

## 주행 시뮬레이터를 활용한 운전자 중심의 교량 진동 사용성 평가기준 연구

오정재<sup>1</sup>, 박종섭<sup>1\*</sup>, 성익현<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>상명대학교 건설시스템공학과, <sup>2</sup>한서대학교 토목공학과

### A Study on Assessment of Vibration Serviceability of Highway Bridges Using Driving Simulator

Jeong-Jae Oh<sup>1</sup>, Jong-Sub Park<sup>1\*</sup> and Ik-Hyun Sung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Sangmyung University

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Hanseo University

**요약** 본 연구는 기존의 진동·처짐에 대한 교량 사용성 평가기준 연구 내용을 바탕으로 최첨단 모의운전 차량실험기(Advanced Driving Simulator)를 이용하여 운전자가 교량 주행 시 진동으로 인해 느끼는 주행안락도를 평가하는 기준을 제안하였다. 열차승객을 대상으로 하는 Reiher-Meister Curve의 적용성을 파악하고 교량 계측결과와 구조해석 결과를 토대로 수정 Reiher-Meister Curve 제안하였다. 교량운전자 중심의 사용성 평가를 위한 수정 Reiher-Meister Curve는 A에서 D까지 4등급으로 규정되었다. 새로운 진동감각곡선은 교량 사용자 중심의 교량 설계 및 유지관리분야에 널리 사용될 수 있을 것이다.

**Abstract** This study investigates the criteria for assessing the vibration serviceability of highway bridges using advanced driving simulator. Reiher-Meister Curves were firstly reviewed for extended application to serviceability of highway bridges. Modified Reiher-Meister Curves were provided in this paper based on field test results and numerical analyses results. The Modified Reiher-Meister Curves were evaluated using advanced driving simulator. The new curve consisted of 4 level, A(Disturbing), B(Strongly perceptible), C(Allowable), and D(Comfortable). The new criteria will be extensively applied to design and maintain highway bridges with respect to driver condition.

**Key Words** : Serviceability, Driving Simulator, Bridge, Vibration

### 1. 서론

최근 급격한 차량의 증가, 중량화 및 고속화로 인하여 공용중인 교량에서 과도한 진동이 발생하고 있으며, 과도한 진동은 주행자에게 불쾌감과 불안감을 유발하여 안전사고 및 운전패적성에 대한 민원이 증가하고 있다. 교량의 구조적인 안전성에 문제가 없더라도 주행패적성 확보를 위해 교량의 진동 사용성(Serviceability)을 합리적으로 고려해야 될 필요성이 대두 되고 있다.

최근 외국에서는 교량 위를 달리는 차량의 주행패적성

확보를 위한 연구가 수행되고 있다. 미국 FHWA (Federal Highway Administration)는 교량의 사용성 및 경제성 확보를 위하여 종합적인 사용성 평가 보고서를 매년 조사하여 발표하고 있다. 일본도 고규격 도로인 제 2 도메이메이신 고속도로 건설을 위한 설계속도와 설계조건 수립 시 구조물의 사용성 평가를 하나의 핵심고려요소로 정의하여 고속화도로를 추진하고 있다. 그러나 국내의 교량 사용성 증진을 위한 연구들은 교량 자체의 구조적 안전성에 초점을 맞추고 있어 교량 사용자 즉 운전자의 주행패적성 상태 등급평가 및 기술 개발은 미비하다.

본 연구는 2009년 상명대학교 교내연구비 지원에 의해 수행됨.

\*교신저자 : 박종섭(jonpark@smu.ac.kr)

접수일 10년 01월 22일

수정일 10년 03월 30일

계재확정일 10년 05월 13일

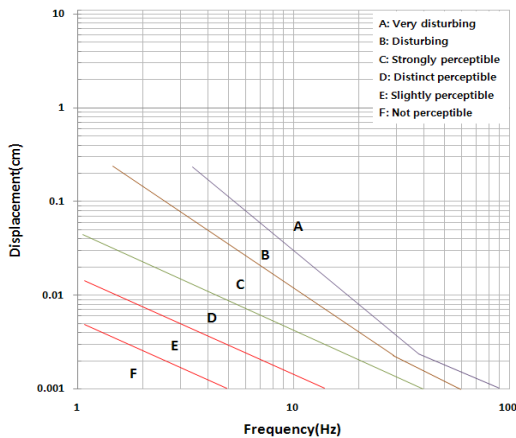
본 연구는 기존의 진동-처짐에 대한 교량의 사용성 평가 기준연구와 외국의 교량 진동 사용성 측면의 연구내용을 바탕으로 모의주행 실험기인 Advanced Driving Simulator를 이용하여 운전자가 교량 주행 시 진동으로 인한 주행안락정도를 파악할 수 있는 평가기준을 제안하고자 한다.

