실험적 방법에 의한 콘크리트 사장교의 보행자 중심 진동사용성 평가

Vibration Serviceability Evaluation for Pedestrian of Concrete Cable-stayed Bridge by Experimental Method

강성후* · 최봉현** · 박선준***

Kang, Sung Hoo · Choi, Bong Hyun · Park, Sun Joon

Abstract

In this study, the vibration serviceability of pedestrian by travelling vehicles on the cable-stayed bridge with concrete tower was studied. Experiment variables were considered travelling speed of vehicles, pavement state of asphalt on the deck and weight of vehicles, preferentially. Especially, pavement grade states were considered by A and C grades by BMS (Bridge Management System) standard. The incremental ratio extent of vibration acceleration responses, asphalt pavement grade C over A, was construed to 1.23~1.43. Only, these results are valid within extent of the Scaled-Weight 228.0~1161.9 km/h·kN. The vibration equations for acceleration responses prediction of bridge deck were proposed into three types, reliability 50%, 90%, 95% respectively. These equations can consider asphalt pavement grade, and the vehicle's weight and travelling velocity, which are the source of vibration, are combined into the term called, 'Scaled Weight'.

Key words : Vibration serviceability, Acceleration response, Bridge, Vibration equations

요 지

본 연구에서는 콘크리트 사장교를 대상으로 차량주행속도와 교면아스팔트의 포장 상태, 차량중량 등을 실험변수로 하여 차량이 교량을 주행할 때 교면(보도)진동이 보행자에게 미치는 진동사용성 평가 방법에 대해 연구하고 그 결과로부터 진동사용성 여부를 평가하였다. 특히, 실험변수 가운데 교면포장 상태를 BMS기준에 의해 A와 C등급으로 구분하였다. 여기에는 진동을 발생시키는 에너지를 "환산중량"으로 정의하고 차량주행 속도와 차량중량의 지승근을 곱한 형태로 사용하였다. 환산중량 228.0~1161.9 km/h·kN 범위 내의 동일한 실험 조건에서 얻어진 교면포장 상태 A등급의 경우에 대한 C등급 경우의 진동가속도 응답 비율은 1.23~1.43으로 분석되어 교면포장 상태가 진동가속도 응답을 결정짓는데 큰 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있었다. 연구대상 교량의 교면 진동가속도 응답을 추정할 수 있는 진동추정식을 신뢰도 50%, 90%, 95%로 구분하여 제시하였으며, 실험 교량에서 교면 포장 A등급과 C등급의 경우 각각 전체응답의 30%, 40%가 레벨 C(강하게 감지)범위, 70%, 60%가 레벨 D(명확하게 감지) 범위에 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 진동사용성, 가속도 응답, 교량, 진동추정식

1. 서 론

최근 소비자의 요구는 경제수준과 맞물려 보다 까다로워지고 서비스의 만족에 대한 기대수준 또한 높아지고 있다. 사회기반시설물인 교량의 경우에도 서비스의 관점에서 본다면 이를 이용하는 일반인은 소비자의 개념으로도 접근할 수 있다. 교량구조물에 대한 서비스 수준 또한 안전이라는 1차적인 만족요구 수준을 이미 넘어서 사용성 측면까지 높은 만족도의 서비스 수준을 요구하고 있는 것이 현실이다. 최근 건

설되는 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 발생할 가능성이 있다.

인체 진동영향에 대해서 Reiher & Meister는 1935년 주파수 성분에 대한 인체실험을 통하여 주파수에 의존하는 허용곡선을 제시하였다. 1956년 Zeller는 최초로 주파수에 의존하는 진동 사용성 기준을 제안하였고, 1958년 Dieckmann은

*정회원 · 동신대학교 토목공학과 교수 (E-mail : shkang@dsu.ac.kr)

**동신대학교 대학원 토목공학과 박사과정

***정회원 · 동신대학교 토목공학과 부교수 (교신저자)

진동 사용성에 미치는 가장 큰 인자가 주파수라는 것을 입증하였다(안상섭 등, 2003).

