

KNR 용접형 판형교의 동적거동에 관한 해석적 고찰

An Analytical Review on the Dynamic Behaviors of Welded PL girder Bridges of KNR

이회업*
Lee, Hee-Up

J. Carbajal**

최진유***
Choi, Jin-Yu

ABSTRACT

KTx is going to directly operate on the existing plate girder bridges before the complete construction of new high-speed line. Also the speed and traffic volume is increased after electrification of conventional line. Then, it is necessary to check the dynamic behaviors of these bridges. Therefore, this paper reviews the dynamic behaviors of welded plate girder bridges designed by L-22, a standard load type of KNR. The span lengths of plate girder analyzed here are 6.6m, 9.7m, 12.9m, 16.0m, 19.2m, 22.3m, 25.4m and 31.1m. Using 2-D dynamic analysis, vertical deflection ratios of plate girder and maximum accelerations of car body are calculated. And the analytical results are compared with those of design criteria.

1. 서론

KNR에서는 경부선 대구~부산 구간의 전철화 및 시설정비사업뿐만 아니라 호남선 대전~목포 구간의 전철화사업도 병행 시행하여 KTX 차량의 기존선 직결운행으로 고속철도 도입효과를 극대화하고 있다. KTX 차량은 시스템 인터페이스 관련 특성들이 기존시스템과 상이하고 복잡하여 시스템간의 관련 기능들의 상호작용이 원활하도록 시설, 전차선, 신호 등의 각 분야별로 성능과 안전을 검토분석하고 있다. 따라서 교량분야에서도 KTX의 기존선 직결운행을 위하여 노후된 교량은 보수·보강하고, 판형교의 경우 동적거동 분석뿐만 아니라 일부는 상부구조물을 교체하여 유도상화를 실시하고 있다. 기존선 판형교의 동적거동은 상당히 복잡한 양상으로 나타나지만 이를 검토분석하기 위한 국내의 기준은 외국의 것에 비하여 아직 미흡한 수준에 있으며, 동적거동을 구명하기 위한 연구 또한 최근에 진행되고 있는 실정이다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** InfrasyS-consulting director, 비회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

본고에서는 L-22 표준하중으로 설계된 지간길이 6.6m, 9.7m, 12.9m, 16.0m, 19.2m, 22.3m, 25.4m 그리고 31.1m의 총 8개의 KNR 용접형 판형교에 대하여 2차원 해석을 통하여 동적거동을 분석하고자 한다. KTX에 의한 판형교의 수직 처짐비를 속도별로 구하여 기준과 비교하고, KTX 객차의 최대가속도를 속도별로 계산하여 승차감을 분석하고자 한다. 또한 판형교의 지간길이별로 UIC 하중에 의한 수직 처짐비를 구하여 기준의 허용 값과 비교하고, 고정하중에 대한 수직처짐을 계산하여 UIC기준의 한계범위 만족여부를 검토하고자 한다.

2. 판형교의 설계기준

오늘날 철도 선진국에서는 운행속도의 향상과 교통량의 증대, 장대레일에 대한 기술의 발달, 강교의 설계와 용접에 대한 시공능력의 향상 등으로 인하여 무도상 판형교보다는 동적거동에 유리한 강합성교를 더 선호하는 추세에 있다. 프랑스 같은 나라에서는 오래 전부터 무도상 판형교는 더 이상 건설되지 않고 유도상의 강합성 교량으로 신설 또는 교체되어 오고 있다. 따라서 현재의 설계기준은 거의 대부분 유도상에 관한 것이지만, 경우에 따라서 무도상 판형교에 확대 적용하고 있다. 판형교의 동적거동은 상당히 복잡해서 주행안전성과 사용성을 확보하기 위하여 설계시 고려되는 사항은 주로 궤도 안정(track stability), 승차감(passenger comfort), 상판의 비틀림(deck twist), 레일과 구조물의 상호작용(rail-structure interaction), 피로(fatigue), 원심력의 영향(centrifugal forces effects), 횡방향력(nosing forces) 그리고 기초 침하의 영향(foundations settlements effects) 등이다. 판형교에 관련된 설계기준은 나라마다 시방서마다 약간 다른데, 여기서는 승차감 기준, 수직 처짐비 그리고 UIC의 고유진동수 제한범위 등을 언급하고자 한다.

