

열차주행에 따른 강박스 철도교의 동적응답특성

Dynamic Responses Characteristics of Steel Box Railway Bridges Subjected to Train Loading

박 선 준†·강 성 후*·조 은 평**

Sun-Joon Park, Sung-Hoo Kang and Eun-Pyung Jo

(2009년 9월 15일 접수 ; 2009년 10월 27일 심사완료)

Key Words : Dynamic Response(동적응답), Natural Frequency(고유진동수), End Slope Deflection(단부격임 각), Impact Factor(충격계수), Damping Ratio(감쇠비)

ABSTRACT

By rising the interests of the railroad, It has been required the research about railroad structure. And since 2000, the study about railway bridges caused by steel box railway bridges has been only 0.2 %. So I was hard to find out about steel box railway bridges. In this study, I evaluate and analyze 4 types(KTX, Saemaetul, Mugunghwa, Freight) of dynamic caused by train loading, natural frequency and damping ratio, verticality deflection and verticality acceleration, end slope deflection, impact factor for dynamic characteristics analysis. natural frequency was measured 2.45 Hz~3.34 Hz and damping ratio revealed for 1.26~2.84 %. Maximum verticality deflection(4.86 mm) was sufficiently satisfied the design criteria(30.1 mm), but in the case of verticality acceleration's respond, design criteria BRDM(bridge design manual) & CTRL presentation derive rail limit value 0.35 g be more than value 6 time recorded, maximum was measured 0.49 g in 3 kinds of train(KTX, Saemaetul, Mugunghwa), except for Freight. Survey impact factor of Experiment bridge was 0.20 which is measured when the KTX(15:04) was driving. impact factor is enough contended with design criteria 0.29 which is presented in domestic railway design criteria and thoroughly guarantee the dynamic stability.

1. 서 론

인류의 철도교통망의 발달에 따라 철도교의 중요성이 부각되고 있다. 도로교의 경우에는 작용하는 하중들의 종류와 크기가 다양하여 동적해석을 위한 하중모델의 정의가 쉽지 않지만, 철도교의 차량하중군은 매우 균일하고 연속적으로 반복되는 주기성을 띠고 있기 때문에 하중간격과 경간장에 따른 진동문제를 다루는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 철

도교의 구조안전성(structural stability)과 동적사용성(dynamic serviceability)을 확보하기 위해서는 상부 구조물의 동적특성을 분석하는 과정과 이를 고려한 해석이 반드시 필요하며 교량의 동적거동을 정확히 분석하기 위해서는 기존의 철도교량에 대한 동적특성치를 분석하는 과정이 선행되어야 한다. 과거 국내 고속철도의 설계방식은 대부분 정적하중에 동적확대계수(충격계수)를 적용하여 기존 구조물에 대한 강성을 증가시키는 개념으로 설계되었다⁽³⁾. 그러나 철도교량은 연속적인 열차하중의 특성상 공진 발생의 가능성이 있으므로 충격력만이 아닌 진동에 의한 동적안전성에 대한 연구가 필요하다. 국내에서는 일반도로교는 활발한 연구를 해왔으나 철도교에 대한 연구는 매우 부족한 실정으로 2000년 한국건

† 교신저자; 정회원, 동신대학교 토목공학과
E-mail : parksj@dsu.ac.kr
Tel : (061)330-3136, Fax : (061)330-3136

* 정회원, 동신대학교 토목공학과

** 동신대학교 대학원 토목공학과

설기술연구원에서 “고속철도 구조물 안정성 기술 개발”에 대한 연구를 하기 전까지는 거의 전무한 실정이었다. 국내철도교량에 대한 연구로는 최진유⁽³⁾는 철도교 설계기준에 대한 비교·고찰에 대해 연구를 하였고, 정재민⁽⁵⁾은 PSC box 거더교를 대상으로 동적응답을 분석하여 단경간 교량이 연속교 교량보다 동적거동 값이 큰 것은 연속교가 동적거동에 대해 안정된 교량형식이라는 연구결과를 제시하였다. 김성일⁽⁸⁾은 연구를 통하여 동적성능 관련 항목에 대하여 대상 철도교의 최대 연직처짐, 상판의 가속도, 단부 격임각, 단부의 상대연직처짐, 면틀림, 차체가 속도 등을 분석하여 1급선 200 km/h 이하의 설계속도를 갖는 일반철도로서 요구되는 동적성능을 만족한다는 사실을 밝혀냈다.

국토해양부에서 발행한 “2006년도 전국 교량 및 터널현황”에 따르면 전체 철도교량 2,699개소 중 일반철도는 2,594개소, 고속철도는 105개소로 구분되며 이 중에서 강관형교가 30.3%를 차지하고 있는 반면 강박스(steel box girder) 철도교는 불과 0.2%로 그 수가 매우 적고 연구사례 또한 거의 전무한 실정이다.

이 논문에서는 기존에 연구되지 않은 강박스 철도교에 대해 고속 및 일반 열차 주행시에 변위계와 가속도계를 이용한 실측을 통하여 대상 교량의 동적응답(dynamic response)을 분석하고 동적특성(dynamic characteristics)을 평가하는데 목적이 있다.