국제표준기구는 1974년 진동이 인체에 미치는 영향을 객관화하기 위해 진동과 관련한 여러 요소들을 모아 ISO2631을 발표하였다(박연수 등, 2006). 이 기준은 진동의 주파수, 가속도, 방향 등을 체계적으로 정리하여, 관련 기기와 자동차 등의 제작에 활용하도록 하기 위한 것이다. 우리나라에서도 1990년대부터 진동이 인체에 미치는 영향에 관한 연구가 진행되었다. 이상태(1992)는 ‘진동이 인체에 미치는 영향’에 대한 연구를 통해 진동주파수와 진동축, 그리고 진동의 지속 시간에 대해 인체가 어떠한 반응이 나타나는지에 대한 결과를 얻었다. 한국건설기술연구원(2000년)에서는 교량의 진동·처짐에 대한 사용성 측면에서의 평가절차 수립에 대한 연구를 수행하였다. 김진기 등(2001)은 ‘국내의 철도 차량의 진동에 대한 인체 영향 조사’에 대한 논문에서 국내의 철도차량에서 측정된 전신 진동 노출량을 이용, 진동이 건강에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 제시하였다. 안상섭 등(2003)은 교량의 진동 사용성 평가를 실시하여 교량의 진동을 평가하는 방법과 타당한 진동 사용성 기준을 제시하였다. 또한 성경기 등(2007)은 ‘보도교 진동사용성 기준검토 및 TMD 적용성’이라는 학술기사에서 진동사용성 검토의 문제점, 기준적용 방법, 진동사용성을 향상시키기 위한 능동적인 방법을 정리하고 소개하였다.

그러나 이제까지의 논문은 주로 해석적인 방법에 의해 이루어진 것으로서 직접 차량 주행실험으로부터 보행자의 인체진동을 연구한 사례는 찾기 어려웠다. 차량진동인 경우에도 주로 현가장치를 통과한 진동에 대한 차량의 승차감만을 평가하기 위한 연구에 무게를 두고 이루어졌다.

본 연구에서는 콘크리트 주탑을 갖는 비대칭 사장교를 대상으로 교량 위를 주행하는 차량하중으로 인해 교면(보도)에 발생하는 진동가속도 응답의 측정과 진동가속도 응답 추정식을 제안하고, 그로부터 보행자에게 미치는 진동영향을 평가하는데 목적이 있다. 본 연구에서 교량의 진동사용성이라 함은 보행자가 느끼는 진동영향에 대한 교량의 사용성을 의미한다.

2. 문헌 연구 및 이론적 고찰

2.1 진동감각 허용곡선

기존의 연구에서 진동 감각에 대한 가장 대표적인 것으로는 그림 1에 제시된 Reiher-Meister의 허용곡선을 들 수 있다. 이 기준은 열차 승객들이 느끼는 진동수준을 평가하기 위한 목적으로 피실험자가 느끼는 진동 감각을 파악하여 단계별로 분류한 후 차트로 제시한 것으로 여러 문헌에 인용될 정도로 객관성을 인정받아 왔다. 그림 1의 Reiher-Meister 허용곡선은 피실험자가 느끼는 진동의 수준을 6단계로 구분하고 있는데 분류된 수준은 “매우 불쾌함”에서부터 “진동을 느끼지 못함”까지로 이를 A~F로 정의하고 있다. 또한 이 허용곡선에서는 진동응답은 조화진동의 형태라고 가정하고, 이를 평가하기 위하여 주파수와 변위(Frequency-Displacement)의 관계를 이용하고 있다.

