韓國産業應用學會論文集, 제9권, 제3호, 199-206, 2006.08
J. Korean Society of Industrial Application, Vol.9, No.3, 199-206, Aug, 2006

연속슬래브교의 진동사용성 평가에 관한 연구
A Study on Vibration Serviceability Evaluation of Continuous Slab Bridges

김기대*
Kee-Dae Kim*

<Abstract>
Extraordinary displacement and vibration by heavy vehicle causes passengers to feel mental uncomfortableness and bridge to be damaged. To increase serviceability, the research on the human influence for vibration to happen at the bridge has been performed for a long time in oversea but it does not draw concern relatively in the domestic. The purpose of this research is to develop an evaluation method for vibration serviceability of continuous slab bridge. This research is focused on establishing theoretical method to assess vibration serviceability of bridge considering natural frequency, displacement, and acceleration since the criteria for the human responses to vibration is generally based on frequency band. By examining the characteristics of vibration serviceability which has been assessed with human response curve through field experiments as well as analytical study, the evaluation method of vibration serviceability for continuous slab bridges is proposed. Based on applications to the example of continuous slab bridge, the simple evaluation of vibration serviceability in the paper may be used in the initial step of design practice.

Keywords : vibration serviceability, human responses curve, field experiments

1. 서 론

최근 급속한 경제발전과 생활수준의 향상에 따라 도로상을 통행하는 차량의 교통량이 급속히 증가하고 있으며, 차량의 중량화 및 고속화 현상이 가속되고 있어 공용중인 교량에서 나타나는 과도한 진동, 처짐 등의 문제가 교량의 사용성을 저하시키고 안전성을 위협하고 있다.

교량에 진동을 유발하는 인자로는 여러 가지가 있으나, 그 중 주행차량의 영향으로 인해 교량에 발생되는 진동은 교량을 통행하는 차량이나 사람에게 여러 형태의 영향을 주게 된다. 이러한 진동은 승차감을 나쁘게 할 뿐만 아니라 주행차량의 동적윤하중을 증가시켜 교면의 파손과 동적반응을 증폭시키는 원인이 되고, 결국 교량의 안전성까지도 감소시키는 중요한 원인이 된다.

* 정회원, 대구대학교 토목공학과 교수, 工博
* prof. Dept. of Civil Engineering, Daegu University

외국에서는 진동이 인체에 미치는 영향에 대한 관련 연구[12,14]가 오래전부터 수행되어 왔으며, 카나다의 경우에는 교량에 발생하는 가속도와 처짐이 인체에 미치는 영향을 이미 시방서에 명시[13]하여 사용성을 증진시키려는 노력을 하고 있지만, 현재까지 국내에서는 상대적으로 커다란 관심을 끌지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 연속슬래브 교량에 대하여 실험 및 해석적인 진동평가를 비교 분석하여, 진동에 대한 교량의 이론적인 평가절차정립에 대한 접근을 시도하고자 한다.

2. Meister의 진동감각특성

진동의 영향이 구조물에 직접적인 손상을 일으키지는 않는다 하더라도 이용자들을 불쾌하게 만들거나 불안하게 만들수도 있기 때문에 많은 연구자들에 의해 진동에 의한 인간감각특성에 대한 연구[9]가 이루어져 왔다. 인체도 일종의 진동체이기 때문에, 진동에 관한 인체감각에 대해서 인체를 기계 전달계로 취급하여 오래 전부터 연구가 되어왔고, 이 가운데 Meister는 진동수에 따른 감각곡선을 정의하였으며, 이 감각곡선은 인체감각의 기준으로 여러 분야에서 활용되어 왔다.

