



강박스거더 철도교량의 동적거동 및 진동저감 방안 분석

황의승^{1*} · 김도영² · 장성호³

¹경희대학교 사회기반시스템공학과, ²경희대학교 사회기반시스템공학과, ³경희대학교 사회기반시스템공학과

Analysis of Dynamic Response and Vibration Mitigation for Steel Box Girder Railway Bridges

Hwang, Eui Seung^{1*}, Kim, Do Young², Jang, Seong Ho³

¹Professor, Department of Civil engineering, Kyung Hee University, Yongin, 17104, Korea

²Ph.D Student, Department of Civil engineering, Kyung Hee University, Yongin, 17104, Korea

³Former Graduate Student, Department of Civil engineering, Kyung Hee University, Yongin, 17104, Korea

Abstract - Recently rapid-transit railway systems have been constructed in many developing countries due to its advantages in congestions and environmental problems. Railway bridges show many different aspects compared to road bridges and passenger comfort and traffic safety are one of them. In particular, deflection and acceleration due to repeated vibration characteristics have a structural weakness that can cause undesirable response. Especially steel railway bridges have been known to have weaknesses due to its relatively light weights compared to concrete bridges. The purpose of this study is to analyze the dynamic response of steel box girder bridges due to passing trains then propose the appropriate method to mitigate the level of vibration in terms of accelerations. Three steel railway bridges are tested and the numerical model to analyze the dynamic response of the bridge by passing train are developed. For the verification of the model, the natural frequency extracted using the acceleration data measured in the bridge is compared with the natural frequency of the numerical model. To mitigate the acceleration level of the bridge, parametric studies are performed to find the effectiveness of the method. Based on the analysis, the appropriate method is proposed for decreasing the acceleration of the bridge for passenger comfort and traffic safety.

Keywords - Dynamic response, Steel box girder railway bridge, Vibration mitigation

1. 서론

최근 많은 국가에서 교통체증, 환경문제 등으로 철도 인프라 구축에 대한 관심이 높아지고 있으며, 특히 고속철도의 운행은 철도분야의 발전을 이끌고 있다. 한국에서도 고속철도 교통 네트워크구축이 계획되고 진행 중에 있다.

우리나라의 경우 지형의 특성상 많은 교량과 터널이 건설되어 있으며 철도상 교량의 수는 3,025개이다. 교량의 총연

장은 전체 철도선로의 연장 2,185,312km 중 429,184km로 전체의 20%를 차지하고 있다^[1]. 도로교와 철도교는 주행하는 차량으로 인해 교량구조에 진동과 처짐을 갖게 되는데, 철도교의 경우 이러한 진동과 처짐이 철도교의 구조적 안정성과 함께 사용성에 문제를 일으킬 수 있기 때문에 세심한 검토가 필요하다^{[2],[3],[4]}. 또한 열차 속도에 따른 공진 가능성은 설계단계에서 반드시 검토해야할 문제이다^[5].

여러 가지 형식의 철도 교량중 강교는 강성 대비 중량이 콘크리트교보다 상대적으로 가볍기 때문에 진동에 취약할 수 있다. 본 논문의 목적은 강박스거더 철도교량의 열차 주행에 따른 동적 거동을 분석하고 가속도 진동레벨을 감소시키기 위한 적절한 보강 방안을 제시하는 것이다. 이를 위하여 3개의 강박스거더 철도교에 대하여 여러 형식의 열차 주행에 따른 처짐 및 가속도를 장기간 측하여 설계기준에서

Note.-Discussion open until June 30, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 21, 2017; revised December 1, 2017; approved on December 2, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-201-2920 Fax. +82-31-204-8114

E-mail. eshwang@khu.ac.kr

제시하고 있는 제한값의 초과 여부를 분석한다. 또한 상용 구조해석 프로그램을 이용하여 이동하중에 의한 구조 해석 모델을 구축하고 실험 결과를 이용하여 모델의 적정성을 분석하였다. 이를 통하여 교량의 동적 거동, 즉 처짐이나 가속도의 수준을 감소시키기 위하여 단면 증대, 질량 증대, 감쇠비 증감 등에 의한 영향을 분석하고 적절한 진동저감 방안을 제시한다.

2. 현장 계측

2.1 대상 교량

교량의 동적거동 분석을 위해 현재 공용 중인 철도교량의 처짐과 가속도를 측정하였다. 대상교량은 중앙선상의 A교, B교와 경부선상의 C교이며, 모두 단경간의 강박스커터교이다. 세 교량 모두 교량 경간의 중앙에 처짐계와 가속도계를 설치하여 A교와 B교는 상행, C교는 하행으로 열차가 통과할 때의 처짐과 가속도를 측정하였다. 통과할 때 또한 열차의 운행을 측정하여 측거와 열차의 속도를 계산하였으며 각 교량에서 40일 이상 측정하였다. 계측 구간 및 기간은 Table 1과 같다. 계측 센서의 위치는 Fig. 1과 같다.