그림 1. Reiher-Meister의 허용곡선

그림 2. 수정된 Reiher-Meister의 허용곡선과 타 기준

위의 그림 1에 근거하여 교량위의 보행자에게 확대 적용시킬 목적으로 차량주행으로 인해 발생하는 교량의 동적변위와 고유진동수를 분석한 후 그림 1의 Reiher-Meister 허용곡선에 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(2003)은 그림 1의 Reiher-Meister 곡선이 조화진동에 대한 감각곡선이라는 점을 고려하여 가속도 값으로 변환한 후 그림 2와 같은 곡선을 제시하였으며, 가속도를 기준으로 교량의 사용성을 평가하는 기준들을 제시된 허용곡선 상에 같이 비교하여 교량구조물의 진동사용성 평가를 위한 가능성을 제시하였다. 비교된 기준들은 헝가리 기준(MSW 15021), Conn에 의해 제시된 기준, Goldman차트 등이다(안상섭 등, 2003).

2.2 환산중량

차량통행에 의해 교면(보도)에 발생하는 진동을 기준으로 보행자의 진동사용성을 평가하기 위해서는 일반화된 형태의 진동가속도 응답 추정식이 필요하다. 이러한 진동가속도 응답 추정식을 제안하기 위해서는 교량의 진동 응답에 영향을 미치는 다양한 변수들을 그 상관정도에 따라 구분하는 과정이 필요하다. 그러나 교량의 강성, 차량중량, 주행속도, 주행위치, 교면포장 상태, 계측위치 등 많은 변수들이 교량의 진동 응답을 결정짓는데 영향을 미치고 있다. 현재 상태에서는 그 변수들의 상관정도와 기여도 정도에 대한 연구가 미흡한 상

황이며, 이들을 모두 고려한다는 것은 무의미하기도 하다.

본 연구에서 차량의 주행 위치와 계측위치는 연구대상 교량의 진동응답 특성을 잘 드러내고, 상대적으로 큰 진동을 발생시킬 수 있는 위치로 결정하였다. 결과적으로 진동가속도 응답에 직접 영향을 미치는 차량중량, 주행속도, 교면포장상태 3가지의 변수를 고려하여 교량상부 구조물의 교면(보도)에서의 진동가속도 응답을 추정할 수 있도록 하였다. 여기에서는 진동을 발생시키는 진동 에너지원인 차량의 중량과 차량의 주행속도를 하나의 항으로 고려하여 “환산중량(SW : Scaled Weight)”이라는 용어로 정의하였다(Park, 2005). 환산중량은 식(1)과 같이 정의된다.

$$SW = V \cdot W^n \quad (1)$$

여기서 SW : 환산중량 (km/h · kN)

V : 주행속도(km/h)

W : 차량중량(kN)

n : 1/2 혹은 1/3

환산중량 SW는 건설진동을 추정하기 위한 기법에서 사용되는 형태이기도 하다. 일반적인 건설진동의 경우 식(1)에서 지수 n을 1/2(자승근), 혹은 1/3(삼승근)을 사용하여 검토하는데 이는 분석 결과를 서로 비교하여 보다 상관정도가 높고 보수적인 진동가속도 응답을 추정하기 위함이다.

3. 진동가속도 응답 측정 실험

3.1 실험개요

본 연구의 대상교량은 총 연장 172.5 m(30.0 m+112.5 m+30.0 m), 교폭은 왕복 6차로의 39 m, 1등급 도로교로써 콘크리트 주탑의 비대칭 사장교이며, 주거터는 IPSC-합성형 형식으로써 그림 3은 연구대상 교량의 전경이다. 대상교량을 보행하는 보행자 중심의 진동 응답 특성을 분석하기 위해서 2경간의 중앙에 transducer 타입의 가속도계(TEAC Co, 2 g) 2개를 보도의 가장자리와 중앙부에 2.5 m 간격을 두고 각각 설치하였다(그림 4 참조). 가속도계로부터 얻어진 진동가속도 응답은 국내의 KMC사에서 제작한 Wireless Transmitter와

그림 3. 실험대상 교량 전경

그림 4. 가속도계 센서와 무선 송신기

Receiver를 통하여 컴퓨터에 저장하였다. 그림 5는 대상 교량의 제원과 모니터링 시스템의 구성을 개략적으로 나타낸 그림이며, 실험대상 교량은 준공된 상태였으나 아직 차량통행은 이루어지지 않는 상태로 실험을 위해 일반차량 통제는 필요하지 않았다.