안하였다. British Standard 6472[8]는 주로 주거 건물에 살고 있는 사람들이 느끼는 진동에 관해 평가기준을 제시하고 있다. Deickmann와 British Standard 6472의 사용성 평가기준을 교량의 경우에 적용 시킬 수는 있으나 건물 내 거주자들을 대상으로 하는 기준이기에 교량 위를 주행하는 운전자의 경우에 직접 적용하는 것은 적절치 못하다.

## 2. 진동평가 이론 및 기준

### 2.1 기존 진동평가 이론

전신진동에 대한 인체의 진동감각 특성은 주파수 대역에 따라서 상이하게 반응하는데, 인체의 전신이 진동하는 것은 1~90Hz의 범위이고, 그 이상 높은 주파수에서는 국부적으로 진동하는 것으로 알려져 있다[1]. 이와 같은 인체의 진동감각 특성에 대해서는 70여 년 전부터 연구가 진행되어 왔다. 특히 전신진동과 인체의 진동감각과의 관계에 대한 가장 대표적인 연구는 1931년에 발표된 Reierh-Meister[2]의 허용곡선이 있다.



[그림 1] Reierh-Meister Curve

그림 1의 기준은 철도승객들의 진동 감각 수준을 파악·분류하여 제시된 것으로서 수평축을 주파수(Hz), 수직축을 처짐으로 설정하여 서 있는 상태와 누워있는 상태에 수평, 수직방향의 진동을 가하여 변위에 대해 “A(Very Disturbing)”에서 “F(Not Perceptible)”까지 6단계로 분류하였다. Reierh-Meister Curve는 교량의 진동 감각 수준을 고려한 결과는 아니지만 최근까지도 교량 진동 사용성 평가 연구에 활용되었다[3-6].

Deickmann[7]는 비교적 저주파수 영역을 가지는 건축물의 수평방향 진동에 대해서 적용 가능한 평가기준을 제

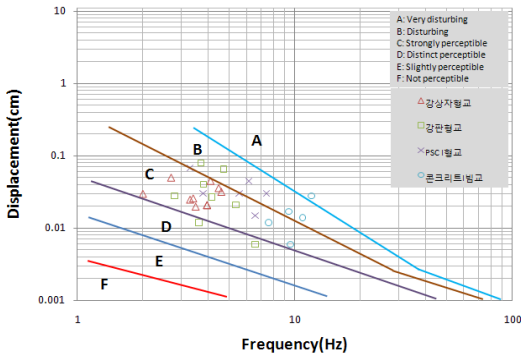
### 2.2 국내 교량형식별 진동평가

[표 1] 대상교량별 특성

교량	교량형식	고유진동수 (Hz)	최대경간장 (m)	평균변위 (cm)
1	콘크리트1범교	9.55	15	0.0058
2	콘크리트1범교	10.89	12	0.0132
3	콘크리트1범교	9.40	15	0.0152
4	콘크리트1범교	7.59	15	0.0129
5	콘크리트1범교	11.94	12	0.0262
6	단순 강판형교	3.80	40	0.0389
7	단순 강판형교	4.15	30	0.0282
8	단순 강판형교	6.57	20	0.0058
9	단순 강판형교	3.63	20	0.0106
10	단순 강판형교	2.80	50	0.0267
11	3연속강판형교	4.71	33	0.0682
12	3연속강판형교	3.70	35	0.0819
13	3연속강판형교	5.35	26	0.023
14	단순 강박스교	4.47	40	0.0326
15	단순 강박스교	3.40	35	0.0216
16	3연속강박스교	4.18	34	0.038
17	2연속강박스교	3.41	30	0.027
18	3연속강박스교	4.28	32	0.02
19	2연속강박스교	3.95	47.5	0.025
20	5연속강박스교	2.75	60	0.0319
21	3연속강박스교	3.50	50	0.0196
22	3연속강박스교	2.00	35	0.0725
23	4연속강박스교	4.10	35	0.0465
24	단순 PSC I형교	3.30	30	0.0661
25	단순 PSC I형교	6.14	25	0.0459
26	3연속PSC I형교	5.50	30	0.0259
27	2연속PSC I형교	7.40	20	0.0302
28	2연속PSC I형교	3.79	26	0.0284
29	3연속PSC I형교	6.59	30	0.0143