2. 철도교 설계기준

국내의 철도관련 설계기준은 기존선에 대한 설계기준과 고속철도 교량에 대한 설계기준으로 구분되어 있으며, 기존선의 설계기준인 철도교설계기준에서는 고유진동수 한계나 진동가속도에 대한 제한 등과 같은 기준은 제시되어 있지 않고, 사용성과 주행안정성을 확보하기 위한 처짐제한 기준만이 제시되어 있다. 철도교의 동적사용성과 관계되는 시방기준의 경우, 국내에서 적용되고 있는 기준으로는 프랑스에서 제시된 고속철도 기준인 BRDM(bridge design manual)이 유일하며, 국외의 관련 기준으로는 UIC code 및 Eurocode, 프랑스 기준인 CTRL technical standard 등이 있다⁽¹⁰⁻¹²⁾.

Table 1은 국내의 철도설계기준에서 적용하고 있

는 허용처짐과 충격계수를 정리한 것으로 특히, 허용처짐은 열차의 주행속도에 따라 규정하고 있다(한국철도시설공단, 2004). 이것은 열차의 주행속도(V)와 교량의 지간길이(L)에 의해서 교량의 진동지속시간을 부분적으로 고려하여 동적사용성을 규정하고자 하는 의미를 포함하고 있다. 또한 열차주행 안정성을 높이며 공진의 가능성을 배제하기 위하여 열차의 주행속도가 증가함에 따라서 더욱 엄격한 허용처짐기준을 적용하고 있다.

다양한 종류의 열차 및 각 열차의 축 간격에 의해 설계속도 내에서 공진 발생시 시방기준상 충격계수를 충분히 상회할 수 있으며, 이때의 응답은 감쇠비에 따라 매우 커질 수 있다⁽⁴⁾. 이와 같은 경우 단순한 충격계수 검토가 아닌 처짐, 가속도 등 다양한 정량적인 값에 대하여 구조적으로 충분히 안정성을 확보하고 있는지 검토하여 전체 교량 구조물의 안정성을 평가하여 합리적인 설계를 도출하여야 한다.

바닥판의 단부격임각, 연직가속도 등은 교량의 안정성 및 궤도와 밀접한 관계로 동적 성능과 사용성 평가 시 검토해야할 항목이며, 구조적 안전성과 더불어 승차감 등 사용성과도 밀접한 관계인 연직처짐에 관하여 Eurocode에서는 Fig. 1과 같이 속도별, 지간별로 규정하고 있다. 국유철도건설규칙 1급선의 200 km/h 열차속도를 지지하는 철도교량은 지간길이 및 구조형식에 따라 Fig. 2와 같은 UIC 776-1R Appendix 102의 고유진동수의 상한 및 하한 범위 내에 들도록 설계하는 것을 권장한다.

감쇠비는 공진속도에서의 교량의 동적거동에 가장 큰 영향을 미치는 변수로써 교량의 거동에 매우 민감한 영향을 미치게 되며, 1990년대 초반에 수행된

Table 1 Vertical deflection criteria in the domestic

Classification		Criteria	
Verticality deflection (δ_{max})	Span length Velocity(km/h)	$0 < L < 50$ m	$L \geq 50$ m
	$V \leq 120$	L/800	L/700
	$120 < V \leq 150$	L/1100	L/900
	$150 < V \leq 200$	L/1600	
Impact factor(<i>i</i>)		$L \leq 18$ m	$L > 18$ m
		$45-L^2$	$24+240/(L-0.6)$

경부고속철도 교량구조물의 동적거동분석에서는 2.5% ~ 7.5%의 감쇠비가 사용되었다⁽⁴⁾. 이러한 감쇠비

는 실제 교량구조물의 실측을 근거로 산정된 것이 아니고, 일반적으로 알려진 콘크리트 구조물의 감쇠비를 기준으로 추정된 값이다. Fig. 3은 감쇠비 산출식과 예를 나타낸 것이다.

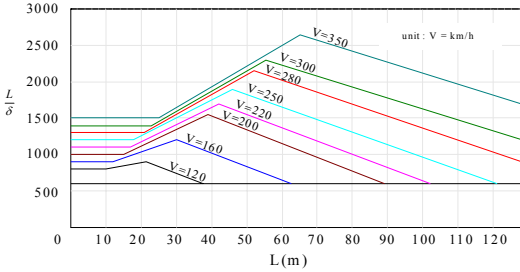


Fig. 1 L/δ criteria in the Eurocode

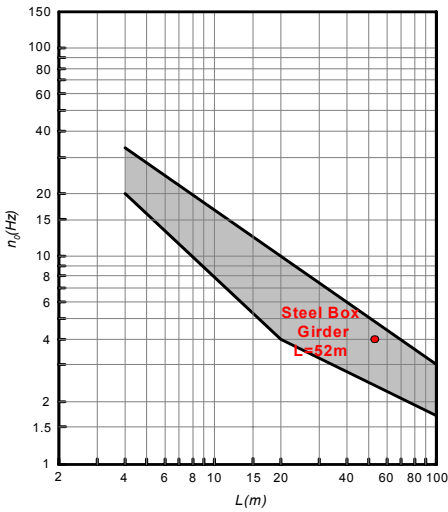


Fig. 2 The upper limit and lower limit natural frequency on span length

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \times 100 = \frac{1}{2\pi \times 10} \ln \frac{0.0227}{0.0081} \times 100 = 1.6409\%$$