전신진동에 대한 인체의 진동감각 특성은 주파수 대역에 따라서 상이하게 반응하는데, 인체의 전신이 진동하는 것은 1~90Hz의 범위이고, 이 이상 높은 주파수에서는 국부적으로 진동하는 것으로 알려져 있다[3]. 전신진동과 인체의 진동감각과의 관계에 대한 대표적인 연구가 Meister의 진동감각곡선[14]인데, 횡축을 주파수(Hz), 종축을 진동가속도로 놓고 대규모 실험을 통해서 아래 그림과 같이 겨우느낌에서 강한 불쾌감까지 5단계의 항으로 분류하였으며, 최근까지 많은 분야에서 채용되고 있다. Fig.1은 변위진폭에 대한 진동등감각곡선이며, Fig.2는 가속도 진폭에 대한 진동등감각곡선으로 일반적인 교량들의 고유진동주파수 영역인 주파수 2~8Hz 범위의 진동에 인체가 가장 민감하게 느끼는 것으로 알려져 있다. 변위진폭에 대해서는 주파수가 높아지면 감각이 민감해지는 것에 반해 가속도진폭에 대해서는 주파수가 높아지면 감각이 둔화됨을 알 수 있다.

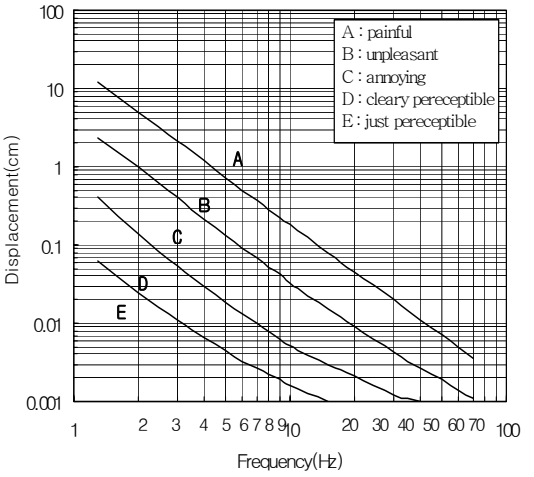


Fig.1 Meister의 진동등감각곡선(변위)

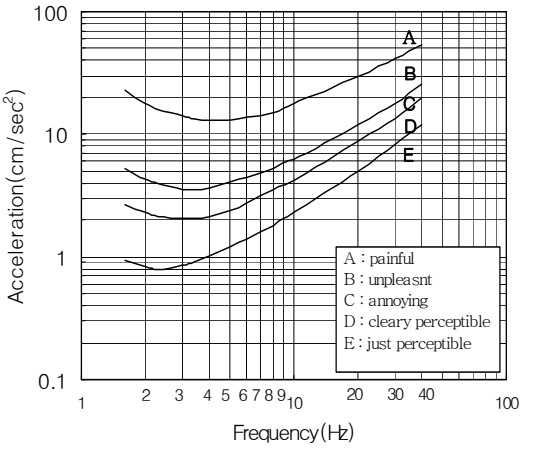


Fig.2 Meister의 진동등감각곡선(가속도)

3. 진동 사용성의 평가방법

교량의 진동사용성을 평가하기 위한 절차는 아래와 같다.

(1) 측정된 데이터로부터 계측지점의 주요모드의 진동수를 구한다.

(2) 가속도와 처짐의 측정데이터로부터 최대진폭은 시험차량의 계측지점에 대한 영향구간으로의 진입에서부터 영향구간을 벗어나거나 진동이 없어질 때까지 계측한 데이터를 이용한다. 단순교 및 연속교에 대한 최대진폭의 결정방법은 다음과 같다.

- 단순교 : 시험차량통과부, 여진발생부 최대진폭의 평균값
- 연속교 : 시험차량진입부, 주요영향부, 여진발생부의 최대진폭의 평균값

이때 최대진폭은 Fig.3과 같은 시간이력으로부터 구할 수 있는데, 여기서 X가 진폭이다. 이는 편진폭 이라고도 하며, 2X는 peak to peak값 혹은 양진폭(or전진폭)이라 한다. FFT 분석에 의한 주요주파수와 최대진폭을 이용하여 사용성 평가기준에 적용한다.

(3) 분석된 진동특성값을 Meister진동평가기준에 대입하여 진동등급을 결정한다.