3.2 실험방법

실험으로부터 정확한 실험데이터를 얻기 위해 차량중량이 제공된 3축 덤프트럭 2대를 실험차량으로 이용하였다. 시험 차량의 총중량은 270 kN으로 2대 모두 동일한 중량을 갖도록 하였다. 실험 변수는 실험차량의 주행속도, 차량중량, 병

그림 5. 연구대상 교량 제원과 진동계측 시스템

렬주행여부, 교면의 포장상태로 결정하였다. 차량의 주행속도는 20 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 차량중량은 적재된 상태와 비적재 상태로 구분하여 실험차량 1대 당 각각 270 kN과 130 kN이었으며, 실험차량 1대만을 주행시키는 경우와 실험차량 2대를 나란하게 병렬로 주행하도록 하였다.

실제 실험대상교량의 교면은 아스팔트로 포장된 상태이며, 아직 일반 차량들의 통행이 제한되고 있는 상태로써 포장 상태가 아주 양호하여 교면의 균열, 요철 및 단차, 함몰 등으로 인한 진동이나 교면 충격이 거의 발생하지 않았다. 이러한 교면상태는 Bridge Management System(BMS)에서 교면의 상태를 평가할 때 A등급에 해당하는 수준으로 분류할 수 있다(한국건설기술연구원, 2001). A등급의 교면 상태는 공용 중인 대부분 교량의 교면상태와는 현실적으로 차이가 있으므로, 경미한 요철 및 단차, 일부 균열 발생(20~30%) 수준인 보다 보편적인 교면 상태, 즉 C등급을 재현하기 위하여 교면 전체에 최대 치수 20 mm 내외의 쇄석을 간헐적으로 뿌린 후 실험에 반영하였다(그림 6 참조). 즉 교면의 포장상태는 A등급과 C등급의 2가지로 구분하였다. 한 가지 실험CASE에 2회 주행을 기본으로 하였다. 교량의 진동응답을 명확하게 모

그림 6. 교면 포장상태 C 등급 재현

니터링하기 위하여 시험차량이 측정구간에 영향을 미치지 시작하는 시점부터 측정구간을 벗어난 후에 나타나는 자유진동 부분까지 측정하였다.