국내에서는 고속도로 교량의 진동수준을 파악하기 위하여 29개의 실험교량에 실험차량을 이용하여 속도별 처짐값과 가속도를 측정하고 고유진동수를 고려하여 그림 1의 Reierh-Meister Curve에 등급을 나타낸 연구가 수행되었다[9]. 실측된 29개의 대상 교량은 콘크리트 1범교(5개), 강판형교(8개), 강상자형교(10개), PSC 1범교(6개)로 총 4가지 형식으로 구별된다. 표 1은 29개 교량의 형식과 등급판정에 사용된 값을 나타내고 있으며, 그림 2는 등급판정을 위해 Reierh-Meister Curve에 표시한 모습으로 대

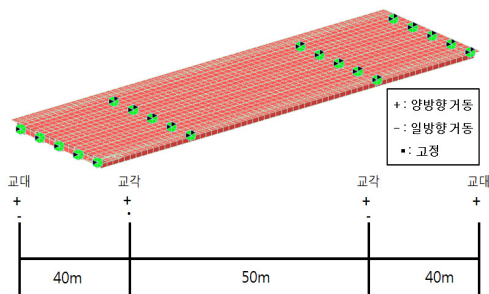
부분의 측정값이 B(Disturbing)와 C(Strongly perceptible) 등급에 놓이는 것을 확인할 수 있다.



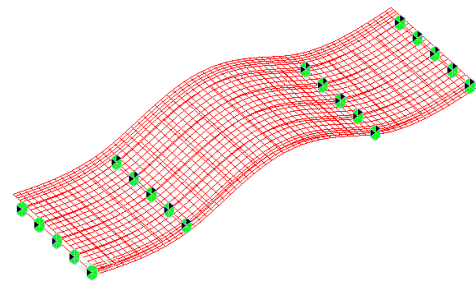
[그림 2] 고속도로교량 진동등급평가

### 3. 사용성 등급 판정을 위한 교량 모형화

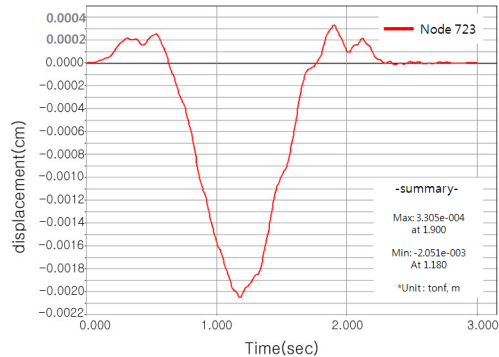
계측된 29개 교량의 Reiher-Meister Curve를 통한 등급 판정이 교량구조해석을 통해 얻어지는 고유진동수와 최대처짐값을 사용한 진동평가의 적절성을 분석하고자 범용구조해석프로그램 MIDAS[10]를 이용하여 대상교량들을 모델링하였다. 그림 3은 3경간 연속지간을 가지는 강박스형교의 예를 보여주고 있다. 구조해석에 있어서 박스 거더와 가로보는 보(Beam)요소를, 슬래브는 판(Plate)요소를 사용하였다. 고유치 해석을 수행하여 그림 4와 같은 고유진동모드를 확인하고 고유진동수(Hz)를 얻는다. 또한 시간이력해석을 수행하여 도로교 설계기준[11]의 설계트럭이 다양한 속도로 교량을 이동할 때 발생하는 최대값들을 속도별로 얻어 최대변위 평균값을 산정하였다. 그림 5는 그림 3의 해석교량의 최대변위가 발생하는 시간 중앙의 변위값을 나타내고 있다.



