

틸팅차량과 용접형 판형교의 동적 상호작용에 관한 해석적 고찰

An Analytical Review of the Dynamic Interactions between Tilting Train and Welded Plate Girder Bridges

이희업* 엄주환* 구수환** 고동춘***
Lee, Hee-Up Um, Ju-Hwan Ku, Su-Hwan Go, Dong-Choon

ABSTRACT

After the development of practical technology for tilting system, tilting trains are operated on conventional lines of KORAIL. As the running speed of trains is increased, it is very important to investigate the dynamic characteristics of plate girder bridges with direct track fixation. Therefore, this paper reviews the dynamic interactions between tilting train and welded plate girder bridges designed by L-22, a standard load type of KORAIL. 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, the critical velocity of tilting train, 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. 서 론

철도 선진국에서는 고속전철의 운행과 별개로 기존선의 고속화를 위하여 130~250km/h 급의 틸팅차량을 개발하여 고속철도가 운행되지 않는 지역이나 고속철도와의 연계 서비스에 이용하고 있다. 최근에는 고속 신선과 기존선을 직결운영하여 논스톱 서비스를 제공하기 위한 초고속 틸팅 열차의 개발을 추진하고 있는 실정이다. 국내에서도 KTX 직결운행을 위한 기존선 전철화사업뿐만 아니라 중장기 철도발전계획을 수립하여 중앙선, 천안선 그리고 장항선 등에 전철화를 추진 중에 있다. 국내와 같이 곡선부가 많은 기존선로에서의 고속화는 곡선부에서의 고속주행 방법이 중요하며, 이를 위해서는 틸팅차량의 도입이 효율적이라 할 수 있다. 이러한 배경을 토대로 국내에서도 최고운행속도 180 km/h 급의 한국형 틸팅 시스템을 개발하여 기존선의 고속화와 전철화에 대비하고 있다. 틸팅차량은 시스템 인터페이스관련 특성들이 기존시스템과 상이하므로 기존선에서 운행될 틸팅차량과 판형교의 동적상호작용을 검토분석할 필요가 있다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 철도청 토목주사, 비회원

*** 철도청 시설서기관, 정회원

본 연구에서는 L-22 표준하중으로 설계된 지간길이 6.6m, 9.7m, 12.9m, 16.0m, 19.2m, 22.3m, 25.4m 그리고 31.1m의 총 8개의 KORAIL 용접형 판형교에 대하여 2차원 해석을 통하여 동적거동을 분석하고자 한다. 즉 판형교의 고유진동수와 틸팅차량의 임계속도를 구하여 공진현상의 범위를 구명하고, 틸팅차량에 의한 판형교의 수직 처짐비를 속도별로 구하여 기존의 한계범위 만족여부를 검토하고자 한다. 또한 틸팅 객차의 최대가속도를 속도별로 계산하여 승차감을 분석하고자 한다.

2. 한국형 틸팅차량 기술사양

틸팅차량의 개발에는 시스템의 통합기술, 각 기능부품 및 주요장치의 설계, 제작기술의 확보가 전제조건이며, 이 중에서도 고속주행시의 차량안전과 소음, 진동 등의 환경영향 등이 수송수단으로서의 일차적 구비조건이라 할 수 있다. 다시말해서 이러한 조건들이 선로구축물의 궤도조건과 함께 최적화된 틸팅 대차의 개발을 요구한다. 차량의 무게를 지지하는 틸팅 대차는 차량의 틸팅 작용을 가능케하고 현가장치를 통하여 안락한 승차감을 제공하며 차륜과 레일간의 접촉을 통하여 차량을 추진하고 고속주행에서도 안전성을 보장해 준다. 그림 1과 표 1은 각각 한국형 틸팅차량 기술사양의 6량기준 기본편성도와 열차의 주요제원을, 그림 2는 틸팅차량의 일반도 및 하중선도를 나타낸 것이다.