2.2 계측 결과

경간 중앙에서 측정된 처짐과 가속도를 열차의 최대 축 중량과 운행 평균속도에 따라 정리하였다. Fig. 2는 교량 A의 계측 결과로서 DT1과 ACC1은 A교, B교는 상행, C교는 하행

Table 1. Measured bridges and test overview

Bridge	Line	Period and Events	Span length
A	Jungang	160924 14:00 ~ 161103 12:00 (41 days 720 times)	35m
B	Jungang	161110 13:00 ~ 161222 13:00 (43 days 890 times)	25m
C	Kyungbu	160412 12:00 ~ 160602 13:00 (52 days 2,635 times)	40m

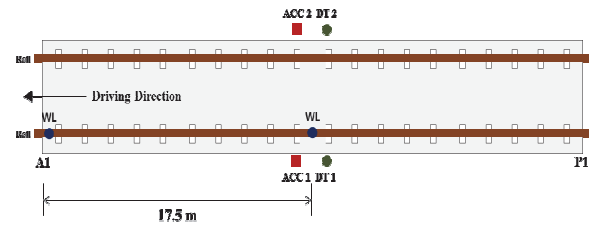


Fig. 1. Sensor location of A bridge

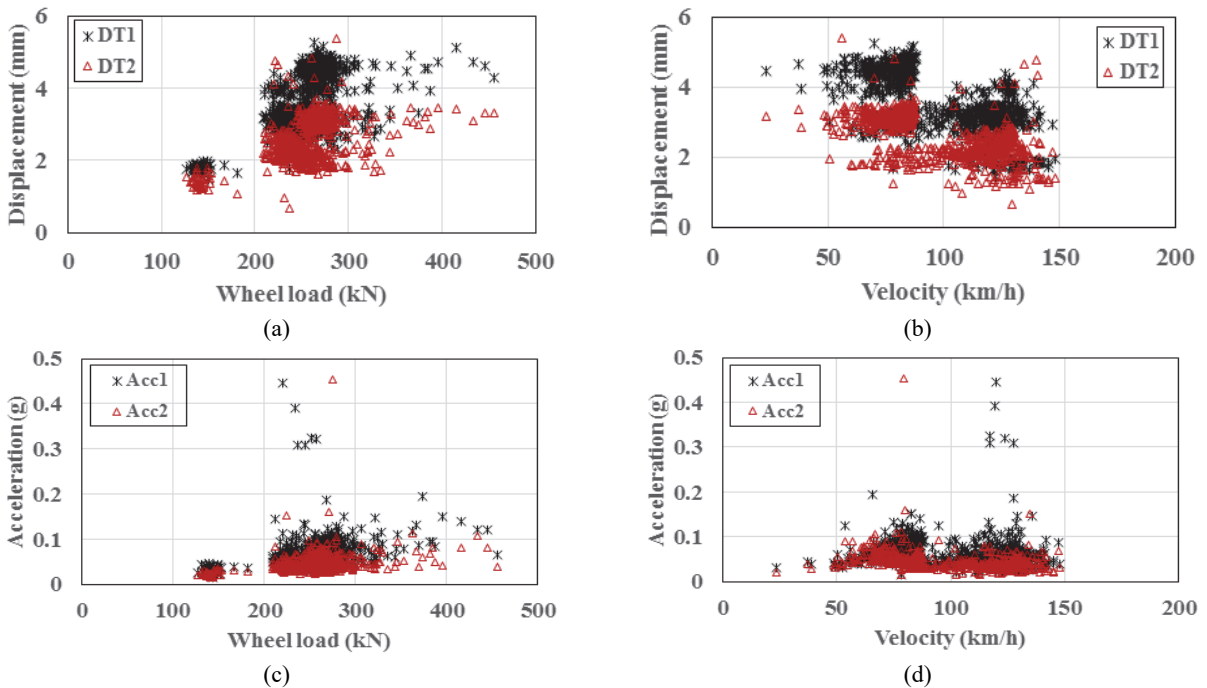


Fig. 2. Deflection and acceleration by wheel load and velocity (A bridge)

Table 2. Measurement results

		A	B	C
Velocity (km/h)	Min.	23.6	14.3	46.8
	Ave.	98.7	79.0	108.7
	Max.	148.0	112.0	137.0
Axle load (kN)	Min.	127.5	117.9	93.3
	Ave.	254.1	257.2	184.1
	Max.	455.9	528.9	570.9
	C.O.V	0.159	0.170	0.190
DT (mm)	Min.	1.454	0.811	1.334
	Ave.	3.615	2.199	4.450
	Max.	5.247	3.056	8.392
	C.O.V	0.234	0.207	0.244
ACC (g)	Min.	0.016	0.007	0.022
	Ave.	0.067	0.105	0.052
	Max.	0.446	0.607	0.307
	C.O.V	0.523	0.892	0.354

의 처짐과 가속도, DT2와 ACC2는 반대 방향의 처짐과 가속도를 나타낸다. 각 교량에서 측정된 평균속도, 최대 축중량, 처짐, 가속도 값을 Table 2에 정리하였다.