(4) 위와 같이 계측위치별, 진동특성(가속도, 변위)별, 주행속도별로 판정한 Meister의 진동등급 중에서 제일 나쁜 등급을 대상교량의 진동등급으로 결정한다.

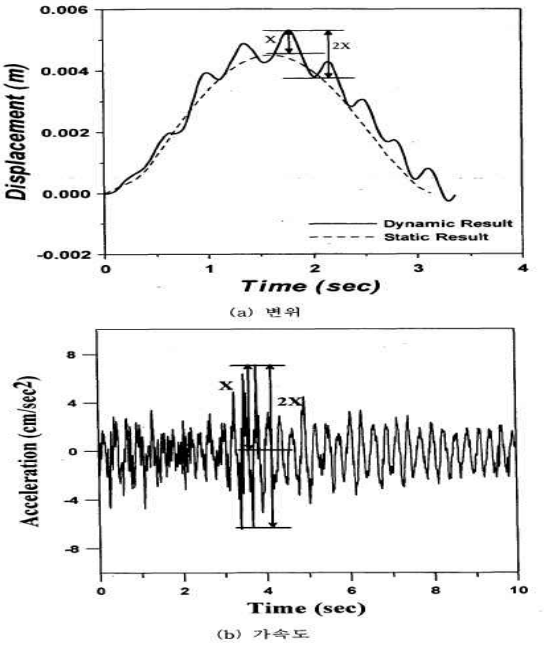


Fig.3 최대진폭구하는 방법

4.. 수치계산예 및 진동평가

4.1 수치계산예

(1) 교량 제원 [5]

- 형식 : 3경간연속 철근콘크리트 슬래브교
- 교장 : 36.0(11.25+13.5+11.25)M
- 교폭 : 10.8(차도폭 9.2)M
- 슬래브 두께 : 50cm
- Skew : 15 °
- 설계하중 : DB18

(2) 재하시험

1) 재하차량

현재 도로상에 통행하고 있는 차량에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 그들 차량 중 도로교의 설계 활하중과 유사한 응답을 유발할 수 있는 15ton 덤프트럭을 활하중으로 택하였으며, 재하시험차량의 제원 및 측정 축하중은 다음 Table 1과 같다

Table 1 재하시험차량의 축하중

구분	전륜(ton)	중륜(ton)	후륜(ton)	합계(ton)
재하차량	6.160	9.575	9.575	25.310

2) 재하시험 경간 및 게이지 부착위치

게이지 부착위치는 동일하중에서도 응답이 크게 반응할 수 있는 제2경간 중앙부에 설치하였으며 정확한 위치는 Fig.4와 같다.