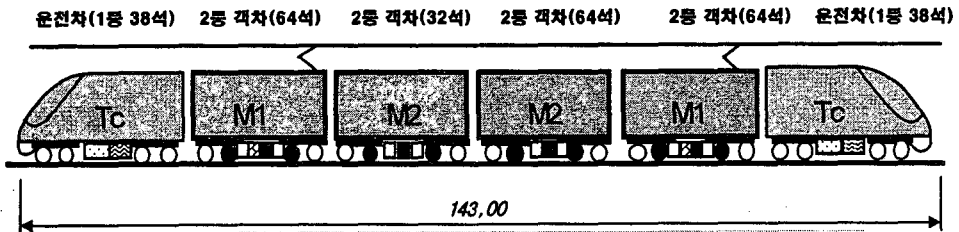


그림 1. ETC-T 기존선 고속 틸팅열차 기본편성도(6량기준)

표 1. 열차 주요제원(6량기준)

최고 운행속도	180 km/h	열차 길이	143 m
열차 설계속도	200 km/h	총 좌석수	300석 (1등: 76석, 2등: 224석)
열차 형식	Electric Multiple Unit	총 출력	3,600 kW
편성 당 량수	6량	모터 수	8대 (450 kW/대)
열차 중량	344톤 (최대차축하중: 15톤)	편성당 판토 수	2대

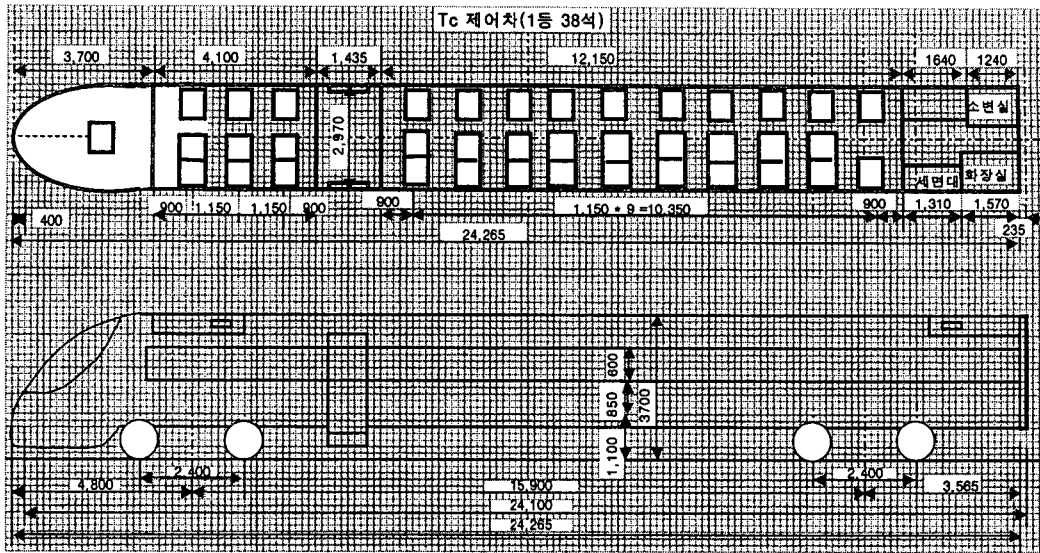


그림 2. 제어차의 일반도 및 하중선도

3. 해석 및 결과분석

L-22 하중으로 설계된 KORAIL 용접형 판형교의 단면제원은 표 2와 같으며, 표에서 단면 ①, ② 그리고 ③은 변단면을, A 는 단면적(m^2), I 는 단면2차모멘트(m^4)를 나타낸다. 교량에 작용하는 열차하중의 동적인 물성치는 문헌[4]를 참조하였고, 동적해석은 그림 3과 같은 2차원 단순모델(mass-spring-damping)을 이용하여 수행하였다.

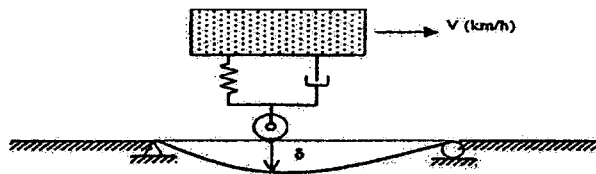


그림 3. 틸팅차량의 단자유도 모델

표 2. 해석모델의 지간길이별 단면제원

단면	6.60m		9.70m		12.9m		16.0m		19.2m		22.3m		25.4m		31.1m	
	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

3.1 교량 고유진동수와 차량 임계속도

교량의 고유진동수와 차량의 가진동수가 일치할 경우 공진(resonance)이 발생하며, 이러한 현상은 교량의 고유진동수, 차량의 유효 타격간격(effective beating interval)을 이용하여 검토할 수 있다. 표 3은 교량의 고유진동수와 차량의 임계속도를 계산한 결과인데, 후자는 다음 식 (1)과 유효 타격간격 15.9m를 적용하면 구할 수 있다.

$$V_{cr} = L_{eff} \cdot f_{str} \quad (1)$$

여기서, V_{cr} (km/h)는 차량의 임계속도, L_{eff} (m)는 유효 타격간격 그리고 f_{str} (Hz)는 교량의 고유진동수를 나타낸다.