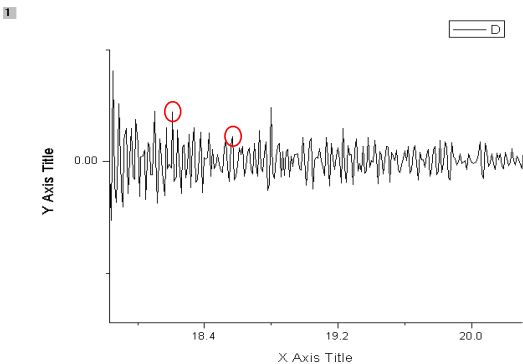


Fig. 3 Damping ratio calculation example

3. 열차하중에 대한 진동응답실험

3.1 실험대상 교량

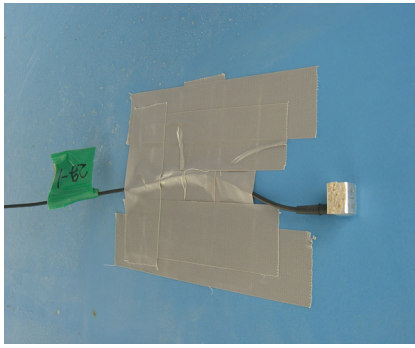
실험 대상의 강박스 철도교는 복선 철도교량으로 호남선상에 위치하고 있으며, 교량의 총 연장은 298m로 콘크리트 라멘교(129 m)와 강박스교(169 m)가 연계된 2가지 형식으로 이루어져 있다. 강박스 철도교량의 총 연장은 169 m(52 m + 65 m + 52 m)이며 자갈도상과 콘크리트 침목으로 구성되어 있다. Fig. 4는 실험대상 교량의 전경이다.

3.2 실험개요 및 실험측정

이 교량의 동적거동 특성을 분석하기 위하여 4종류의 열차(KTX, 무궁화, 새마을, 화물)가 운행 될 때 가속도와 변위 응답을 실시간으로 측정하였으며, 열차 통행시 가속도계 2개를 설치하고 변위계는 지



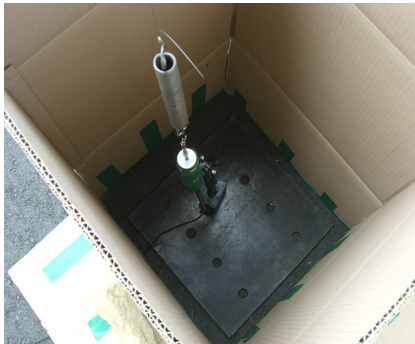
Fig. 4 Steel box bridge and ballast track



(a) Acceleration



(b) LVDT(end)



(c) LVDT(center)



(d) Speed Gun

Fig. 5 Monitoring sensors set up and measurement

간 중앙에 2개, 단부측에 2개를 설치하였다. 실험시 진동 응답은 100 Hz의 sampling rate로 측정하였다. 실험의 대상경간의 선정은 대상 교량의 구조적 특성 및 계측의 편의성, 센서 부착 및 측정장비의 설치, 철도차량의 육안확보 등의 현장여건을 종합적으로 고려하여 강박스형교의 3경간을 선정하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 가속도계 및 변위계를 이용한 동적응답 측정 위치와 계측시스템을 개략적으로 보여주고 있다. 가속도를 측정하기 위해 경간의 중앙부 상선과 하선에 각각 1개의 가속도계를 설치하였다(Fig. 5(a)). 특히 단부격임각을 측정하기 위해서는 Fig. 5(b)에 보이는 것처럼 L자형 앵글을 변위계 고정대로 사용하여 지점부에 변위계 2개를 1 m 간격