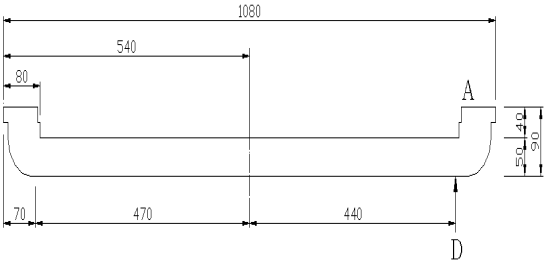


Fig.4 재하시험용 게이지 부착위치

(3) 재하시험 결과분석

1) 고유 진동수

Fig.5와 같이 측정데이터의 FFT 분석결과 주요모드의 진동수로 5.25Hz를 선정하였다

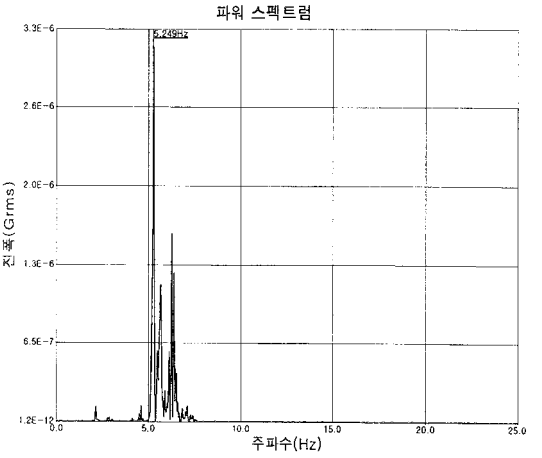
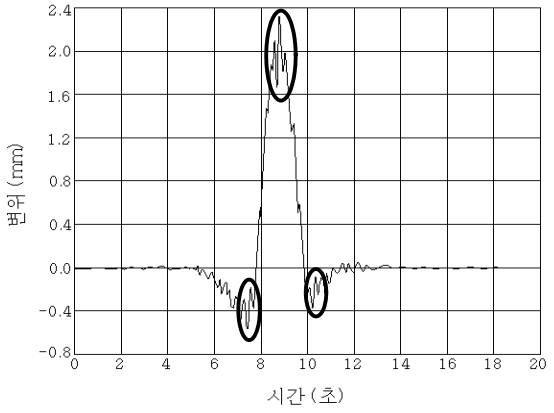


Fig.5 파워스펙트럼

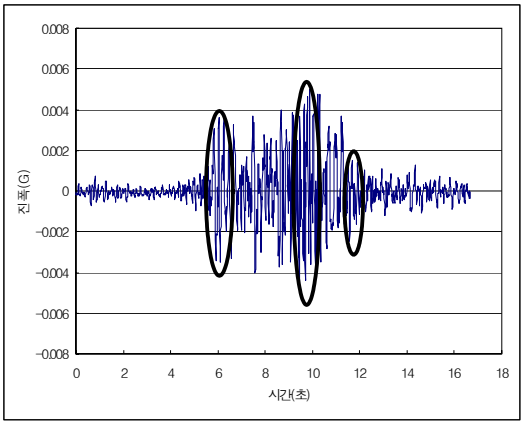
2) 주행속도별 처짐 및 가속도 이력

- 주행속도 20km/h 경우

주행속도 20km/h경우의 처짐 시간이력 및 가속도 시간이력에 대한 그래프는 Fig.6과 같고 진동평가를 위한 최대 진폭 값을 얻기 위해 시험차량 진입부, 주요영향부 및 여진발생부로 구분하여 Table 2와 같이 평균 진폭 값을 얻을 수 있다.



(a) 처짐이력



(b) 가속도이력

Fig.6 주행속도 20km/h 경우의 처짐 및 가속도이력

Table 2 주행속도 20km/h의 진폭

구 분	시험차량 진입부	주요 영향부	여진 발생부	평균 진폭
처짐(mm)	0.2	0.3	0.15	0.22
가속도(G)	0.0036	0.00475	0.0027	0.00368

(4) 교량의 모델링

구조해석 상용프로그램을 이용하여 바닥판 슬래브를 판요소로 해석하였고 슬래브와 포장 등의 구조물 자중은 단면을 이용하여 계산한 후 등분포 하중형태로 입력하였으며 동적하중인 차량하중은 재하시험을 실시한 15ton 트럭하중 및 비교 목적의 표준설계하중(DB-18, DB-24)을 각각 외측경간에 편측재하하여 주행하는 것으로 하였다. 주행속도별 시간에 따른 동적 절점하중 함수는 판요소로 모델링된 슬래브의 절점간격을 고려하여 계산하였고, 슬래브상의 주행경로인 각 절점에 이동하중의 도착시간을 계산하여 각 주행속도별로 하중을 Table 3 및 Fig.7과 같이 부여하였다

Table 3 주행속도별 동적 절점하중

No.	거리 (m)	Time (sec)			Function
		20km/h	40km/h	60km/h	(tonf)
1	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.50	0.090	0.045	0.030	3.080
3	1.00	0.180	0.090	0.060	0.000
4	3.20	0.576	0.288	0.192	0.000
5	3.70	0.666	0.333	0.222	4.788
6	4.20	0.756	0.378	0.252	0.000
7	4.50	0.810	0.405	0.270	0.000
8	5.00	0.900	0.450	0.300	4.788
9	5.50	0.990	0.495	0.330	0.000