또한 그림 4는 궤도의 자중을 고려하여 판형교의 고정하중에 의한 수직처짐을 구한 결과인데, 그림과 같이 모든 판형교에서의 수직처짐이 UIC의 한계범위 하한기준보다 작게 나타났다.

표 3. 교량의 고유진동수와 차량의 임계속도

지간길이(m)	교량 고유진동수 f_{str} (Hz)	틸팅차량 임계속도 V_{cr} (km/h)	비 고
6.60	44.4	2,542	
9.70	29.7	1,700	
12.9	21.0	1,200	
16.0	16.5	945	
19.2	12.6	722	
22.3	10.3	588	
25.4	8.8	506	
31.1	7.2	413	

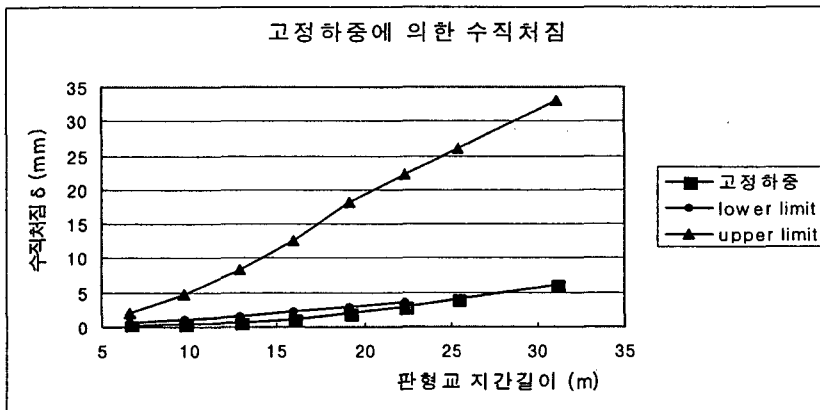


그림 4. 고정하중에 의한 판형교의 수직처짐

3.2 틸팅차량에 의한 교량의 수직 처짐비

앞에서 언급된 용접형 판형교에 대하여 틸팅차량의 주행속도를 20~180km/h 까지 20km/h 씩 증가시키면서 2차원 동적해석을 수행하여 그 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4의 결과를 검토하면 용접형 판형교의 지간길이가 19.2m 이상의 경우에 틸팅차량의 속도가 증가할수록 수직 처짐비가 약간씩 증가하는 것으로 나타났다. 이는 교량의 지간길이가 증가할수록 틸팅의 임계속도 V_c 이 주행속도에 근접하기 때문에 교량의 처짐이 증가하는 것으로 분석된다. 또한 이 결과를 국내의 기존 철도교의 설계기준과 비교하면 틸팅차량에 의한 용접형 판형교의 수직 처짐비는 허용 값을 만족하는 것으로 분석된다.

표 4. 틸팅차량에 의한 용접형 판형교의 수직 처짐비($\delta/L*10^{-4}$)

지간길이 (m)	틸팅차량의 주행속도(km/h)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
6.60	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.57	2.57	2.57	2.57
9.70	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	2.19	2.19	2.19	2.20
12.9	2.22	2.22	2.22	2.22	2.23	2.24	2.25	2.26	2.27
16.0	2.12	2.12	2.13	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19
19.2	2.46	2.47	2.48	2.49	2.51	2.53	2.56	2.59	2.62
22.3	2.31	2.32	2.33	2.35	2.37	2.40	2.44	2.48	2.54
25.4	2.08	2.09	2.10	2.13	2.16	2.20	2.24	2.30	2.37
31.1	1.92	1.93	1.96	1.99	2.03	2.09	2.16	2.24	2.35
국내 설계기준	12.5						9.1		-