2.3 설계기준값과의 비교분석

철도 교량에서는 주행안전성과 승차감으로 사용성을 검토한다^[6]. 철도설계기준(노반편)^[7]에 따르면 주행안전성 기준은 동적 구조해석 및 현장 계측 시에 열차하중에 의해 발생하는 교량 상판의 최대 연직가속도는 자갈궤도의 경우 0.35g, 콘크리트 궤도는 0.50g를 초과해서는 안 된다. 또한 연직처짐은 충격계수가 고려된 표준 열차 하중이 불리하게 재하된 상태에서 $\frac{L}{600}$ 로 고속열차의 동적 안전성 등을 포함하는 열차의 안전 확보를 위한 최소요구 조건이다. 승차감 확보에 대해서는 연직 처짐에 대한 검토를 수행하며 교량의 경간에 따라 제한 값이 다르게 나타난다^{[8],[9]}.

기준값을 계측값과 비교하여 Table 3에 정리하였다. 처짐의 경우는 세 교량 모두 기준값에 미치지 못하지만 가속도의 경우는 중앙선상의 두 교량 모두 127%, 173%로 기준값을 초과하였고 C교량 역시 87.7%로 기준값에 매우 가까운 값으로 나타났다.

Table 3. Comparison with design criteria

			A	B	C
Traffic safety	DT (mm)	Measurements	5.247	3.056	8.392
		%	9.00	7.33	12.59
		Design values $L/600$	58.33	41.67	66.67
	ACC (g)	Measurements	0.446	0.607	0.307
%		127.43	173.33	87.71	
Design values		0.35	0.35	0.35	
Passenger comfort	DT (mm)	Measurements	5.247	3.056	8.392
		%	26.24	18.34	39.87
		Design values $= L/1750$	20.00	16.67	21.05
		$= L/1500$	$= L/1500$	$= L/1900$	

3. 해석 모델 구축 및 비교

3.1 해석 모델

본 연구에서는 강박스거더 철도교량의 동적거동 분석을 위하여 각 교량을 상용프로그램(Midas Civil 프로그램)을 이용하여 모델링하였다(Fig. 3). 강박스와 슬래브의 경우는 Plate Element, 가로보의 경우는 Beam Element를 사용해 모델링 하였으며, 동적해석의 정확도를 높이기 위해 2차 고정하중인 자갈도상, 침목, 레일 자중을 추가하였다. 철도설계기준(노반편)의 2차 고정하중의 값은 Table 4와 같다.

하중은 계측결과와의 비교를 위하여 실제 계측된 축 중량과 축간 거리를 사용해 열차하중을 생성해 해석에 사용하였

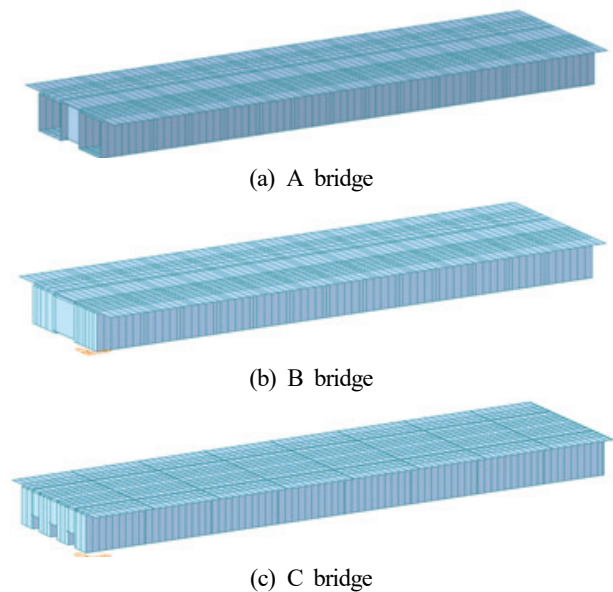


Fig. 3. Modeling of bridges

Table 4. Secondary dead load

Rail (Including fasteners)	1.5 kN/m
Sleeper	For general railway 4.1 kN/m
	For high-speed railway 5.0 kN/m
Ballast	19 kN/m ³
Sub-ballast	16 kN/m ³
Concrete slab	24.5 kN/m ³
Concrete sub-slab	24.5 kN/m ³

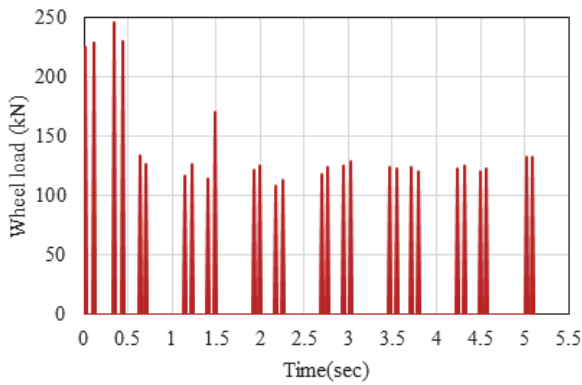


Fig. 4. Generated train load (28 axles)