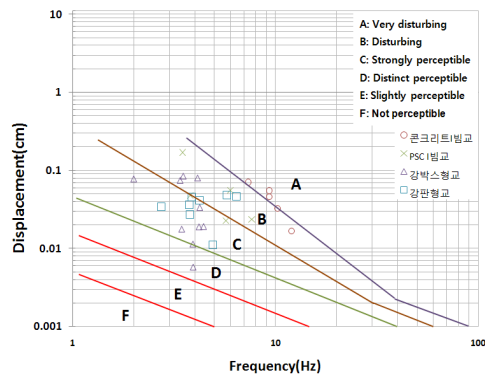
[그림 3] 교량 모델링 및 경계조건(교량 21)



[그림 4] 1차 고유 진동 모드



[그림 5] 시간이력해석 그래프



[그림 6] 구조해석을 통한 교량 진동평가

표 2는 해석을 통해 얻어진 해석결과와 계측결과를 비교한 것이다. 표 2에 나타난 바와 같이 계측결과와 해석결과 고유진동수의 차이는 최대 8%정도이며, 평균최대변위 차이는 -18%~24%정도를 나타내고 있다. 그림 6은 해석을 통해 얻어진 결과를 Reiher-Meister Curve에 나타낸 것으로서 해석결과는 계측결과와 유사한 사용성 등급 판정을 보이고 있다. 즉 대부분의 교량이 등급 B와 C에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

[표 2] 계측결과와 해석결과 비교

교량 코드	고유 진동수 (Hz)			최대변위 (평균값, cm)		
	실측결과	해석결과	비교 (%)	실측결과	해석결과	비교 (%)
1	9.55	9.33	2.3	0.0058	0.0052	10.3
2	10.89	10.25	5.9	0.0132	0.0122	7.5
3	9.40	9.34	0.6	0.0152	0.0172	-13.1
4	7.59	7.35	3.2	0.0129	0.0151	-17.0
5	11.94	12.01	-0.6	0.0262	0.0199	24.1
6	3.80	3.88	-2.1	0.0389	0.0393	-1.0
7	4.15	4.22	-1.7	0.0282	0.0334	-18.4
8	6.57	6.40	2.6	0.0058	0.0068	-17.2
9	3.63	3.77	-3.9	0.0106	0.0104	-1.9
10	2.80	2.73	2.5	0.0267	0.0212	20.6
11	4.71	4.93	-4.7	0.0682	0.0782	-14.7
12	3.70	3.79	-2.4	0.0819	0.0662	19.2
13	5.35	5.78	-8.1	0.0230	0.0203	11.7
14	4.47	4.42	1.2	0.0326	0.0292	10.4
15	3.40	3.51	-3.2	0.0216	0.0182	15.7
16	4.18	4.13	1.2	0.0380	0.0290	23.7
17	3.41	3.39	0.6	0.0270	0.0242	10.4
18	4.28	4.24	0.9	0.0200	0.0171	14.5
19	3.95	3.92	0.8	0.0250	0.0232	7.2
20	2.75	2.93	-6.6	0.0319	0.0353	-10.7
21	3.50	3.45	1.5	0.0196	0.0119	21.9
22	2.00	2.02	-1.0	0.0725	0.0810	-11.7
23	4.10	4.20	-2.4	0.0465	0.0412	11.4
24	3.30	3.48	-5.5	0.0661	0.0624	5.6
25	6.14	6.01	2.1	0.0459	0.0410	10.7
26	5.50	5.70	-3.6	0.0259	0.0221	14.7
27	7.40	7.63	-3.1	0.0302	0.0341	-12.9
28	3.79	3.81	-0.5	0.0284	0.0220	22.5
29	6.59	6.32	4.1	0.0143	0.0121	15.4