국내의 설계기준에서는 기존선의 승차감 기준에 대한 것은 없으며, 고속선에 대해서는 승객의 최대 수직가속도를 0.05g 이하로 제한하고 있다. 유럽에서는 1970년대에 고속선의 개발로 승차감 분야에 많은 연구가 수행되어 왔다. 과거에 주로 고속선을 위하여, 교량 위로 주행하는 열차의 최대 수직가속도는 0.05g로 제한되었다. 그러나 이 값을 0.05g로 제한하는 것은 상당히 어렵기 때문에 최근에는 0.1g(1.0m/sec²)로 증가되고 있다.

표 1은 국내의 철도교 설계기준의 처짐(vertical deflection)에 대한 허용 값을 수직 처짐비로 나타낸 것이며, 특별한 경우를 제외하고 강거더의 수직 처짐비는 가능한 이 값을 넘지 않는 것으로 하고 있다. 표 1에서 V 는 열차속도(km/h), L 은 지간길이(m), δ 는 수직처짐 이다. 또한 그림 1은 Eurocode의 수직 처짐비를 나타낸 것인데, 차체의 수직가속도 1m/s²를 위한 처짐비를 속도 V (km/h)와 지간길이 L (m)의 함수로 나타낸 것이다. 이 값은 3경간 이상에 대한 값인데 단경간의 경우 2를 2경간의 경우 1.5의 값으로 보정하여야 한다.

표 1. 강거더의 허용 수직 처짐비(δ/L)

구 분	$0 < L < 50$	$L \geq 50$
$V \leq 130$	1/800	1/700
$130 < V \leq 160$	1/1100	1/900

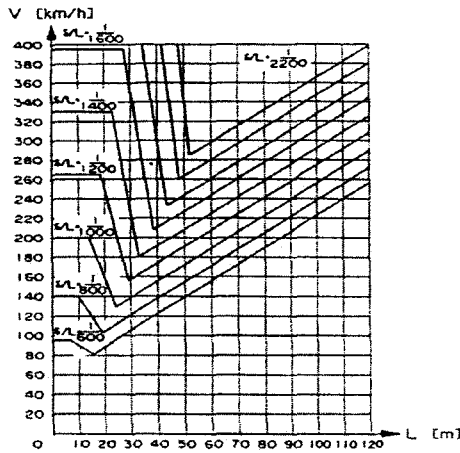


그림 1. 수직 처짐비(Eurocode)

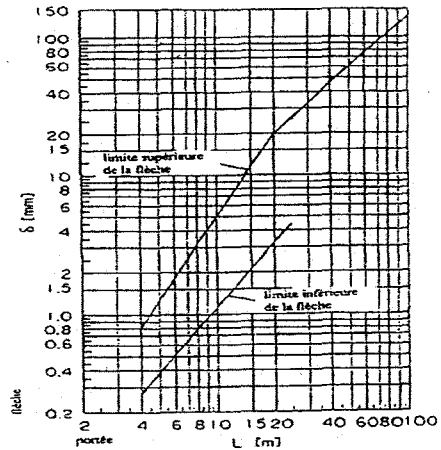


그림 2. 고정하중에 의한 수직처짐 범위(UIC)

한편 교량의 설계에 있어서 궤도의 안정(track stability)은 열차의 안전한 운영을 확보하고 구조물의 유지관리를 최적화하는데 필요한 주요 요소가 된다. 유럽에서는 도상교란 방지를 목적으로 유도상 교량의 수직 가속도의 범위를 0.35g로 제한하고 있다. 그림 2는 UIC에서 설계속도 220km/h 이하의 무도상(또는 유도상) 판형교에 대하여 지간길이에 따른 수직처짐(또는 고유진동수)의 범위를 나타낸 것이다. UIC 71 동적증폭계수가 그림의 제한범위에서 설정되었으므로 교량의 설계는 이 값을 만족하도록 권장하고 있다.

3. 동적 해석 및 결과

본고에서는 표 2와 같이 L-22 하중으로 설계된 KNR 용접형 판형교에 대하여 그림 3과 같은 2차원 단순모델(mass-spring-damping)을 이용하여 동적해석을 수행하였다. 단순모델에 적용된 KTX 객차의 동적인 물성치는 다음과 같이 가정되었다.