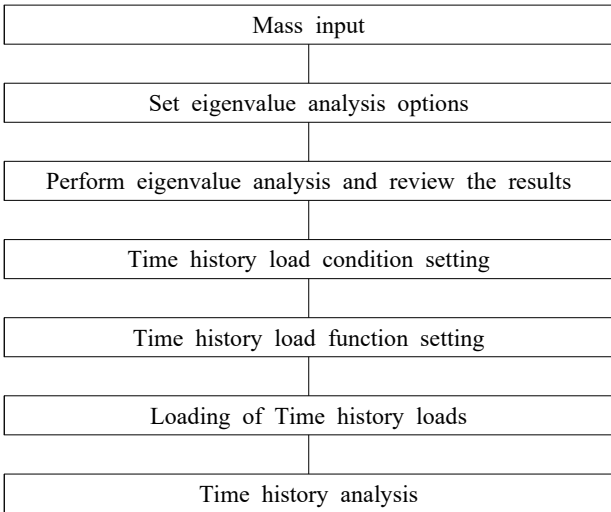


Fig. 5. Time history analysis procedure

Table 5. Natural frequency of bridges

Bridge	Measurement (Hz)	Analysis (Hz)
A	4.229	4.379
B	6.150	5.440
C	3.845	3.472

다. 생성된 하중은 Fig. 4와 같다. 고속철도선과 달리 현장 계측 교량은 일반선로 상에 위치하기 때문에 여러 종류의 열차가 운행하고 있다. 본 연구에서는 운행 빈도수가 높은 종류의 열차를 선택하였다. 중앙선에 포함된 A와 B교의 경우 28축, 32축, 86축 열차를 선정하였고, 경부선인 C교는 24축, 38축, 54축 열차를 선정하였다.

시간이력해석(Time History Analysis)은 구조물에 동적 하중이 작용할 경우에 대하여 동적평형방정식의 해를 구하는 것으로, 구조물의 동적특성과 가해지는 하중을 사용하여 임의시각에 대한 구조물의 거동(변위, 부재력 등)을 해석하는 것이다. Midas Civil을 사용한 교량의 시간이력 해석 절차는 Fig. 5와 같다. 질량 입력 방법에는 3가지가 있는데, 구조물의 질량은 Structure Mass로, 자갈도상, 침목, 레일은 Load to Mass 기능을 사용하였다. 모드중첩법을 사용한 시간이력해석은 고유치해석에 기초하므로, 반드시 고유치해석을 수행해야 한다^{[10],[11]}. 모델링과 계측값을 이용하여 구조물의 고유진동수^[12]를 구한 결과는 Table 5와 같다.

시간이력해석의 시간간격은 해석결과의 정확도에 상당한 영향을 미치는 변수이며, 시간간격의 크기는 구조물의 고차 모드의 주기, 하중의 주기와 밀접한 관계를 갖는다. 차량하중은 각 절점에서 일정시간이 지나면 사라지는 충격하중으로 고려되므로 차량하중의 주기를 정하기는 어렵다. 따라서 고려하고자 하는 최고차모드 주기의 1/10 이하의 시간간격을 입력한다. 본 연구에서는 0.001초의 시간간격을 사용하였다.

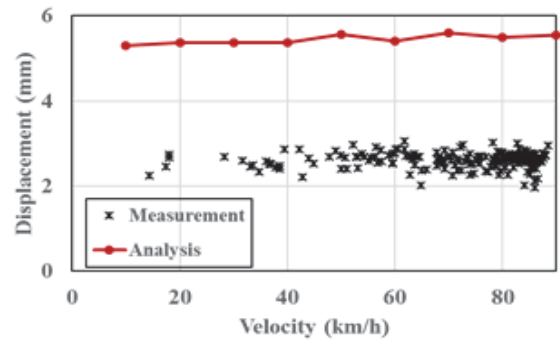
3.2 계측값과의 비교

대표적인 차량 주행에 대하여 각 교량의 계측값과 해석값을 비교하였다(Table 6). 처짐의 경우 계측 값과 해석 값의 추세가 유사한 것으로 나타났으며 C교의 경우 38축 열차가 통과할 경우 상대적으로 큰 처짐이 나타나는 것으로 해석되었지만 주행안전성과 승차감 기준은 만족하는 것으로 확인되었다. 하지만 가속도의 경우 A교에서 86축 열차가 통과할 때에는 28축, 32축 열차가 통과하는 경우와 비교했을 때 큰 가속도 값이 측정되어 이를 정밀하게 분석하기 위하여 속도별 처짐과 가속도를 동적해석을 통해 확인하였다. 동적 해석을 통해 측수에 따른 열차 운행속도 별 최대 처짐과 최대 가속도를 분석하여 정리하였다. A교 분석 결과 32축 열차 통과 시 110km/h 일 경우 최대 가속도가 3.416g로 나타나는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 6). B교의 분석 결과 28축과 86축