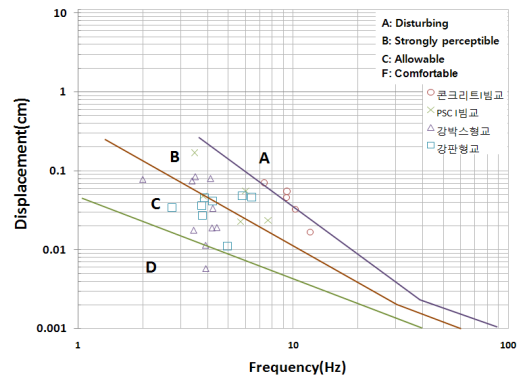
#### 4. 수정 Reiher-Meister Curve

열차 승객의 안락도를 평가하기 위해 개발된 Reiher-Meister Curve는 평가 등급이 상세하게 구분되어 있으며, 현재 국내 사용성 평가 기준에 널리 사용되고 있다. 그러나 교량을 빠르게 통과하는 차량운전자 Reihher-Meister Curve의 6개 등급의 상세 등급구분을 인지하고 판단하기에는 어려움이 있다. 또한 그림 2와 6에 나타낸 바와 같이 대부분의 교량사용성 등급이 Reiher-Meister Curve의 B와 C등급에 놓이는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 운전자 및 교량 설계자가 교량의 사용성 등급평가를 용이하게 수행할 수 있도록 Reiher-Meister Curve의 안락도를 6개의 등급 "A(Very Disturbing)~F(Not perceptible)"에서 표 3과 같이 4개의 등급 "A(Disturbing)-D(Comfortable)"으로 수정하였다. 그림 7은 교량 안락도 등급판정을 위한 수정 Reiher-Meister Curve

와 3장의 구조해석결과를 나타내고 있다.

[표 3] 진동 등감각곡선의 주행안락등급

등급	내용
A	운전중 불안감을 유발하는 강력한 진동을 느낀다.
B	운전중 강한진동이 인지된다.
C	운전중 일부진동은 인지되나 운전 중 불편감은 없다.
D	운전중 진동 인지 없이 편안하다.



[그림 7] 교량사용성 등급판정을 위한 수정 Reiher-Meister Curve

### 5. 주행 시뮬레이터를 이용한 수정 Reiher-Meister Curve 평가

제안된 수정 Reiher-Meister Curve 즉 교량위를 주행하는 운전자 안락도 기준의 적절성을 검증하고자 충남테크노파크 (Chungnam Techno Park)에 구축된 최신의 차량 시뮬레이터(Advanced Driving Simulator)를 활용하여 교량위를 주행하는 차량운전자의 안락도 실험을 실시하였다.

#### 5.1 주행 시뮬레이터의 교량주행 환경구현

주행 시뮬레이터(Advanced Driving Simulator)는 3차원 영상시스템과 차량의 3방향 움직임을 가능하게 하는 3축 진동장치, 차량운전환경구현을 위한 소프트웨어 설치 및 시뮬레이션 운영실, 차량과 차량내 운전자 눈동자 인식장치로 구성되어 있다. 그림 8은 주행실험 구성시스템을 나타내고 있으며, 그림 9는 3차원 영상시스템으로 본 실험에서는 교량을 달리는 모습을 구현하였다. 그림 10은 운영실로 차량에 교량 및 차량의 진동주기와 최대

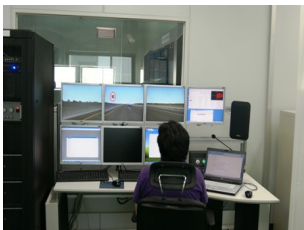
변위를 입력하여 실험을 진행하며 운전자의 실험진행을 통제할 수 있다.



[그림 8] 실험시스템



[그림 9] 3차원 영상



[그림 10] 운영실

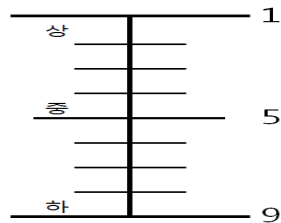


[그림 11] 주행시험 교육

실험차량에 입력될 진동특성값은 앞에서 언급된 29개 고속도로 교량의 계측 및 해석결과를 고려하여 고유진동수의 평균값인 5.27Hz를 적용하였다. 또한 실험차량축에 가해진 최대 변위도 계측 및 해석결과를 토대로 0.01cm과 0.07cm를 사용하였다. 진동수 5.27Hz에 최대변위 0.01cm인 실험교량을 T1, 진동수 5.27Hz에 최대변위 0.07cm인 실험교량을 T2로 정의하였다.

## 5.2 실험방법

원활한 주행실험과 안락도 평가를 위하여 그림 11과 같이 실험시작 전 피실험자에게 실험진행과정을 설명하고 진동과 변위를 입력하지 않은 상태의 예비주행실험을 실시하였다. 기존의 주행승차감 연구과정[12,13]을 참조하여 진동과 변위가 가려지지 않는 차량을 120km/h로 운전할 때를 예비주행실험으로 정의하고 운전안락도를 그림 12의 평가기준의 2정도 수준으로 정의하였다. 피실험자는 일정한 진동수와 변위가 제공되는 주행 본실험 후 운전안락도를 그림 12에 기입하게 되며 상대안락지수는 1~9로 표현되며 편안할수록 낮은 점수, 불편할수록 큰 점수로 평가한다.