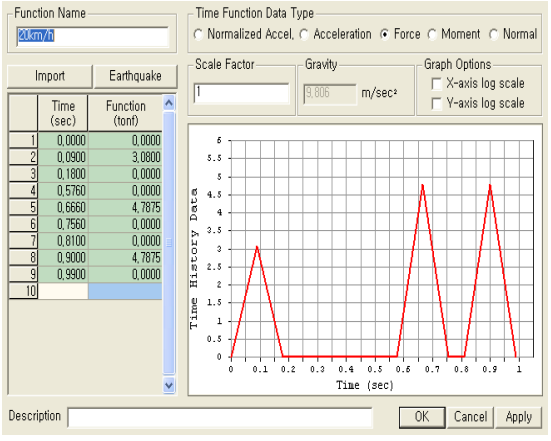


Fig.7 주행속도 20km/h 경우 동적 절점하중의 시간이력 함수

(5) 해석값

1) 해석대상 교량에 직접적인 영향을 주는 상하진동 모드가 포함되는 10개의 고유모드로 해석하였으며, 그 결과 질량참여도가 큰 4차모

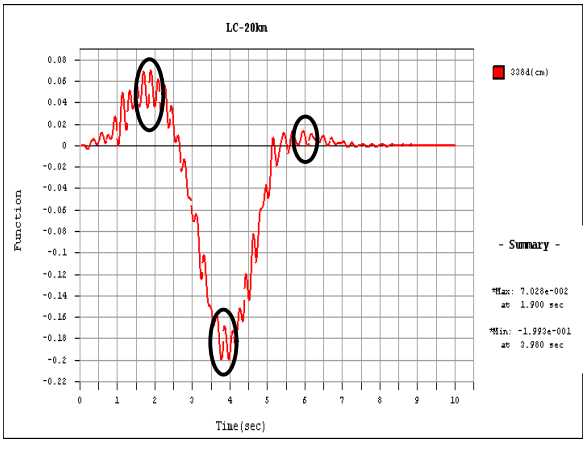
드로 Table 4와 같이 진동평가에 적용되는 주요 진동수 5.89Hz를 얻었다.

Table 4 진동모드 분석

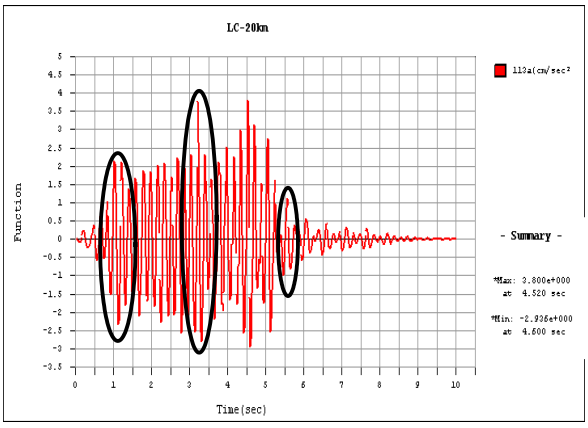
EIGENVALUE ANALYSIS			
Mode No	Frequency (rad/sec)	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)
1	23.8888	3.8020	0.2630
2	33.6524	5.3560	0.1867
3	36.4925	5.8080	0.1722
4	37.0487	5.8965	0.1696
5	44.2336	7.0400	0.1420
6	46.6456	7.4239	0.1347
7	73.4309	11.6869	0.0856
8	79.8343	12.7060	0.0787
9	81.5635	12.9812	0.0770
10	84.7443	13.4875	0.0741

MODAL PARTICIPATION MASSES(%) PRINTOUT						
Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
	MASS	SUM	MASS	SUM	MASS	SUM
1	0	0		0	0.55	0.55
2	0	0		0	17.61	18.16
3	0	0		0	16.62	34.78
4	0	0		0	32.20	66.98
5	0	0		0	3.03	70.01
6	0	0		0	1.49	71.50
7	0	0		0	0.00	71.50
8	0	0		0	0.02	71.52
9	0	0		0	0.00	71.52
10	0	0		0	0.02	71.54

2) 평가의 절점은 실험적 평가시의 재하시험 센서 부착위치를 선정하여 Fig.8의 처짐 및 가속도 이력을 얻을 수 있었으며, 진동평가를 위해 이동하중 진입부, 주요영향부 및 여진발생부로 구분하여, Table 5와 같이 평균 진폭 값을 얻을 수 있었다.