3.3 실험결과

실험변수에 따라 총 96회의 주행실험으로부터 얻어진 진동 가속도 응답결과를 표 1에 정리하였다. 각각의 실험 CASE를

표 1. 주행실험결과

CASE	Acc.(m/s ²)	CASE	Acc.(m/s ²)	CASE	Acc.(m/s ²)	CASE	Acc.(m/s ²)
AL20-1-1	0.0398	AU20-1-1	0.0347	CL20-1-1	0.0424	CU20-1-1	0.0480
AL20-1-2	0.0499	AU20-1-2	0.0434	CL20-1-2	0.0557	CU20-1-2	0.0468
AL20-2-1	0.0330	AU20-2-1	0.0375	CL20-2-1	0.0376	CU20-2-1	0.0569
AL20-2-2	0.0370	AU20-2-2	0.0466	CL20-2-2	0.0635	CU20-2-2	0.0594
Average	0.0399	Average	0.0406	Average	0.0498	Average	0.0528
AL40-1-1	0.0547	AU40-1-1	0.0534	CL40-1-1	0.1017	CU40-1-1	0.0568
AL40-1-2	0.0421	AU40-1-2	0.0344	CL40-1-2	0.0748	CU40-1-2	0.0567
AL40-2-1	0.0455	AU40-2-1	0.0488	CL40-2-1	0.0680	CU40-2-1	0.0540
AL40-2-2	0.0626	AU40-2-2	0.0479	CL40-2-2	0.0516	CU40-2-2	0.0511
Average	0.0512	Average	0.0461	Average	0.0740	Average	0.0547
AL50-1-1	0.0439	AU50-1-1	0.0362	CL50-1-1	0.1170	CU50-1-1	0.0542
AL50-1-2	0.0474	AU50-1-2	0.0462	CL50-1-2	0.0995	CU50-1-2	0.0590
AL50-2-1	0.0616	AU50-2-1	0.0504	CL50-2-1	0.0841	CU50-2-1	0.0536
AL50-2-2	0.0690	AU50-2-2	0.0599	CL50-2-2	0.0915	CU50-2-2	0.0490
Average	0.0555	Average	0.0482	Average	0.0980	Average	0.0540
AL20-1-1(P)	0.0411	AU20-1-1(P)	0.0428	CL20-1-1(P)	0.0605	CU20-1-1(P)	0.0656
AL20-1-2(P)	0.0493	AU20-1-2(P)	0.0317	CL20-1-2(P)	0.0480	CU20-1-2(P)	0.0569
AL20-2-1(P)	0.0486	AU20-2-1(P)	0.0661	CL20-2-1(P)	0.0754	CU20-2-1(P)	0.0609
AL20-2-2(P)	0.0507	AU20-2-2(P)	0.0503	CL20-2-2(P)	0.0657	CU20-2-2(P)	0.0691
Average	0.0474	Average	0.0477	Average	0.0624	Average	0.0631
AL40-1-1(P)	0.0410	AU40-1-1(P)	0.0385	CL40-1-1(P)	0.0696	CU40-1-1(P)	0.0603
AL40-1-2(P)	0.0656	AU40-1-2(P)	0.0398	CL40-1-2(P)	0.0681	CU40-1-2(P)	0.0595
AL40-2-1(P)	0.0752	AU40-2-1(P)	0.0559	CL40-2-1(P)	0.0619	CU40-2-1(P)	0.0656
AL40-2-2(P)	0.0614	AU40-2-2(P)	0.0576	CL40-2-2(P)	0.0628	CU40-2-2(P)	0.0504
Average	0.0608	Average	0.0480	Average	0.0656	Average	0.0590
AL50-1-1(P)	0.0589	AU50-1-1(P)	0.0547	CL50-1-1(P)	0.1055	CU50-1-1(P)	0.0810
AL50-1-2(P)	0.0654	AU50-1-2(P)	0.0535	CL50-1-2(P)	0.1315	CU50-1-2(P)	0.0905
AL50-2-1(P)	0.0764	AU50-2-1(P)	0.0474	CL50-2-1(P)	0.0767	CU50-2-1(P)	0.0905
AL50-2-2(P)	0.0596	AU50-2-2(P)	0.0550	CL50-2-2(P)	0.0820	CU50-2-2(P)	0.0737
Average	0.0651	Average	0.0527	Average	0.0989	Average	0.0839

정의하기 위한 기호는 표 1의 하단에 설명하였다. 기호에서 사용된 “(P)”는 2대의 실험차량이 동일한 속도로 각각의 차로를 유지하면서 나란하게 병렬 주행한 경우를 의미한다. 실험결과의 전체적인 경향은 차량의 주행속도가 증가할수록, 차량의 중량이 증가할수록, 교면의 포장상태 등급이 좋지 않을수록 진동가속도 응답이 크게 발생하는 예측 가능한 결과를 보였다. 그림 7(a), (b)는 실험으로부터 얻어진 계측자료 중

AL50-2-1(P)와 CL50-2-2(P)로부터 얻어진 진동가속도 응답 시간이력을 각각 보여주고 있다. 또한 해당 가속도 응답 시간이력을 주파수 분석한 결과는 그림 7(c), (d)에 각각 제시하였다. 가속도 응답 시간이력에 대한 주파수 분석결과는 전반적으로 3 Hz 대역의 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.