- 차량질량(a total train mass) = 3.21 t · s²/m
- 스프링 강성(a spring stiffness) = 229.59 t/m
- 감쇠기(a damping value) = 8.162 t · s/m

표 2. 해석모델의 지간길이별 단면제원(단위 : m)

단면	6.60		9.70		12.9		16.0		19.2		22.3		25.4		31.1	
	A	I	A	I	A	I	A	I	A	I	A	I	A	I	A	I
①	0.017	0.0022	0.022	0.0045	0.026	0.0072	0.030	0.0111	0.032	0.0146	0.037	0.0195	0.046	0.0277	0.050	0.0481
②	0.019	0.0026	0.029	0.0068	0.031	0.0098	0.038	0.0158	0.038	0.0198	0.047	0.0303	0.054	0.0382	0.063	0.0692
③	-	-	-	-	0.036	0.0120	0.043	0.0193	0.044	0.0243	0.050	0.0331	0.062	0.0475	0.068	0.0775

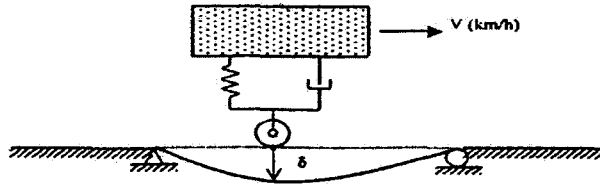


그림 3. 단자유도의 KTX 객차의 모델

3.1 KTX에 의한 수직 처짐비

앞에서 언급된 KNR 용접형 판형교에 대하여 KTX의 주행속도를 50~250km/h 까지 50km/h 씩 증가시키면서 2차원 동적해석을 수행하여 그 결과를 표 3에 나타내었다. 또한 표 3에는 KTX 객차의 임계 공진(resonance) 속도 V_{cr} 또한 구하여 언급하였다. 표 3의 결과를 검토하면 용접형 판형교의 지간길이가 22.3m 이상의 경우에 KTX의 속도가 증가할수록 수직 처짐비가 약간씩 증가하는 것으로 나타났다. 이는 표에서 나타났듯이 교량의 지간길이가 증가할수록 KTX의 임계속도 V_{cr} 이 주행속도 200~250km/h에 근접하기 때문에 교량의 처짐이 증가하는 것으로 분석된다. 또한 이 결과를 국내의 기존 철도교의 설계기준과 비교하면 KTX에 의한 용접형 판형교의 수직 처짐비는 허용 값을 만족하는 것으로 분석된다.

표 3. KTX에 의한 용접형 판형교의 수직 처짐비(δ/L)

지간길이 (m)	$\delta/L(*10^{-4})$					V_{cr} (km/h)
	50 km/h	100 km/h	150 km/h	200 km/h	250 km/h	
6.60	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	2974
9.70	2.5	2.5	2.5	2.6	2.6	1989
12.9	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	1403
16.0	2.1	2.1	2.2	2.2	2.2	1106
19.2	2.9	2.9	3.0	3.0	3.1	844
22.3	2.7	2.7	2.8	2.9	3.1	688
25.4	2.4	2.5	2.6	2.7	2.9	592
31.1	2.3	2.3	2.5	2.7	3.0	483
국내 설계기준	12.5		9.1	-		

3.2 KTX 객차의 최대 수직가속도

표 4는 KTX의 승차감 분석을 위해 객차 질량의 운동과 교량의 수직 운동을 고려하여 계산한 KTX 객차의 최대 수직가속도를 나타낸 것이다. 표 4의 결과를 분석하면 KTX의 주행속도 50~100km/h 범위에서 객차의 최대 수직가속도는 0.05g 또는 0.1g 보다 큰 것으로 나타났다. 이것은 50~100km/h 속도범위에서의 가진주파수가 객차의 고유진동수에 접근하기 때문인 것으로 분석된다. 물론 단순 차량모델로 얻어진 이 결과는 향후 좀더 복잡하고 정교한 모델로 해석하여 거동양상을 구명해야 할 것으로 판단된다.

표 4. 용접형 판형교에 대한 객차의 최대 수직가속도(a_{max})

지간길이 (m)	a_{max} (g)				
	50 km/h	100 km/h	150 km/h	200 km/h	250 km/h
6.60	0.021	0.038	0.009	0.004	0.003
9.70	0.026	0.047	0.011	0.005	0.004
12.9	0.035	0.064	0.015	0.007	0.005
16.0	0.035	0.065	0.015	0.008	0.005
19.2	0.058	0.106	0.025	0.012	0.008
22.3	0.063	0.116	0.027	0.013	0.009
25.4	0.064	0.118	0.028	0.014	0.009
31.1	0.072	0.134	0.031	0.015	0.010

3.3 UIC 하중에 의한 수직 처짐비

표 5는 UIC 71 표준열차하중에 의한 판형교의 정적 수직 처짐비를 나타낸 것이며, 결과를 분석하면 속도 140km/h에서 지간길이 19.2m이상의 교량에 대해서는 Eurocode의 허용 값(3경간 이상의 교량에 대하여) 보다 큰 것으로 나타났다. 그러나 표 5의 허용 값은 3경간 이상의 교량에 대한 결과이며 단경간의 교량에서는 이 값이 2배로 증가하므로 허용범위를 만족하는 것으로 분석된다.