[그림 12] 주행안락도 평가표

본 주행실험에 참여하는 피실험자는 22세부터 28세 사이의 4명의 평가자들로 이루어져 있으며 평균 신장은 165cm(최대 181cm, 최소 154.5cm)이고 평균 체중은 58.25kg(최대 78kg, 최소 42kg), 평균 운전경력(년)은 3.5년(최대 8년, 최소 1년)이다.

## 5.3 실험결과

총 4명의 피실험자(I~IV)가 실험교량(T1, T2)을 주행 실험한 결과 표 4와 같은 주행안락지수가 평가되었다.

[표 4] 주행실험결과

피실험자 특성				
피실험자	I	II	III	IV
신장(cm)	152	181	155	172
몸무게(kg)	45	78	48	68
운전경력(년)	2	8	1	3
주행안락지수				
T1	4	3	4	3
T2	8	6	7	5

## 6. 결론

본 연구에서는 교량 주행자 안락도를 평가하기 위하여 기존의 진동감각곡선을 살펴보고, 고속도로 교량의 계측 결과와 해석결과를 토대로 수정 진동감각곡선을 제안하였다. 또한 수정 진동감각곡선의 활용가능성을 판단하고자 주행 시뮬레이터(Driving Simulator)를 사용한 검증실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 4가지 형식의 29개의 고속도로 교량의 고유진동수 계측결과 2.0Hz~11.94Hz, 해석결과 2.02Hz~12.01Hz로 -8.1%~5.9%의 차이를 나타내고 있으며, 최대변위는 계측결과 0.0058cm~0.0819cm, 해석결과 0.0052cm~0.0810cm으로 -18%~24%의 차이를 보이고 있다.
2. 철도승객을 대상으로 개발된 Reiher-Meister Curve와 29개의 교량특성값을 적용하여 수정 Reiher-Meister Curve를 제안하였다. 수정 Reiher-Meister Curve는 교량 운전자 인지도를 반영하여 4등급(A~D)으로 구분된다.
3. 주행 시뮬레이터(Driving Simulator)를 이용하여 수정 Reiher-Meister Curve의 활용가능성 및 적절성을 평가한 결과 실험자의 안락도 등급판정과 수정 Reiher-Meister Curve가 잘 일치하였다. 수정 Reiher-Meister Curve는 교량운전자 안락도 평가에 적극 활용가능하다.

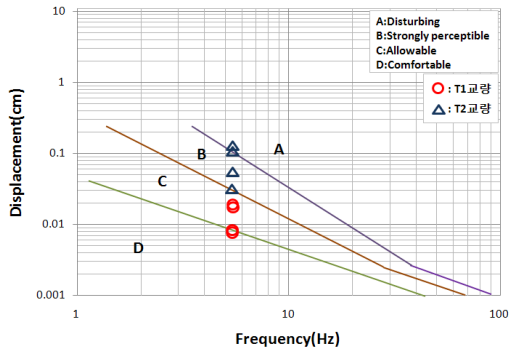
수정 Reiher-Meister Curve의 안락도 평가 확대적용을 위해서는 추가적인 실험이 필요하며, 인간공학적 생리신호측정기 등을 활용한 인지수준판약이 실시된다면 세분화된 사용성 평가기준이 제안될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

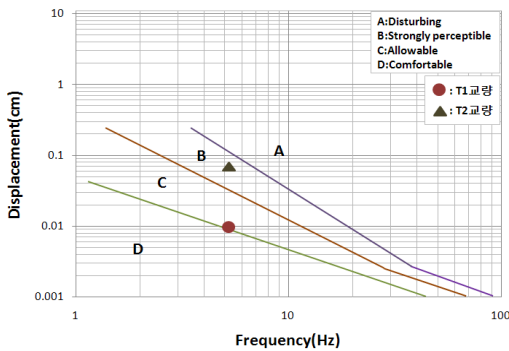
적극적으로 지원을 아끼지 않은 충남테크노파크(CTP) 관계자분들의 협조에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 전귀현, 김상호, “교량의 진동-처짐에 대한 사용성측면에서의 평가절차 수립”, 건설교통기술혁신사업 최종보고서, R&D/99S08-02, 2000.
- [2] Reiher, H. and Meister, F.J, "Human sensitivity to