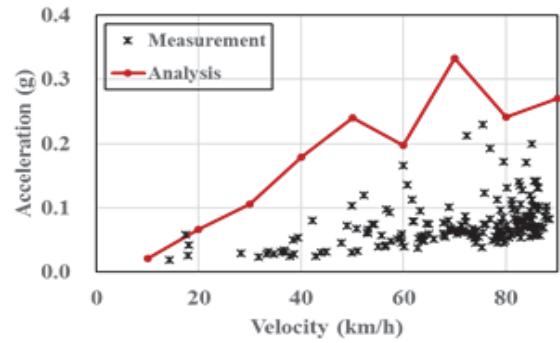
열차 하중재하 시 유사한 경향성을 보이는 것을 확인하였다 (Fig. 7). C교의 경우 24축 열차 통과 시 임계속도 294km/h 부근인 280km/h에서 가속도 1.012g, 처짐 7.935mm로 최대 멧값을 나타내었고 열차속도 가 증가할수록 최대 가속도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다(Fig. 8). 임계속도는 식 (1)을 이용하여 구하였으며 여기서, ω_1 은 교량의 첫 번째 휨 고유진동수 이고, S_{eff} 는 유효타격간격으로 새마을호, 무궁

Table 6. Comparison of the measured and analytic value

		Measured value		Analytic value	
		DT (mm)	ACC (g)	DT (mm)	ACC (g)
A	28	3.097	0.0580	4.294	1.138
	32	3.036	0.0611	4.813	0.290
	86	4.481	0.0788	7.355	0.468
B	28	1.868	0.0820	3.744	0.569
	32	1.874	0.2071	7.809	1.358
	86	2.604	0.0766	5.545	0.270
C	24	2.334	0.0331	5.291	0.098
	38	4.901	0.0536	8.747	0.100
	54	5.198	0.0531	8.532	0.093

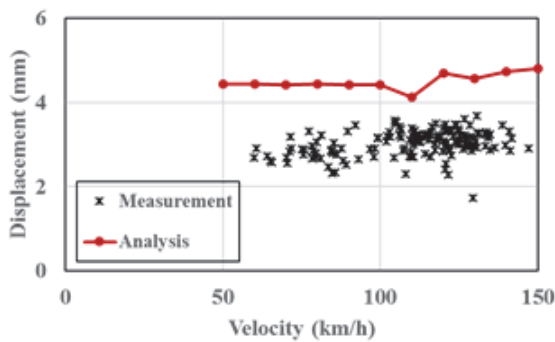


(a)

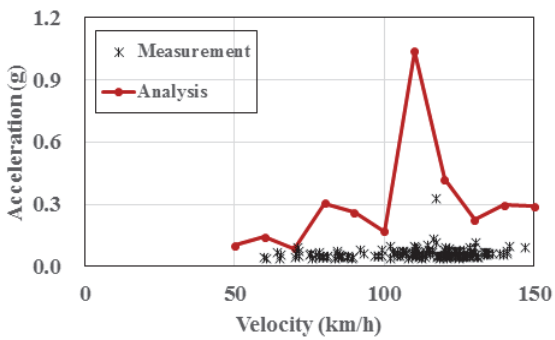


(b)

Fig. 7. Comparison of measured and analytical values (B bridge, 86-axles train)

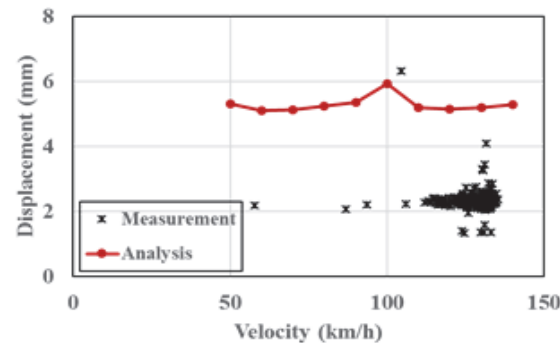


(a)

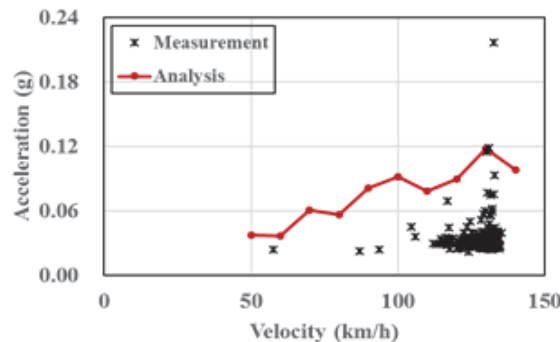


(b)

Fig. 6. Comparison of measured and analytical values (A bridge, 32-axles train)



(a)



(b)

Fig. 8. Comparison of measured and analytical values (C bridge, 24-axles train)

화호, 킬팅열차의 경우 23.5m, 화물열차는 13.95 m, KTX와 KTX 산천은 18.7m이다. 위의 24축은 유효타격간격 23.5m를 이용하여 임계속도를 계산하였다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff} \quad (1)$$

4. 진동저감 방안

이동하중을 받는 교량의 동적거동을 분석하였고, 이를 바탕으로 진동저감방안을 제안하였다. 영향을 주는 매개변수로는 교량의 슬래브 단면 변화, 질량 추가, 감쇠비 증가 등이 있고 각각의 변수에 따른 분석 결과는 다음과 같다.