표 5. UIC 71 하중에 의한 판형교의 처짐비(δ/L)

지간길이 (m)	UIC 71 하중			Eurocode 허용 값(* 10^{-4})	
	ϕ_2	δ (mm)	δ/L (* 10^{-4})	140 km/h	180 km/h
6.60	1.43	5.3	8.1	12.5	10.8
9.70	1.31	8.4	8.6	12.5	10.8
12.9	1.24	13.1	10.2	12.1	10.5
16.0	1.20	17.3	10.8	11.1	10.3
19.2	1.16	26.6	13.9	10.5	9.5
22.3	1.14	31.2	14.0	10.0	9.1
25.4	1.12	34.5	13.6	9.1	8.3
31.1	1.09	42.2	14.2	9.1	7.7

주: 1) UIC 동적증폭계수, $\phi_2 = 1.44/(\sqrt{L_\phi} - 0.2) + 0.82$, $1.00 \leq \phi_2 \leq 1.67$

2) 허용 처짐비 δ/L 은 3경간 이상 교량에 대한 것임

3.4 고정하중에 의한 수직 처짐비

KNR 용접형 판형교의 자중과 궤도의 자중이 고려된 고정하중에 의한 수직처짐을 구한 결과는 표 6과 같이 나타났다. 표 6의 결과를 살펴보면 고정하중에 의한 판형교의 수직처짐은 해석된 모

든 판형교에서 UIC의 한계범위 하한기준보다 작게 나타났으며, 이는 교량의 동적인 영향과 고유진동수가 크게 발생된다는 것을 의미한다. 앞에서도 언급하였듯이 판형교에 대한 동적거동은 상당히 복잡하여 본고에서와 같은 2차원 모델을 이용한 해석으로 그 양상을 명확하게 구명하는 것이 어렵기 때문에 향후 KTX에 의한 현장실측이 필요한 것으로 판단된다.

표 6. 고정하중에 의한 수직처짐

지간길이 (m)	고정하중 (t/m)	δ (mm)	$\delta_{lower\ limit}$ (mm)	$\delta_{upper\ limit}$ (mm)	f_0 [Hz]
6.60	0.68	0.16	0.6	2.1	44.4
9.70	0.82	0.35	1.1	4.6	29.7
12.9	0.90	0.71	1.6	8.2	21.0
16.0	1.00	1.15	2.2	12.5	16.5
19.2	1.02	1.97	2.9	18.1	12.6
22.3	1.22	2.95	3.7	22.3	10.3
25.4	1.42	4.0	-	26.0	8.8
31.1	1.54	6.0	-	33.0	7.2

4. 결 론

본고에서는 L-22 하중으로 설계된 KNR 용접형 판형교에 대하여 2차원 해석을 수행하고 동적거동 양상을 분석해 보았으며, 그 주된 결과는 다음과 같은 것으로 나타났다. KTX에 의한 판형교의 수직처짐은 기존 철도의 설계기준을 만족하고 있으며, 지간길이 22.3m 이상의 교량에서는 KTX의 주행속도가 증가할수록 처짐비가 약간씩 증가하는 것으로 나타났다. KTX의 기존선 직결운행시 승차감을 분석하기 위하여 객차의 최대 수직가속도를 구해본 결과, 주행속도가 50~100km/h 범위에서 가장 큰 가속도가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 고정하중에 대한 수직처짐을 계산한 결과, 해석된 모든 판형교에서의 수직처짐이 UIC 한계범위 하한기준 보다 작은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. UIC 776-1 R, Loads to be considered in railway bridge design
2. Eurocode 1, Basis of design and actions on structures
3. J. Carbajal(2001), "Review of the dynamic stability between KTX and bridges", SNCF-I interoffice memoranda BR01/10/02
4. 이희성의(2001), "고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선 전철화 사업 기술자문(시설분야 상세기술검토)", 한국철도기술연구원
5. 오지택의(2001), "판형교의 고유진동수 특성에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술회
6. 최진유의(2002), "판형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발", 한국철도기술연구원