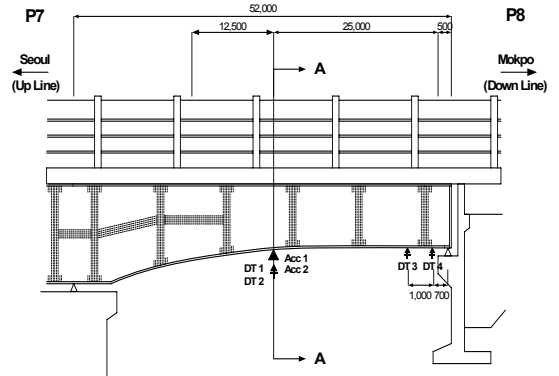


Fig. 6 Monitoring positions

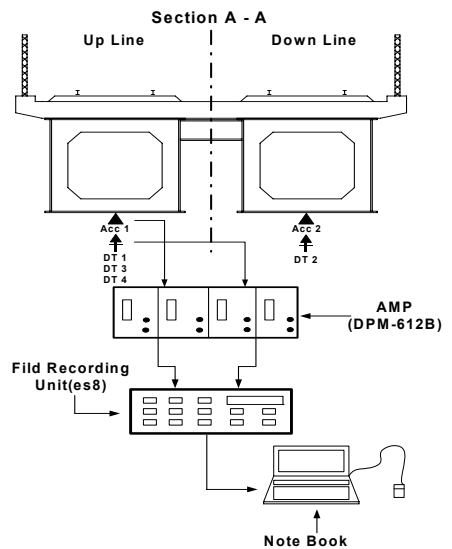


Fig. 7 Monitoring system

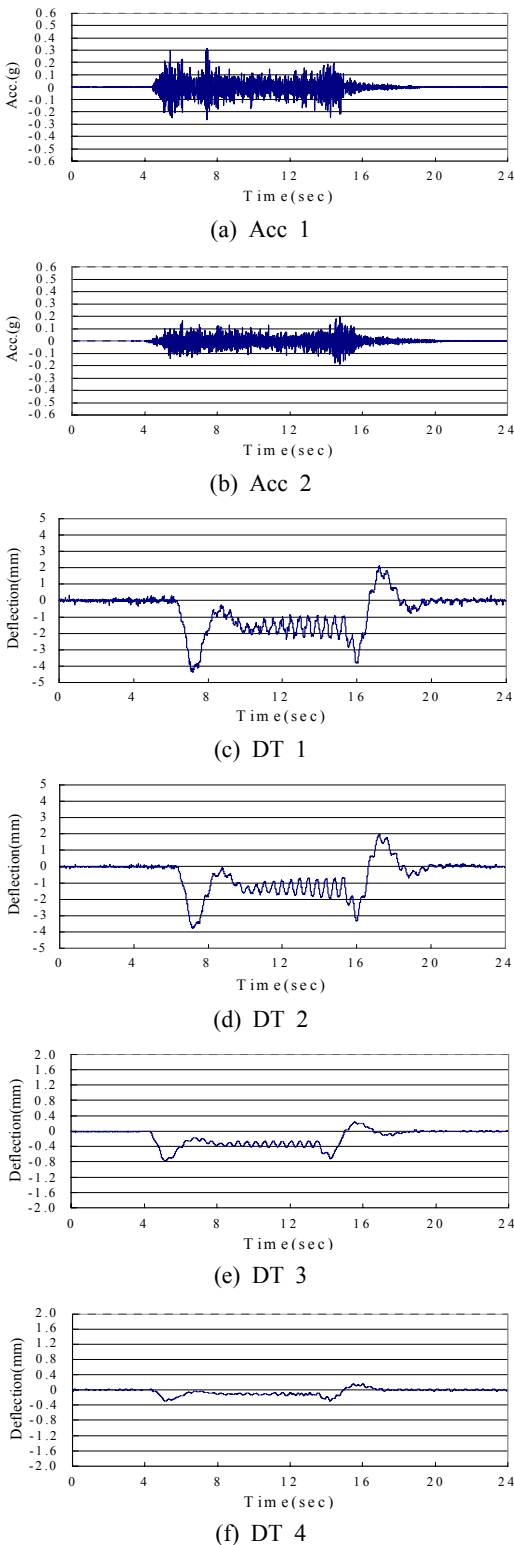


Fig. 8 Time histories by KTX train

으로 설치하였다. 중앙치짐을 측정하기 위해 Fig. 5(c)와 같은 방법으로 변위계 2개를 상선과 하선에 각각 1개씩 설치하였다.

Fig. 5(d)는 열차주행속도를 측정하는 모습으로 기존의 연구들에서는 열차의 주행속도를 측정하기 위해서 계측된 변위 응답 시간이력부터 열차의 차륜간격을 고려하는 간접적인 방법을 사용하였으나 이 연구에서는 스피드건(bushnell speedster sports radar gun)을 사용하여 열차의 주행속도를 직접 측정함으로써 정확도를 높였다.

3.3 실험결과

실험으로부터 총 11대(KTX 4대, 새마을호 1대, 무궁화호 5대, 화물열차 1대)의 열차를 대상으로 주행시 가속도응답과 치짐응답을 실시간으로 계측하였다. 열차종별에 따른 각 열차의 최대속도를 스피드건으로 측정된 결과, KTX의 경우 144 km/h, 새마을호의 경우 56 km/h, 무궁화호의 경우 113 km/h, 화물열차의 경우 67 km/h로 각각 측정되었다. 새마을호의 경우 56 km/h로 주행한 이유는 실험교량이 공용역과 근접해 있어 정차를 위해 속도를 감속한 것이 원인이라 판단된다. Fig. 8은 KTX 열차주행에 따른 가속도 및 치짐 진동응답을 그래프로 나타내었다. Acc 1과 Acc 2는 가속도 응답이며, DT 1~DT 4는 계측위치별로 변위계의 진동응답을 나타내었다.