4.1 슬래브 단면 두께 증가 방안

강박스거더 철도교량의 동적거동 해석 시 슬래브 단면을 250mm, 275mm, 325mm, 350mm로 변화시켜 기존의 설계단면인 300mm와 비교하여 Table 7에 정리하였다. 동적 해석 결과 처짐의 경우 주행 안전성과 승차감은 모두 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 단면 변화에 따라 처짐은 A교는 최대 6.4%, B교는 6.0%, C교는 5.9% 감소하였다. 가속도의 경우, A교는 3.6%, B교는 17%, C교는 22% 감소하였다. 슬래브 단면을 증가시키는 방안은 시공상의 난이도를 고려하면 큰 효과는 없는 것으로 판단된다.

4.2 질량 추가 방안

강박스거더 교량의 진동을 저감시키기 위해 박스 안에 콘크리트를 타설하는 방법을 모델링을 통해 검증하였다^[13]. 슬래브두께를 변화시키는 방안의 경우 구조물 전체의 강성에 영향을 주지만 콘크리트를 추가적으로 타설하는 방안의 경

우 구조물의 강성에는 영향을 주지 않는다. 본 연구에서는 15kN/m³의 단위 중량을 가진 콘크리트를 추가하는 방안 중 전체 거더에 추가하는 것과 지점 근방에만 추가하는 방안을 고려하였다. 지점 근방의 질량을 추가하는 방안은 지점으로 부터 5m떨어진 곳까지 타설하는 방안을 검토하였다. 15 kN/m³의 콘크리트를 100mm높이로 타설 시 작용되는 하중은 A교와 B교는 8.1kN/m, C교는 9.0kN/m이며 200mm

Table 8. Natural frequency of bridge after concrete filling (Hz)

Height (mm)	A		B		C	
	Hz	%	Hz	%	Hz	%
0	4.379	0	5.440	0	3.472	0
100	4.259	2.74	5.226	3.93	3.394	2.25
200	4.140	5.46	4.888	10.15	3.321	4.35

Table 9. Comparison of deflection and acceleration after concrete filling (A bridge)

Additional amount (mm)	DT (mm)	Increase (%)	ACC (g)	Decrease (%)
0	4.232	0	1.622	0
100 (whole span)	4.238	0.14	1.112	31.44
200 (whole span)	4.225	0.17	0.541	66.65
100 (5m)	4.326	-2.22	1.187	26.82
200 (5m)	4.120	2.65	1.093	32.61

Table 10. Comparison of deflection and acceleration for after concrete filling (B bridge)

Additional amount (mm)	DT (mm)	Increase (%)	ACC (g)	Decrease (%)
0	3.900	0	0.234	0
100 (whole span)	3.885	0.38	0.220	5.98
200 (whole span)	3.904	-0.10	0.128	45.30
100 (5m)	3.934	-0.87	0.223	4.70
200 (5m)	3.926	-0.67	0.192	17.95

Table 11. Comparison of deflection and acceleration for after concrete filling (C bridge)

Additional amount (mm)	DT (mm)	Increase (%)	ACC (g)	Decrease (%)
0	5.289	0	0.191	0
100 (whole span)	5.277	0.23	0.160	16.23
200 (whole span)	5.326	-0.70	0.103	46.07
100 (5m)	5.345	-1.06	0.129	32.46
200 (5m)	5.352	-1.19	0.118	38.22

Table 7. Deflection and acceleration by slab thickness variation

(mm)	A		B		C	
	DT (mm)	ACC (g)	DT (mm)	ACC (g)	DT (mm)	ACC (g)
250	4.619	2.529	4.475	0.488	5.683	0.156
275	4.414	1.724	4.201	0.304	5.518	0.144
300	4.223	1.650	4.046	0.222	5.366	0.132
325	4.089	1.480	3.920	0.206	5.202	0.126
350	3.953	1.591	3.803	0.184	5.052	0.103

Table 12. Deflection and acceleration by damping ratio (A bridge)

Damping ratio (%)	DT (mm)	Decrease (%)	ACC (g)	Decrease (%)
1	4.232	0	1.622	0
2	4.230	0.05	1.551	4.38
3	4.212	0.47	1.555	4.13

Table 13. Deflection and acceleration by damping ratio (B bridge)

Damping ratio (%)	DT (mm)	Decrease (%)	ACC (g)	Decrease (%)
1	3.900	0	0.234	0
2	3.894	0.15	0.216	7.69
3	3.889	0.28	0.209	10.68