(a) 전체 주행실험 결과



(b) 교량별 평균 주행 실험결과  
[그림 13] 교량 진동 평가

그림 13(a)는 5.2실험방법에 따라 평가된 실험교량 T1,T2에 대한 모든 피실험자의 주행안락지수(표4)값을 나타내고 그림 13(b)는 주행실험 후 느꼈던 안락지수(표 4)의 최고값과 최저값을 뺀 나머지 안락지수의 평균값을 나타낸다. 표 4의 주행안락지수를 표 3의 수정 Reiher-Meister Curve의 4단계 등급과 비교하면, T1의 경우 모든 실험자가 3~4 수준을 나타내고 안락등급의 최고값과 최저값을 뺀 나머지 안락등급의 평균은 3.5로서 수정 Reiher-Meister Curve의 C(Allowable)등급, T2의 경우 실험자가 5~8 수준을 나타내고 안락등급의 최고값과 최저값을 뺀 나머지 안락등급의 평균은 6.5로서 수정 Reiher-Meister Curve의 B(Strongly perceptible)등급으로 판단할 수 있다. C등급은 주행 중 일정한 진동은 느끼지만 운전하는 데 큰 지장이 없고 불편하지 않은 상태를 나타내며, B등급은 운전 중 강하게 진동을 인지할 정도의 수준으로 정의된다. 주행 시뮬레이터(Driving Simulator)를 이용한 주행안락등급과 수정 Reiher-Meister Curve의 주행안락등급판정을 비교한 결과 실험 T1과 T2에 대한 주행안락등급이 일치하는 결과를 나타내었다.



vibrations", Forsch. auf dem Geb, des Ingen, 2, (11), pp381~386, 1931.

- [3] 김상효, 전귀현, 이용선, 문승재, 고수경, “공용중인 교량의 통행차량에 의한 진동사용성 평가”, 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 제 4권, 2호, pp189~194, 2000.
- [4] 김태형 “사장교 진동사용성평가기준 및 평가절차 연구”, 목포대학교 대학원 토목공학과 석사논문, 2006.
- [5] 이일근, 안상섭, 박민석, “교량의 진동 사용성 평가”, 대한토목학회 학술발표논문, pp553~558, 2003.
- [6] 전법규, 김남식, “교량구조물의 진동 사용성 분석”, 한국소음진동공학회 논문집, 제 17권, 10호, pp 923~935, 2007.
- [7] Deickmann, D, "A study of the influence of vibration on man", Ergonomics, 1, (4), 347-55, 1958.
- [8] British Standard, BS 6472, "Guide to Evaluation of human exposure to vibration in buildings(1 Hz to 80 Hz)", 1992.
- [9] 안상섭, 이일근, “교량 횡진동 방지 장치의 개발 및 실용화 연구”, 한국도로공사 도로교통기술원 연구보고서, 도로기 ST-02-14, 2002.
- [10] MIDAS/CIVIL, "Analysis for civil structure", MIDAS. I. T. Co, 2006.
- [11] 한국도로교통협회, “도로교설계기준”, 2005.
- [12] 김민석, 김연태, 문원길, 안세진, 유완석, “승차감 관련 주관평가와 객관 평가의 상관성 연구”, 한국자동차공학회 논문집, vol. 15, no. 5, pp56~62, 2007.
- [13] 장한기, 김승한, 조영호, “차량승차감 평가지수 개발에 대한 연구”, 한국소음진동공학회 학술발표논문, pp 132~137, 2000.

**박 종 섭(Jong-Sup Park)**

[종신회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2002년 12월 : Auburn University (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 교량공학, 강구조좌굴, 유지보수

**성 익 현(Ik-Hyun Sung)**

[정회원]



- 1988년 10월 ~ 1990년 6월 : 한국과학기술원 과학기술대학 연구원
- 1995년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학박사)
- 1995년 10월 ~ 1998년 2월 : 한국도로공사 책임연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 비선형동역학

**오 정 재(Jeong-Jae Oh)**

[준회원]



- 2009년 2월 : 상명대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 석사과정

<관심분야>

구조공학, 교량공학, 강구조좌굴, 유지보수