2001, KS B 0710 Mechanical Vibration and Shock-evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration.

(9) Griffin, M. J., 1990, Handbook of Human Vibration, Elsevier Academic Press, London, England.

(10) Bruggers, W. B., 2002, "Comfort Related Design of Railway Bridge", Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

(11) Lee, I.-K., Ahn, S.-S. and Park, M.-S., 2003, "Assessment of Dynamic Serviceability of Bridge", Proceedings of the KSCE Annual Conference. pp. 553~558.

(12) Lee, J.-W., Kim, S.-I. and Kwark, J.-W., 2007, "Dynamic Characteristics of High-speed Railway Steel Bridges", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 7, pp. 632~637.