Table 14. Deflection and acceleration by damping ratio (C bridge)

Damping ratio (%)	DT (mm)	Decrease (%)	ACC (g)	Decrease (%)
1	5.343	0	0.191	0
2	5.303	0.75	0.121	22.93
3	5.287	1.05	0.102	35.03

높이로 타설 시 A교와 B교는 16.2kN/m, C교는 18.0kN/m 이다. 기존 교량의 보강을 위하여 콘크리트 추가 타설 시 교량의 고유진동수가 변화하므로 이에 따른 임계속도 변화 역시 고려해야 한다. Table 8은 콘크리트 타설 후 교량의 고유진동수를 비교해 본 것이다. 타설량이 많을수록 질량의 증가량이 커서 고유진동수가 많이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 경간이 짧은 B교의 경우 콘크리트 추가 타설의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다. 고유진동수의 감소는 낮은 임계속도를 유발하기 때문에 타설 전 반드시 고려해야 한다.

추가 콘크리트 타설 분석 결과, Tables 9~11에서 확인할 수 있듯이 모든 교량에서 가장 큰 가속도 감소 효과를 가지는 방법은 거더 전체에 콘크리트를 타설하는 것이며 각각 66.65%, 45.30%, 46.07%의 감소효과를 보였으며, 지점부 근에만 콘크리트를 추가하는 경우 32.61%, 17.95%, 38.22%의 가속도 감소효과를 확인하였다. 처짐의 경우 콘크리트 타설 전과 비교해 3% 이상 차이 나는 효과를 볼 수 없었지만 주행안전성과 승차감 기준을 만족하지 않는 경우는 없었다. 거더 전체에 콘크리트를 추가하는 것이 진동저감 효과는 좋지만 시공상의 경제성을 떨어트릴 수 있고 고정하중의 증가로

하중의 증가를 유발할 수 있으므로 각 교량의 조건에 따라 경제적인 진동저감 방안을 사용해야 한다.

4.3 감쇠비 증가 방안

본 연구에서는 동적해석을 하기 위해 모드 중첩법을 사용하였다. 감쇠비의 영향을 검토하기 위해 감쇠비를 0.02, 0.03으로 변화시켜 해석하였다. 강합성구조물의 감쇠비 상한값은 경간 20m 이상의 교량에서 1%이므로^[7] 이 값을 기준으로 비교하였다.

감쇠비 분석 결과 감쇠비가 커질수록 처짐과 가속도 모두 감소하는 경향을 보였으며 처짐의 경우 큰 차이가 없었지만 가속도의 경우는 감쇠비가 1%에서 3%로 증가 시 A교는 약 4%, B교는 약 10%, C교는 약 35% 감소하였다. 감쇠비에 따른 각 교량의 처짐과 가속도 값을 Tables 12~14에 정리하였다.

5. 결론

이 논문은 이동하중을 받는 강박스거더 철도교량의 동적거동을 분석하고 진동저감 방안을 제시하였다. 또한 실교량의 처짐과 가속도를 측정하였고 구조해석을 수행하여 계측값과 해석값을 비교하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 세 개의 강박스거더 철도교에 대하여 주행중인 실열차에 의한 동적 거동을 계측한 결과 처짐은 설계기준상의 제한값을 만족하지만 가속도는 제한값을 상회하거나 매우 근접한 값을 보였다.
- (2) 강철도교의 진동 저감을 위하여 다양한 방안을 검토한 결과 거더 전체에 콘크리트 중량을 추가하는 것이 진동저감 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 거더 전체에 콘크리트 중량을 추가하는 방안은 시공상의 경제성과 고정하중의 증가로 인하여 전체 하중의 증가를 유발할 수 있다.
- (3) 질량 추가의 방안은 구조물의 강성에는 변화가 없지만 추가적인 질량 증가로 인해 고유진동수가 변화하기 때문에 이를 고려해 임계속도를 다시 산정해야 하는 과정을 거쳐야 한다.