(a) 처짐이력



(b) 가속도이력

Fig.8 15ton 트럭 하중시 주행속도 20km/h 경우의 처짐 및 가속도이력

Table 5 주행속도별 진폭

속 도	구 분	진입부	주요 영향부	여진 발생부	평균 진폭
20km	처짐	0.017	0.020	0.008	0.015
	가속도	2.25	3.25	1.10	2.20
40km	처짐	0.014	0.020	0.007	0.014
	가속도	2.00	4.35	0.80	2.38
60km	처짐	0.025	0.020	0.015	0.020
	가속도	1.30	7.50	1.00	3.27

4.2 결과분석 및 진동평가

교량의 진동등급에 영향을 주는 처짐 및 가속도의 진폭에 대한 결과치를 주행속도와 하중에 대하여 비교 분석하였으며, 교량의 주요 진동수(Hz)와 진동특성값을 Meister진동평가 기준에 대입하여 교량에 대한 진동 등급을 결정하였다.

(1) 주행속도 및 하중에 대한 처짐 및 가속도 진폭 비교

Table 6 처짐진폭 비교

구 분	하중(ton)	처짐진폭(cm)		
		20km/h	40km/h	60km/h
재하시험	25.3	0.022	0.025	0.023
해석적 모델링	25.3	0.015	0.014	0.020
	32.0	0.027	0.043	0.032
	43.2	0.037	0.054	0.040

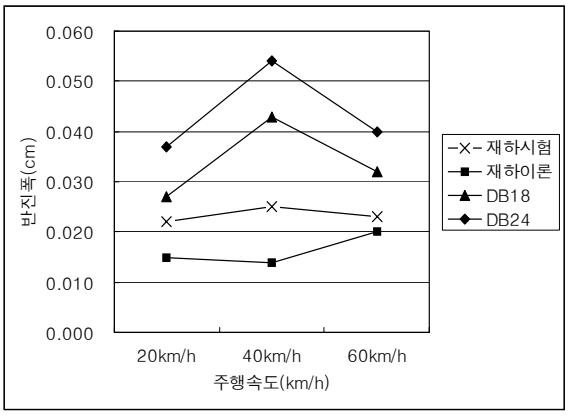


Fig.9 주행속도 및 하중에 대한 처짐진폭

Table 7 가속도진폭 비교

구 분	하중(ton)	가속도진폭(cm)		
		20km/h	40km/h	60km/h
재하시험	25.3	3.68	4.91	4.60
해석적 모델링	25.3	2.20	2.38	3.27
	32.0	4.08	6.83	5.28
	43.2	5.33	9.50	7.25

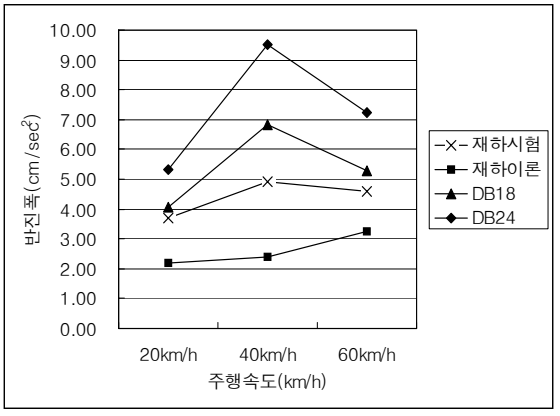
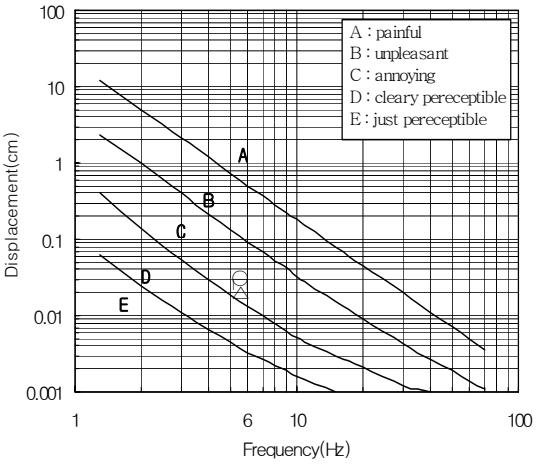