(1) 연직치짐 및 연직가속도 분석

교량 상판의 연직가속도는 과도한 응답이 발생시 도상의 교란 및 궤도틀림을 유발할 수 있어 주행안전성에 있어 반드시 검토되어야 하는 부분이다. BRDM 및 CTRL 규정에는 유도상 궤도의 경우 0.35 g, 콘크리트 슬래브궤도의 경우 0.50 g로 그 제한 값을 규정하고 있다.

Table 2는 열차주행에 따른 연직치짐 및 연직가속도 응답을 정리한 결과이고, Fig. 9는 열차 주행속도에 따른 가속도 크기를 그래프로 나타내었다. 여기서, K, S, M, F는 각각 KTX, 새마을, 무궁화, 화물 열차를 의미하고, 팔호 안의 U는 상행을 D는 하행을 의미한다.

화물을 제외한 3종류의 열차 주행시 설계기준 BRDM 및 CTRL 규정에서 제시한 유도상 궤도의 경우 0.35g를 초과하는 최대치 0.49g를 포함한 총

6회의 값들이 측정되었으며, 이 값들은 열차 진행방향 직하부 steel box 하부 flange에 설치한 가속도계에서 얻어졌다. KTX와 새마을호는 1회를 제외한 다른 값들은 모두 제한값에 만족하였으나, 무궁화호는 측정치 10회 중 4회의 측정치가 제한값을 초과하는 것으로 다른 종류의 열차주행시 얻어진 응답에 비해 상대적으로 큰 가속도 값이 측정되었다. 연직처짐은 Table 1에서 제시한 기준과 같이 철도설계기준 L/1600(30.1 mm)을 적용하였다. 실험대상교량의 최대 연직처짐은 4.86 mm로 설계기준에 충분히 만족하고 있으며, 연직처짐에 대한 동적안정성은 확보하고 있는 것으로 나타났다.

(2) 고유진동수 및 감쇠비 분석

연구대상 강박스 철도교량의 가장 기본적인 동특성인 고유진동수(natural frequency)를 분석하기 위하여 경간의 1/2 지점의 상선(Acc 1)과 하선(Acc 2)에서 연직방향 가속도 응답을 동시에 계측하였다.

계측된 자유진동 부분의 시간이력 data는 상용프로그램인 OriginPro를 사용하여 FFT 분석되었으며, 이로부터 실측 고유진동수를 산출한 후 설계기준치와 비교하여 교량의 동적안정성과 사용성을 검토하였다.

UIC-code 776-1에 명시되어있는 1st mode 고유진동수의 하·상한치 기준에 따라 시간 48.3 m(경간장 52 m)인 이 교량의 고유진동수 적정범위는 다음과 같다. 여기에서 L은 시간장으로써 “m” 단위를 갖는다.

Low Level :

$$n_l = 23.58 \times L^{-0.592} \\ = 23.58 \times 48.3^{-0.592} = 2.37 \text{ Hz}$$

High Level :

$$n_h = 94.76 \times L^{-0.748} \\ = 94.76 \times 48.3^{-0.748} = 5.21 \text{ Hz}$$

Stability Area :

$$2.37 \text{ Hz} \leq n \leq 5.21 \text{ Hz}$$

Table 2 Deflection and acceleration on train loading

Train	Velocity (km/h)	Deflection		Acceleration(g)	
		DT 1	DT 2	Up line	Down line
S(D)	56	2.94	3.06	0.09	0.49
K(U)	107	3.44	3.01	0.12	0.11
K(D)	74	2.99	3.49	0.07	0.17
M(D)	58	2.60	3.02	0.12	0.49
M(U)	101	4.83	4.46	0.41	0.14
K(D)	139	3.63	4.28	0.12	0.46
K(U)	144	4.37	3.77	0.31	0.20
M(U)	82	4.86	4.47	0.49	0.25
M(U)	113	2.98	2.53	0.39	0.20
M(D)	84	3.42	4.12	0.10	0.26
F(U)	67	-	-	0.07	0.05
Criteria (France)	0.35	Maximum value	0.49	Ratio (%)	0.35/0.49 = 1.4(N.G)

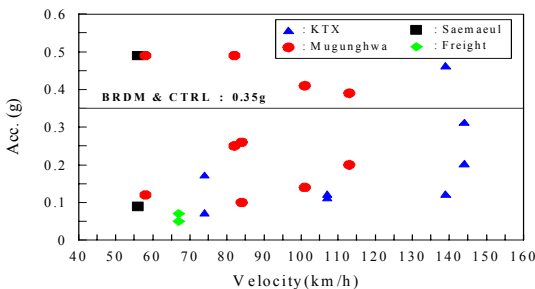


Fig. 9 Acceleration responses on train velocity

고유진동수의 하한치 기준은 교량이 과도하게 유연하여 발생할 수 있는 승차감의 저하 등 사용성의 저해를 방지하기 위함이다. 특히 신형식 철도교량과 같이 장경간/유연화 된 교량의 경우 하한치에 대한 검토는 필수적인 요소이다. Table 3에는 열차가 주행하면서 발생된 가속도 응답을 주파수 분석하여 얻은 고유진동수와 감쇠비 결과를 정리하였다.