3.3 틸팅 객차의 최대 수직가속도

국내의 설계기준에서 기존선의 승차감 기준은 없으며, 고속선에 대해서는 승객의 최대 수직가속도를 0.05g 이하로 제한하고 있다. 1970년대에 유럽에서는 고속선의 개발로 승차감 분야에 많은 연구를 수행해 왔다. 교량 위를 주행하는 열차의 최대 수직가속도(a_{max})는 고속선에서는 0.05g로 제한하였고, 기존선에서는 이 값을 만족하는 것이 상당히 어려워 최근에는 0.1g(1.0m/sec²)로 증가시키고 있는 추세이다.

그림 5는 틸팅차량의 승차감 분석을 위해 객차 질량의 운동과 교량의 수직 운동을 고려하여 계산한 틸팅 객차의 최대 수직가속도(a_{max})를 나타낸 것이다. 그림의 결과를 분석하면 지간길이 31.1m 교량 위를 40km/h 정도의 속도로 주행하는 틸팅차량 객차의 최대 수직가속도가 가장 크게 나타났지만 승차감은 대체로 양호한 것으로 분석된다. 물론 본 연구에서 단순 차량모델로 얻어진 이 결과는 향후 좀더 복잡하고 정교한 모델과 실제 궤도 및 구조물의 손상상태가 고려된 해석을 통하여 거동양상을 구명해야 할 것으로 판단된다.

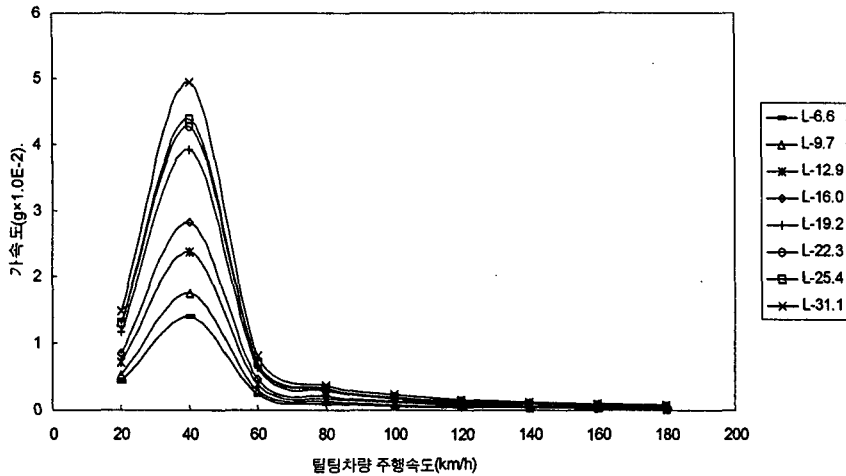


그림 5. 용접형 판형교에 대한 객차의 최대 수직가속도

4. 결 론

본 연구에서는 KORAIL 용접형 판형교의 고유진동수와 기존선에서 운행될 한국형 틸팅차량의 교량 주행시 임계속도를 계산하여 제시하였다. 한국형 틸팅차량의 개발사양과 L-22 하중으로 설계된 용접형 판형교와의 동적거동 분석을 위해 수행된 2차원 해석을 통하여 다음과 같은 주된 결과를 얻을 수 있었다. 틸팅차량 개발사양에 의한 판형교의 수직처짐은 기존 철도의 설계기준을 만족하고 있으며, 지간길이 19.2m 이상의 교량에서는 열차의 주행속도가 증가할수록 처짐비가 약간씩 증가하는 것으로 나타났다. 틸팅 시스템의 기존선 직결운행시 승차감을 분석하기 위하여 객차의 최대 수직가속도를 구해본 결과, 주행속도 40km/h 범위에서 가장 큰 가속도가 발생하는 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. 신광복 외(2003), "틸팅 시스템 실용기술 개발", 한국철도기술연구원
5. 이희성 외(2001), "고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선 전철화 사업 기술자문(시설분야 상세기술검토)", 한국철도기술연구원
6. 최진유 외(2002), "판형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발", 한국철도기술연구원
7. 이희업 외(2002), "KNR 용접형 판형교의 동적거동에 관한 해석적 고찰", 한국철도학회 추계학술회