Fig.10 주행속도 및 하중에 대한 가속도진폭

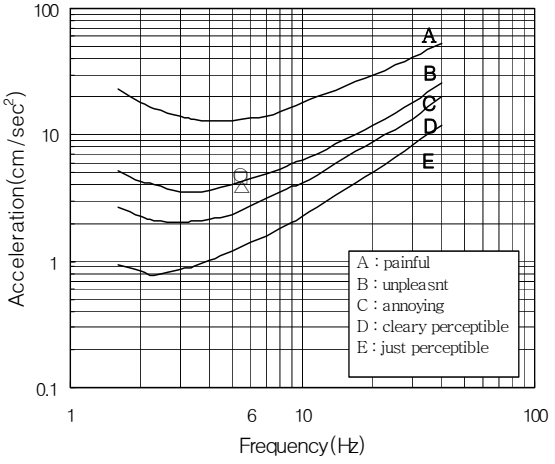
Table 6과 Table 7 및 Fig.9와 Fig.10에서 볼 수 있듯이 주행속도에 대한 처짐 및 가속도의 진폭은 40km/h의 속도에서 대체로 가장 큰 값을 나타냄 알 수 있었다. 이는 처짐이나 가속도 값이 주행속도의 증감 보다는 교량자체가 가지는 고유 진동수나 어떤 특정한 고유치에 의해 특정 속도에 민감하게 반응함을 알 수 있었다. 또한 동등한 하중상태의 재하시험 값과 모델링에 의한 해석적인 값에 대해서는 재하시험에 의한 실질적인 값들이 크게 나타남을 알 수 있으며 이는 교량의 노후화에 따라 그 값들이 증가함을 알 수 있다. 이론적인 모델링을 통한 하중값에 대한 처짐 및 가속도 진폭의 변화는 하중이 증가할수록 대체로 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

(2) 진동등급 평가

1) 재하시험 평가시의 진동등급



(a) 처짐에 대한 Meister의 등감각곡선



(b) 가속도에 대한 Meister의 등감각곡선

Fig.11 Meister의 등감각곡선

Table 8 재하시험에 의한 진동평가

주행속도	변위등급	가속도등급	평가등급	비 고
20km/h	C	C	C	△
40km/h	C	B	B	○
60km/h	C	B	B	□
최종등급	C	B	B	

2) 해석적 평가시의 진동등급

Table 9 재하차량에 대한 진동평가

주행속도	변위등급	가속도등급	평가등급	비 고
20km/h	C	D	C	△
40km/h	D	D	D	○
60km/h	C	C	C	□
최종등급	C	C	C	

Table 10 설계하중(DB18)에 대한 진동평가

주행속도	변위등급	가속도등급	평가등급	비 고
20km/h	C	C	C	△
40km/h	C	B	B	○
60km/h	C	B	B	□
최종등급	C	B	B	

Table 11 설계하중(DB24)에 대한 진동평가

주행속도	변위등급	가속도등급	평가등급	비 고
20km/h	C	B	B	△
40km/h	C	B	B	○
60km/h	C	B	B	□
최종등급	C	B	B	

본 연구대상 교량의 진동평가 결과는 Fig.11 및 Table 9 ~ Table 11에서와 같이 당초 설계하중(DB-18)에 의한 진동평가는 C등급을 가지지만 가속도는 B등급으로 나타나 최종 B등급의 나쁜 진동등급으로 판정되었다. 또한 재하시험에 의한 진동평가 등급은 B로 나타났으며 재하차량의 해석적평가 등급은 C로 판정되었다. 이는 교량의 노후화나 노면의 영향에 따라 등급이 나빠진 것으로 보인다.