Fig. 10 ~ Fig. 13은 열차종별에 따른 고유진동수이다. 상용프로그램인 OriginPro를 사용하여 분석한

Table 3 Natural frequency and damping ratio on train classification

Train	Pass time	Natural frequency		Damping ratio(%)	
		Acc 1	Acc 2	Up line	Down line
S(D)	12:55	2.62	2.78	1.75	1.71
K(U)	13:05	-	-	-	-
K(D)	13:13	2.65	2.77	2.66	2.13
M(D)	13:14	3.02	2.81	1.84	1.53
M(U)	14:03	2.65	2.45	2.08	2.35
K(D)	14:40	2.63	2.93	1.46	1.39
K(U)	15:04	2.79	2.84	1.27	1.26
M(U)	15:20	2.60	3.34	1.34	1.35
M(U)	15:45	2.80	2.97	2.84	2.75
M(D)	16:19	2.92	2.73	2.42	2.43
F(U)	16:20	2.85	2.92	2.14	2.05

FFT결과 실험대상교량의 고유진동수는 2.45 Hz~3.34 Hz로 나타났으며, 이는 UIC-code 776-1에 명시 되어

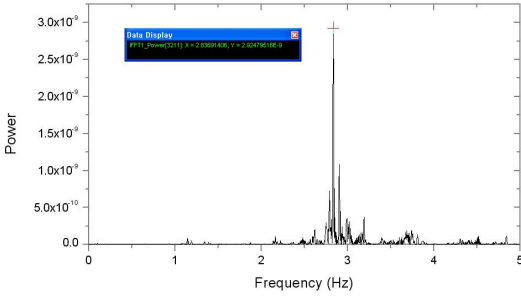


Fig. 10 KTX train natural frequency : 2.84 Hz

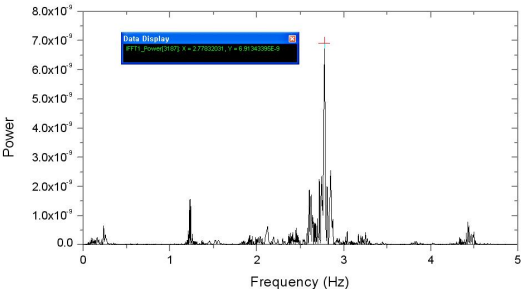


Fig. 11 Saemaul train natural frequency : 2.78 Hz

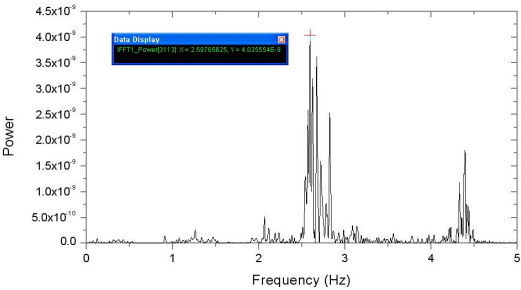


Fig. 12 Mugunghwa train natural frequency : 2.60 Hz

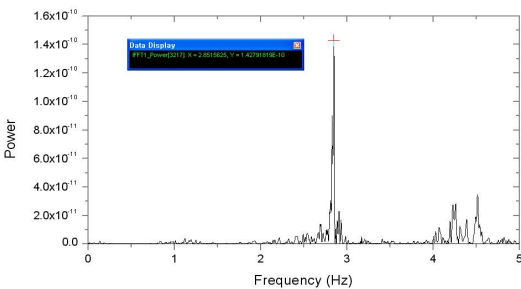


Fig. 13 Freight train natural frequency : 2.85 Hz

있는 1st mode 고유진동수의 하·상한치 기준 내에 만족하는 것으로 나타났다. 감쇠비 분석 결과 열차 주행시 감쇠비의 범위는 1.26%~2.84%로 무궁화(15:45) 열차주행시 2.84%의 최대 감쇠가 일어나는 것으로 나타났다. Table 3에는 열차가 주행하면서 발생된 가속도 응답을 주파수 분석하여 얻은 고유진동수와 감쇠비 결과를 정리하였다.

(3) 단부꺾임각 분석

교량의 단부 거더 처짐 정도를 파악하여 철도차량 주행 시 측정된 데이터를 이용해 각 열차종별 단부꺾임각을 구하였다. 단부꺾임각의 결과를 식 (1)의 꺾임각 산정식으로 구해 Table 4 및 Fig. 14~Fig. 15와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 (\tan \theta) &= \frac{(DT_b - DT_a)}{DT_i} \\
 \Rightarrow \theta &= \arctan \cdot \frac{(DT_b - DT_a)}{DT_i}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, θ 값은 라디안(Radian) 이며,
 DT_a = DT 3 변위량(mm)
 DT_b = DT 4 변위량(mm)
 DT_i = DT 3, DT 4와의 거리(mm)

Fig. 14는 화물열차 주행시 단부측의 처짐 시간이력 그래프이며 Fig. 15는 Fig. 14로부터 산정한 단부꺾임각 시간이력 그래프이다. Fig. 16은 열차종별 단부꺾임각의 크기를 나타내었고, KTX(13: 05) 주행에서 측정된 값은 노이즈가 심하여 단부꺾임각