그림 8에는 실험으로부터 얻어진 표 1에 근거하여 실험변수를 교면상태 등급, 병렬주행 여부의 4가지 기준으로 구분

그림 7. 진동가속도 응답 시간이력과 주파수 분석 결과

그림 8. 실험조건에 따른 가속도 응답 비교

하여 진동가속도 응답의 평균값들을 비교하였다. 그림 8로부터 전체적인 진동가속도 응답의 경향과 정량적인 비교가 가능하다.

4. 진동추정식 및 진동사용성 평가

4.1 진동추정식

표 1의 실험결과를 진동가속도 응답의 회귀분석이 가능한 형태로 정리하기 위하여 식(1)에서 정의한 환산중량을 사용하였다. 실험의 결과에서 주행속도와 차량중량의 증가는 진동가속도 응답의 증가와 비례관계에 있다는 것을 확인 할 수 있다. 자승근과 삼승근의 형태로 환산중량을 구하고 이로부터 진동가속도 응답과의 상관관계를 구한 후 신뢰도가 부여된 진동추정식을 제안하고자 하였다. 실험 경우의 수에 따른 환산중량은 표 2에 정리하였다. 표 2에서 실험CASE에 표기된 AL, CL 등은 표 1에서 정의한 기호와 동일한 의미를 갖는다. 측정위치, 반복주행 횟수는 환산중량을 결정하는데 영향을 미치지 않으며, 주행속도의 변화는 환산중량에 직접적으로 영향을 미치지 때문에 이를 반영하기 위하여 표 2의 실험CASE를 그룹지어 표기한 것이다.

그림 9는 교면포장상태 A등급과 C등급의 경우에 대해 환산중량과 가속도 응답들을 이용하여 회귀분석한 결과이다. 환산중량 산정 시 차량중량을 자승근과 삼승근의 형태로 고려해본 결과 교면포장상태가 A등급인 그림 9(a)의 상관계수(r)는 자승근의 경우 0.63, 삼승근의 경우 0.60으로 얻어져 차량중량을 자승근의 형태로 고려했을 때 보다 높은 상관도를 보임을 알 수 있다. 이러한 경향은 교면포장상태가 C등급인 그림 9(b)의 경우에도 유사하게 얻어져 자승근일 때 0.66, 삼승근일 때 0.64의 상관계수를 보였다. 또한 환산중량을 결정하는 차량주행속도와 중량이 커질수록 자승근을 사용하여 추정된 진동가속도 응답이 상대적으로 크게 얻어짐을 알 수 있었다.

본 연구에서는 차량의 중량, 계측위치, 차량주행 위치, 충격 등과 같이 진동가속도 응답 추정식을 제안하는 과정에서 포함되지 못한 변수들을 고려하기 위한 방법으로 진동응답을

표 2. 실험 경우의 수에 따른 환산중량

CASE	주행속도 (V, km/h)	차량중량 (W, kN)	환산중량 SW(V·W ^{1/2})	환산중량 SW(V·W ^{1/3})
AL, CL	20	270	328.6	129.2
	40	270	657.3	258.5
	50	270	821.6	323.1
AL(P), CL(P)	20	540	464.8	162.8
	40	540	929.5	325.7
	50	540	1161.9	407.1
AU, CU	20	130	228.0	101.3
	40	130	456.1	202.6
	50	130	570.1	253.2
AU(P), CU(P)	20	260	322.5	127.6
	40	260	645.0	255.3
	50	260	806.2	319.1

추정하는데 사용자가 요구하는 정도의 신뢰도를 갖도록 하는 수정된 진동가속도 응답 추정식을 제안하였다. 수정된 진동가속도 응답 추정식은 비초과 확률의 개념을 도입하여 신뢰도 정도에 따라 50%, 90%, 95%로 구분하였다. 교면포장상태를 A등급과 C등급으로 구분하여 그림 10(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 실험에 의해 얻어진 진동가속도 응답들을 정규분포로 가정하고, 신뢰도 50%, 90%, 95%에 대한 신뢰도 지수는 각각 0, 1.282, 1.645를 각각 적용하였다. 표 3에는 본 연구에서 제안하고자 하는 교량의 교면포장상태에 따른 진동가속도 응답 추정식을 정리하였다.