5. 결론

본 논문은 연속슬래브교에 대해 재하시험 및 해석적방법을 통해 교량의 진동을 평가하였다. 진동평가에 영향을 주는 요소인 처짐 및 가속도 진폭을 이용하여 재하시험과 해석적방법으로 재하차량, DB18 및 DB24 하중에 대해 각각 20km/h, 40km/h, 60km/h의 주행속도에 대하여 비교 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 주행속도에 대한 처짐 및 가속도의 진폭은 20km/h의 주행속도에 비해 40km/h의 속도에서 대체로 증가하였으나 60km/h로 증가된 속도에서는 오히려 낮은 값을 가졌다. 이는 처짐이나 가속도 진폭 값이 주행속도의 증감보다는 교량자체가 가지는 진동수나 어떤 특정한 고유치에 의해 특정 속도에 민감하게 반응함을 알 수 있다.

(2) 해석적인 모델링을 통한 하중의 증가에 대한 처짐 및 가속도 진폭의 변화는 하중이 증가할수록 대체로 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

(3) 동등한 하중상태의 재하시험 값과 해석적방법시에 대한 처짐 및 가속도 진폭은 재하시험에 의한 값이 크게 나타남을 알 수 있으며, 이는 교량의 노후화에 따라 그 값들이 증가되는 것으로 볼 수 있다.

(4) 당초 설계하중(DB-18)에 대한 처짐 및 가속도 진폭의 값을 Meister의 등감각 곡선에 적용시켰을때, 변위는 C등급을 가지지만 가속도는 B등급으로 최종 B등급의 좋지 않은 진동등급으로 판정되었다. 진동에 대한 사용성을 증진시키기 위해서는 설계시 진동특성에 대한 더 많은 연구검토가 필요함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1) 건설교통부, 도로교설계기준. 대한토목학회 (2005)
2) 건설교통부, 교량안전점검 및 정밀안전진단 세부지침. 시설안전기술공단 (2001)
3) 건설교통부, 교량의 진동·처짐에 대한 사용성측면에서의 평가절차 수립. 시설안전기술공단 (2001)
4) 건설교통부, 도로교설계기준·해설. 대한토목학회 (2003)
5) 경상북도종합건설사업소, 매실교 정밀안전진단보고서. (주)대경건설안전연구원 (2001)
6) 마이다스 아이티, 바닥진동에 대한 사용성 평가 (2001)
7) 마이다스 아이티, 사용자 지침서 (GEN w) (2001)
8) 박진규, 김원기. 합성슬래브 건축물의 바닥진동 평가방법. 대한건축학회 학술발표회논문집, 19(2), 484-489 (2001)
9) 이정배, 주영규, 김상대. 보행에 의한 슬래

브 진동의 사용성 평가에 관한 연구. 대한건축학회 학술발표회논문집, 15(1), 387-390 (2001)

10) 최원호, 김기철, 이동근. 보행 이동하중 효과를 고려한 건물 바닥판의 진동평가. 대한건축학회 학술발표회논문집, 19(1), 69-74 (2001)

11) 한국고속철도건설공단, 고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한연구 (진동대책편) (2001)

12) 小幡卓司, 林川俊郎, & 佐藤浩一, 인간의 진동감각에 기초한 보도교의 사용한계상태에 관한 연구. 토목학회논문집, 537/ I (35), 217 (2001)

13) Allen D. E, Vibrational behavior of long-span slabs. Canadian journal of civil engineering, 108(1), 108-115 (2001)

14) H. Reiher, and F.J. Meister Sensitivity of Humans to Vibration, Forschung auf dem Gebeite des Ingenieurwesens, Vol. 2 (2001)

(2006년 6월 26일 접수, 2006년 8월 20일 채택)

후 기

본 연구는 대구대학교 2005학년도 학술연구비에 의해 조성된 논문입니다.