향후에는 질량 추가 방안에 대하여 실교량에서의 실험적 연구가 필수적이며, 다양한 강철도교 형식에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 황의승, 김도영, 여인호(2016) 실 통행열차에 의한 강박스 거더 교량의 동적응답에 대한 확률론적 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제3호, pp.163-171.
Hwang, E.S., Kim, D.Y., and Yeo, I. (2016) Probabilistic Analysis on Dynamic Response of Steel Box Girder Bridge by Actual Passing Trains, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.3, pp.163-171 (in Korean).
- [2] 박용명, 김동현, 김희순, 박재봉(2014) 일련의 주행 차량에 의한 현수교의 충격계수 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제5호, pp.485-498.
Pakr, Y.M., Kim, D.H., Kim, H.S., and Park, J.B. (2014) Evaluation of Impact Factor in Suspension Bridges Under a Series of Moving Vehicles, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.5, pp.485-498 (in Korean).
- [3] 박재봉, 박용명, 김동현, 이종한(2013) 신뢰도 기반 활하중 모델에 의한 강합성 사장교의 충격계수 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.335-346.
Park, J.B., Park, Y.M., Kim, D.H., and Lee, J.H. (2013) Evaluation of Impact Factor in Composite Cable-Stayed Bridges Under Reliability-Based Live Load Model, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 25, No.4, pp.335-346 (in Korean).
- [4] 김성일, 곽종원(2012) 철도교량의 주행안전성 및 승차감 평가, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제24권, 제3호, pp.39-46.
Kim, S.-I., and Kwak, J.-W. (2012) Traffic Safety and Passenger Comforts of Railway Bridges, *Magazine of the Korea Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No. 3, pp.39-46 (in Korean).
- [5] 오주원(2008) KTX용 2경간 연속교량의 동적거동 및 공진감소, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제1A호, pp.95-104.
Oh, J. (2008) Dynamic Behavior and Resonance Reduction of Two-Span Continuous Bridges for Korean Train eXpress. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers A*, KSCE, Vol.28, No.1A, pp.95-104 (in Korean).
- [6] 김성일 외(2008) 철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구, 최종보고서, 한국철도시설공단, pp.2-27.
Kim, S.I. et al. (2008) *Research on Dynamic Stability and Dynamic Design Criteria of Railway Bridges, The Final Report*, Korea Rail Network Authority, Korea, pp.2-27 (in Korean).
- [7] 한국철도시설공단(2013) 철도설계기준(노반편), 국토교통부, pp.8-80-8-88.
Korea Rail Network Authority (2013) *Rail Design Standard (Roadbed)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, pp.8-80-8-88 (in Korean).
- [8] Union Internationale des Chemins de fer (2009) *Design Requirements for Rail-Bridges Based on Interaction Phenomena Between Train, Track and Bridge* (UIC 776-2), France, pp.7-15.
- [9] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode - Basis of Structural Design* (EN 1990: 2002 E), Belgium, pp.74-83.
- [10] Iles, D.C. (2004) *Design Guide for Steel Railway Bridges*, The Steel Construction Institute, UK.
- [11] 이정휘, 김성일, 곽종원, 이필구, 윤태양(2007) 고속철도 강교량의 진동특성 분석, 한국소음진동공학회논문집, 한국소음진동공학회, 제17권, 제7호, pp.632-637.
Lee, J., Kim, S.-I., Kwark, J.-W., Lee, P.-G., and Yoon, T.-Y. (2007) Dynamic Characteristics of High-Speed Railway Steel Bridges, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol.17, No.7, pp.632-637 (in Korean).
- [12] 박선준, 강성후, 조은평(2009) 열차주행에 따른 강박스 철도교의 동적응답특성, 한국소음진동공학회논문집, 한국소음진동공학회, 제19권, 제12호, pp.1306-1314.
Park, S.-J., Kang, S.-H., and Jo, E.-P. (2009) Dynamic Responses Characteristics of Steel Box Railway Bridges Subjected to Train Loading, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol.19, No.12, pp.1306-1314 (in Korean).
- [13] 박연수, 공강주, 전양배, 전동호, 최동천(2009) 강상자형교와 콘크리트 충전형 강상자형교(F.S교) 거동연구, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제21권, 제4호, pp.38-44.
Park, Y.-S., Kong, K.-J., Jun, Y.-B., Cheon, D.-H., Choi, D.-C. (2009) A Study on Behavior for Steel Box Girder and Concrete Filled Steel Box Girder, *Magazine of the Korea Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.4, pp.38-44 (in Korean).

요 약 : 최근 교통정체와 환경적 문제로 인하여 많은 개발도상국에서 고속철도 시스템이 많이 건설되고 있다. 철도교는 도로교와 비교하여 차이점이 많이 있으며 그중 주행안전성 및 승차감이 중요한 이슈 중의 하나이다. 반복되는 하중으로 인한 구조물의 처짐과 가속도는 열차 주행시의 안전성과 사용자의 승차감에 큰 영향을 미친다. 특히 강철도교는 콘크리트교에 비하여 상대적으로 가벼운 중량으로 진동에 취약한 특징이 있다. 이 논문의 목적은 주행 중인 열차에 의한 강박스거더 철도교의 동적 거동을 분석하고 진동을 저감할 수 있는 합리적인 방안을 제안하는 것이다. 세 개의 강철도교에 대한 장기적 계측이 수행되었으며 주행중인 열차에 의한 교량의 동적거동을 해석할 수 있는 수치적인 모델이 개발되었다. 모델의 검증을 위하여 교량의 고유진동수가 비교되었다. 구조물의 진동 저감을 위한 방안으로 세 가지 방법에 대한 매개 변수 연구가 수행되었으며, 이 분석 결과를 바탕으로 합리적인 진동 저감 방안이 제안되었다.

핵심용어 : 동적 거동, 강박스거더 철도교, 진동 저감