Table 4 End slope deflection on train classification

Train	Pass time	End slope deflection (rad×10 ⁻³)	Reference
S(D)	12:55	0.47	Criteria (France) ≤ 6.5×10 ⁻³
K(U)	13:05	-	
K(D)	13:13	0.51	
M(D)	13:14	0.61	
M(U)	14:03	0.42	Maximum value 0.78×10 ⁻³
K(D)	14:40	0.42	
K(U)	15:04	0.63	
M(U)	15:20	0.56	Ratio(%) 0.78/6.5= 8.3
M(U)	15:45	0.43	
M(D)	16:19	0.43	
F(U)	16:20	0.78	

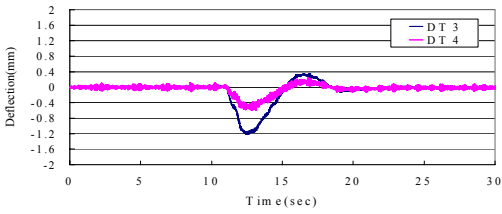


Fig. 14 Displacement of DT 3 and DT 4

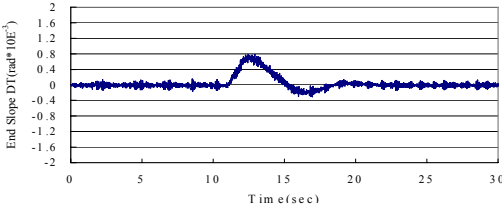


Fig. 15 End slope deflection

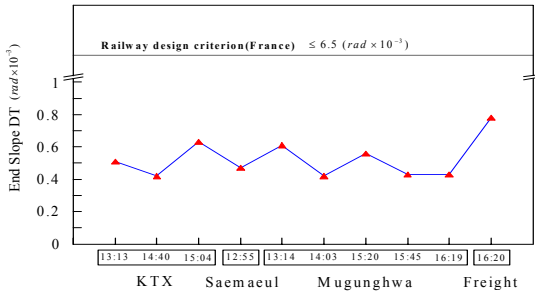


Fig. 16 End slope deflection magnitude on train classification

산정에서 제외시켰다. 궤도와 밀접한 관계를 가지고 있는 단부격임각은 동적성능평가시 최대치가 $0.78 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 으로 측정되었다. 측정치들은 단부격임각 제한값의 7%~12% 수준인 $0.42 \times 10^{-3} \text{ rad} \sim 0.78 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 으로 규정을 충분히 만족하고 있는 것으로 판단된다.

(4) 충격계수 분석

교량의 충격계수는 교량의 노면조도, 차량의 주행 속도, 시간장, 고정하중과 활하중의 비, 구조적 특성 등의 다양한 인자들에 의하여 결정된다. 이러한 동적인 특성을 보여주는 교량의 실제 충격계수를 구하기 위하여 열차 주행 시 계측된 처짐시간이력을 이용하였다. 충격계수의 산출은 변위계가 설치된 주행 위를 주행하는 상행열차를 대상으로 고려하였다. 열차종별로 시간중앙 지점(DT 1, DT 2)에서 계측

Table 5 Impact factor(*i*)

Train	Pass time	Impact factor(<i>i</i>)		Criteria
		DT 1	DT 2	
S(D)	12:55	0.06	0.07	0.29
K(U)	13:05	0.14	0.10	
K(D)	13:13	0.07	0.16	
M(D)	13:14	0.07	0.09	
M(U)	14:03	0.11	0.09	
K(D)	14:40	0.12	0.15	
K(U)	15:04	0.20	0.16	
M(U)	15:20	0.08	0.06	
M(U)	15:45	0.10	0.06	
M(D)	16:19	0.08	0.09	

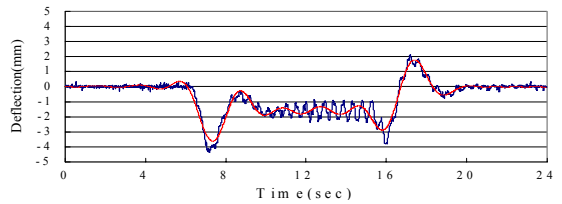


Fig. 17 Filtering for impact factor

된 처짐시간이력 DT 1과 DT 2에 low pass filter의 범위를 moving averaging 필터링하여 구한 정적응답곡선 DT 1을 비교하여 실측 충격계수를 산출하는 방법을 사용하였다. 실험대상 교량의 시간장은 48.3 m이므로 이론적인 설계충격계수는 Table 1에 제시된 식을 이용하여 $i=0.29$ 로 얻어졌다. 실측 충격계수 산출을 위하여 식 (2)를 사용하여 Table 5와 Fig. 17에 나타내었다.

$$i = \frac{DT1_{dyna} - DT1_{sta}}{DT1_{sta}} \quad (2)$$

실험 대상교량의 실측 충격계수는 KTX(15:04) 주행시 측정된 0.20이 최대 충격계수로 분석되었다. 충격계수는 국내의 철도설계기준에서 제시하고 있는 설계기준 0.29를 충분히 만족하여 동적안정성은 충분히 확보하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

열차하중에 따른 강박스 철도교량의 동적응답특성을 평가하기 위하여 대상교량의 동특성 분석을 위한 연직처짐 및 연직가속도, 고유진동수 및 감쇠비, 단부격임각, 충격계수를 분석하였다.