또한 그림 11에는 교면포장상태 A등급과 C등급의 50% 신뢰도에 해당하는 진동가속도 응답 추정식을 비교하여 제시하였다. 그래프의 우측 세로축은 교면포장상태 A 등급에 대한 C 등급의 비를 정량적으로 표현하기 위한 좌표축이다.

그림 11에 의하면 상대적으로 교면포장상태가 좋지 못한 C 등급이 A등급 보다 차량주행속도와 차량중량이 동일한 조건에서 진동가속도 응답이 크게 추정된다는 것을 확인 할 수 있다. A 등급에 대한 C 등급 진동가속도 응답의 정량적인 차이는 본 연구의 실험 시 얻어진 환산중량 228.0~1161.9 km/h·kN 범위 내에서 1.23~1.43으로 분석되었다.

(a) 교면포장 상태 A 등급

(b) 교면포장 상태 C 등급

그림 9. 환산중량에 따른 진동추정식 비교

(a) 교면포장상태 A등급

(b) 교면포장상태 C등급

그림 10. 신뢰도에 따른 진동가속도 응답 추정식

표 3. 교면포장상태에 따른 진동가속도 응답 추정식

교면포장상태	신뢰도	진동추정식(m/s ²)	상관계수(r)	환산중량(SW)	비고
A 등급	50%	Acc.=8.64×10 ⁻³ (V·W ^{1/2}) ^{0.275}	0.63	228~1162 km/h·kN (SW=V·W ^{1/2})	V : km/h W : kN
	90%	Acc.=10.64×10 ⁻³ (V·W ^{1/2}) ^{0.275}			
	95%	Acc.=11.28×10 ⁻³ (V·W ^{1/2}) ^{0.275}			
C 등급	50%	Acc.=6.46×10 ⁻³ (V·W ^{1/2}) ^{0.367}	0.66		
	90%	Acc.=8.30×10 ⁻³ (V·W ^{1/2}) ^{0.367}			
	95%	Acc.=8.90×10 ⁻³ (V·W ^{1/2}) ^{0.367}

그림 11. 교면포장상태에 따른 진동가속도 응답 비교

4.2 진동사용성 평가

본 논문의 연구 대상 교량의 진동사용성 평가를 위하여 우선적으로 교량 위에서 보행자가 느끼는 진동수준을 그림 2에서 제시한 바 있는 수정된 Reiher-Meister 가속도 허용곡선을 사용하여 검토하였다(그림 12 참조). 그림 12에서 교면포장상태 A등급과 C등급은 각각 “●”, “+”로 나타내었다.

평가결과 연구대상 교량의 진동응답 정도는 실험변수 중 주행속도 보다는 교면포장상태 등급이 진동수준 결정에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 전체적인 수준은 전체응답의 약 30%가 강하게 진동을 느끼는 “Level C, Strongly perceptible” 범위이며, 전체 응답의 약 70%는 진

그림 12. 수정된 Reiher-Meister의 가속도 허용곡선에 의한 진동사용성 평가

동을 느끼기 시작하는 “Level D, Distinctly perceptible” 수준으로 나타났다. 그러나 교면포장상태 C등급만을 분리하여 평가할 경우 약 60%가 “Level C”, 약 40%가 “Level D” 수준으로 나타났다. 그림 12로부터 본 연구에서 설정한 실험변수 중 실험차량의 주행속도 20~50 km/h, 차량중량 540 kN이하, 교면포장상태 A등급인 경우 보행자를 기준으로 할 때 본 연구대상 교량은 적절한 수준의 진동사용성을 확보하고 있다는 것을 의미하고 있다.