이 연구에서 실험대상교량의 처짐 및 가속도 응답 측정 결과, 최대 연직처짐은 4.86 mm로 설계기준 30.1 mm를 충분히 만족하고 있으며, 연직처짐에 대한 동적안정성은 확보하고 있는 것으로 나타났다. 가속도 응답의 경우 설계기준 BRDM(bridge design manual), CTRL에서 제시한 유도상 궤도 제한값 0.35 g를 초과하는 값들이 6회 측정되었으며, 최대치는 0.49 g로 화물열차를 제외한 3종류(KTX, 새마을, 무궁화)의 열차에서 측정되었다. KTX와 새마을호는 1회를 제외한 다른 값들은 모두 제한값을 만족하였으나, 무궁화호는 측정치 10회 중 4회가 제한값을 초과하였으며, 다른 종류의 열차주행시 얻어진 응답에 비해 상대적으로 큰 가속도 값이 측정되었다. 총 6회의 측정치를 제외하고는 steel box girder 철도교의 경우 다양한 열차주행에 대해 동적안정성과 사용성을 부분적으로 확보하고 있는 것으로 나타났다. 가장 기본적인 동특성인 고유진동수(natural frequency)를 분석한 결과, 3 Hz 내외로 UIC-code 776-1에 명시되어있는 1st mode 고유진동수의 하·상한치 기준 내에서 만족하는 것으로 평가되었으며, 감쇠비는 1.26%~2.84%의 범위로 측정되었다. 궤도와 밀접한 관계를 가지고 있는 단부격임각은 동적성능평가시 최대치가 0.78×10^{-3} rad으로 측정되었다. 이는 단부격임각 제한값에 7~12% 수준인 0.42×10^{-3} rad~ 0.78×10^{-3} rad으로 규정을 충분히 만족하고 있어 충분한 사용성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 실측 충격계수를 분석한 결과, 최대치는 KTX(15:04) 주행시 $i=0.20$ 으로 분석되었다. 이는 국내의 철도설계기준에서 제시하고 있는 설계기준 0.29를 충분히 만족하는 것으로 동적안정성을 충분히 확보하고 있는 것으로 나타났다.

고유진동수, 연직처짐, 단부격임각, 충격계수에서는 다양한 열차주행에 대해 동적 안정성과 사용성을 충분히 확보하고 있는 것으로 평가되었으나, 연직가속도의 경우 진동가속도 응답을 감소시키기 위해 열차량수와 주행속도에 관련된 연구가 더욱 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Korea Rail Network Authority, 2004, Railway Design Criterion, Civil.
- (2) Korea Rail Network Authority, 2004, Railway Design Criterion, Railway Bridge.
- (3) Choi, J. Y. and Oh, J. T., 2002, "Comparison·Consideration Subjected to Railway Design Criterion," Journal of the COSEIK, Vol. 15, No. 4, pp. 32~44.
- (4) Choi, E. S., Shin, H. S., Kwark, J. W. and Kim, B. S., 2000, "Field Test on Damping Value of Bridge in High-speed Railway," Proceedings of the KCI Annual Autumn Conference, pp. 751~756.
- (5) Jung, J. M., 2005, "A Study on the Dynamic Characteristics of KTX Bridge Using Long Term Health Monitoring System," Master Thesis, Seoul-Tech University.
- (6) Cho, E. S., Kim, H. M., Hwang, W. S. and Oh, J. T., 2006, "Dynamic Characteristics of Railway Plate Girder Bridges with Increase of Diesel Locomotive Speed," Journal of KSSC, Vol. 18, No. 6, pp. 769~781.
- (7) Oh, J. W., 2008, "Dynamic Behavior and Resonance Reduction of Two-span Continuous Bridges for Korean Train Express," Journal of KSCE, Vol. 28, No. 1A, pp. 95~104.
- (8) Kim, S. I., Lee, P. G., Lee, J. W. and Yeo, I. H., 2006, "Dynamic Behavior of the Prestressed Composite Girder by Modal Tests and Moving Train Analysis," Journal of KSSC, Vol. 18, No. 6, pp. 793~804.
- (9) Lee, Y. S., Kim, I. J. and Oh, S. K., 2009, "Free Vibration Analysis of Stiffened Tapered Thick Plates with Concentrated Masses," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 828~837.
- (10) Channel Tunnel Rail Link, 1999, Technical Design Standard Loading & Particular Criteria for CTRL Railway Bridges, CTRL.
- (11) SYSTRA, 1995, Bridge Design Manual (BRDM) Final Report, Korea High Speed Rail Construction Authority, KHRC.
- (12) UIC Code 776-1R, 1994, Loads to be Considered in Railway Bridge Design, 4th Edition, International Union of Railway.