이러한 일련의 진동사용성 평가 방법 및 과정은 연구대상으로 선정된 교량에서 뿐만 아니라, 공용중인 교량의 진동사용을 평가하는데 확대 적용이 가능할 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량주행속도와 교면아스팔트의 포장 상태, 차량중량 등을 실험변수로 하여 차량이 교량을 주행할 때 발생하는 교면(보도)진동이 보행자에게 미치는 진동사용성 평가 방법에 대해 연구하고 그 결과로부터 진동사용성 여부를 평가하였다.

- 1) 실험결과 교면 아스팔트 포장상태는 C등급이면서 적재 하중이 실린 실험용 트럭이 병렬 주행한 실험조건에서 0.1315 m/s^2 의 가장 큰 진동가속도 응답이 얻어졌다.
- 2) 연구대상 교량의 교면 진동가속도 응답을 추정할 수 있는 진동추정식을 신뢰도 50%, 90%, 95%로 구분하여 제시하였다. 제안된 진동추정식에는 교면의 아스팔트 포장상태를 A등급과 C등급으로 구분하였으며, 진동을 발생시키는 에너지원은 차량주행 속도와 차량중량의 지승 근을 곱한 형태를 사용하여 보다 상관도가 높고, 보수적으로 추정이 가능하도록 하였다.
- 3) 동일한 실험 조건에서 교면포장 상태 A등급에 대한 C등급의 진동가속도 응답 비율은 실험 시 얻어진 환산중량 $228.0 \sim 1161.9 \text{ km/h} \cdot \text{kN}$ 범위 내에서 $1.23 \sim 1.43$ 으로 분석되어 교면포장 상태가 진동가속도 응답을 결정짓는 데 큰 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있었다. 이로 부터 연구대상 교량의 진동응답 정도는 실험변수 중 주행속도 보다는 교면포장상태 등급이 진동수준 결정에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에서 설정한 실험변수 중 실험차량의 주행속도 $20 \text{ km/h} \sim 50 \text{ km/h}$, 차량중량 540 kN 이하에서 연구대상

교량은 교면포장상태 A등급~C등급 사이에서 불쾌감을 느끼지 않는 수준의 진동사용성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 김진기, 홍동표, 최병재, 정완섭 (2001) 국내의 철도 차량의 진동에 대한 인체영향 조사, **한국소음진동공학회 논문집**, 한국소음진동공학회, 제11권, 제6호, pp. 455-458.
- 박연수, 홍혜진, 공강주, 김정주 (2006) 교량구조물의 진동영향평가를 위한 동하중 이상화모델링 기법 연구, **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제6권, 제2호 pp. 9-15.
- 성중수, 이영휘, 송기능, 박정근 (2007) 보도교 진동사용성 기준 검토 및 TMD 적용성·화성동탄 보도교, **한국강구조학회지**, 한국강구조학회, 제19권, 제1호, pp. 79-88.
- 안상섭, 이일근 (2003) 교량의 진동 사용성 평가에 대한 고찰, **한국강구조학회 논문집**, 한국강구조학회, 제15권, 제4호, pp. 84-89.
- 이상태 (1992) 진동이 인체에 미치는 영향, **한국소음진동공학회 논문집**, 한국소음진동공학회, 제2권, 제4호 pp. 253-258.
- 한국건설기술연구원 (2000) **교량의 진동·처짐에 대한 사용성 측면에서의 평가절차 수립**, 연구보고서, 건설교통부.
- 한국건설기술연구원 (2001) **교량유지관리 및 BMS 운영**, 연구보고서, 건설교통부.
- Park, S.J. (2005). Vibration Response of Exposed Gas Pipeline Placed to Temporary Structure, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 9 No. 4, pp. 305-311.

◎ 논문접수일 : 11년 02월 18일

◎ 심사의뢰일 : 11년 03월 02일

◎ 심사완료일 : 11년 03월 10일