일반체결구/활동체결구 접속구간 차량 및 궤도 안정성 평가에 관한 연구

A Study on Stability Assessment of Vehicle and Track on Transition between Conventional and Zero-Longitudinal Resistance Rail Fastener

양신추* 장승엽** 김 은** 유진영*** 홍성모***

Yang, Sin Chu Jang, Seung Yup Kim, Eun Yoo, Jin Young Hong, Sung Mo

ABSTRACT

In this paper, assessed are the stability of vehicle and track according to vertical support stiffness difference on the transition between conventional and zero-longitudinal resistance (ZLR) rail fastener on bridge. For this, the spring constants of rail fastener have been determined according to different load ranges - KTX load (with or without impact factor) and test load of EN standards - from results of laboratory test on rail pad, the stability analysis of vehicle and track has been performed according to numbers or installation length of ZLR fasteners using vertical vehicle-track coupled model to consider train-track interaction. The analysis results reveal that only the wheel load variation slightly exceed the limit value when 2 ZLR fasteners are used with spring constant determined within the EN test load range, but, in all other cases, all evaluation items are satisfied. Thus, it can be said that the stability of vehicle and track will not be degraded by ZLR fastener.

1. 서 론

활동체결구는 횡방향으로는 충분한 저항력을 갖지만 종방향으로는 구속되어 있지 않아 종저항력이 발생하지 않기 때문에 교량상 장대레일의 축력을 저감시킬 뿐만 아니라, 체결스프링과 레일저부상면과의 사이에 1~2mm의 틈새가 있음으로 인하여(그림 1) 콘크리트궤도의 교량상판 단부 꺽임 및 처짐에 따른 체결구 압상력 저감에 효과가 있는 것으로 평가되고 있어 이들 문제를 해결하기 위한 방안으로 적극 검토되고 있다. 그러나 활동체결구는 초기체결력이 없기 때문에 체결력이 있는 일반체결구와 수직방향 궤도지지계수가 다르게 됨으로써 일반체결구와 접속부에서 차량과 궤도의 진동이 커질 수 있어 이에 대한 안정성 확보가 사용성 확보에 중요한 관건이 된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 일반체결구와 활동체결구 접속부에서 차량의 주행안정성 및 궤도의 구조안정성을 평가하였다. 검토시 활동체결구를 사용할 경우 그림 1과 같이 레일저부 상면과 활동체결구와의 사이에 최대 2mm 정도의 틈새가 발생할 수 있지만 시공 시에 레일패드와 레일저부하면과는 틈새가 발생하지 않도록 시공할 수 있으므로 단차는 고려하지 않고 일반체결구와 활동체결구와의 강성차이만을 고려하였다. 레일패드강성은 작용하는 하중대역별로 달라지므로 본 검토에서는 시험규정에서 정한 하중과 KTX 실제하중(윤중을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 2개 case)고려한 3가지 경우에 대하여 검토하였다. 접속구간에서 KTX차량과 궤도의 상호작용해석을 수행함으로써 차량의 가속도 및 윤중변동율과 레일의 응력 및 체결구 압상력을 구하여 관련 기준과 비교함으로써 안정성을 검토하였다.

* 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 정회원

E-mail : scyang@krri.re.kr

Tel : (031)460-5301, Fax : (031)460-5814

** 한국철도기술연구원

*** 한국철도시설공단

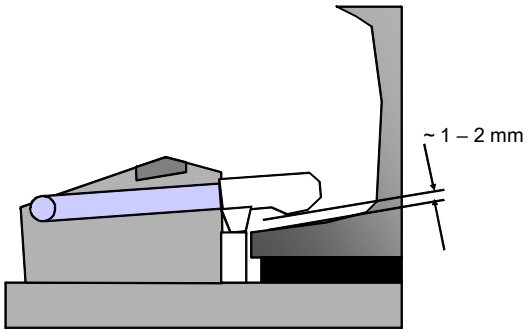


그림 1. 활동체결구 개요도

2. 검토기준

2.1 차량 승차감 및 주행안전기준

궤도틀림 발생형식이 다른 개소들에 대하여 각각의 특성에 맞게 차량의 주행안정성과 승차감을 제한하는 기준들(그림 2)중에 궤도틀림이 다소 적게 발생하는 콘크리트궤도의 특성을 고려하면서도 안전측의 검토가 될 수 있도록 A-Limit기준을 적용하였다. 이 기준에 의하면 차량수직가속도는 0.28g이고 윤중변동은 0.28이다.

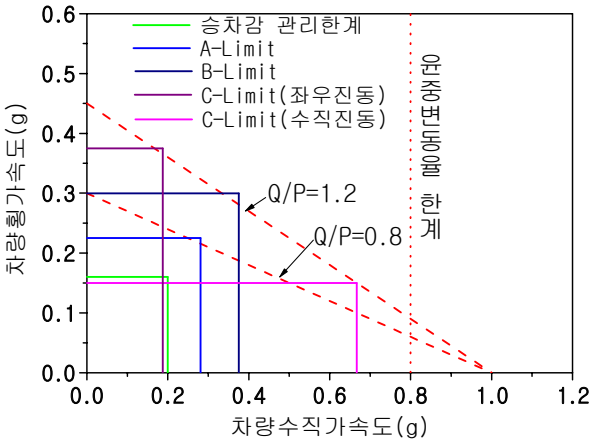


그림 2. 차량 승차감 및 주행안전기준

2.2 궤도 구조안정성

레일의 휨응력기준은 장대레일축력, 잔류응력, 피로를 고려하여 60kg장대레일의 평가기준치를 80MPa로 하였다. 또한 경계부에는 지지강성계수의 불균일에 의하여 레일체결장치에 부압(상향 압력)이 작용하는데, 이 부압은 레일 체결장치의 체결력을 초월하는 경우가 있으므로, 부압을 레일체결장치 체결력의 70%이하로 억제하도록 정하였다. 콘크리트궤도에 사용되는 체결구의 경우 Pandrol SFC인 경우 초기 체결력이 17.2kN을 기준으로 12kN을 평가기준치로 하였다.

3. 차량/궤도 상호작용해석

3.1 차량/궤도 상호작용 해석모델

그림 3은 차량과 궤도의 수직방향 상호작용 해석모델을 나타낸다. 차량(Vehicle) 서브모델(Sub-model)은 차체(Car body)와 2개의 대차(bogie), 그리고 4개의 윤축(wheelset)으로 구성되며, 이들은 각각 강체운동을 하는 것으로 가정하여 질점(lumped mass)으로 모델링하였다. 차체와 대차를 연결하는 2차 현수장치

(secondary suspension)와 대차와 윤축을 연결하는 1차 현수장치(primary suspension)는 스프링과 감쇠(damping) 요소(element)로 모델링하였다. 차량은 in-plane 운동만 하는 것으로 가정하여 10개의 자유도 시스템(degree of freedom system)로 모형화하였다.

궤도 서브모델은 레일, 체결구(fastener), 침목(sleeper), 도상슬래브(ballast), 그리고 노반(subgrade) 등이 다층(multi layers)으로 배열된 것으로 가정하였다. 최 상부층을 구성하는 레일은 티모센코 연속보(Timoshenko continuous beam)로 모형화하였으며 하부의 체결구 및 패드는 질점(lumped mass), 선형스프링(linear spring) 및 damper로 모형화하였다. 도상슬래브의 휨강성이 크고 또한 노반과 접촉면적이 크기 때문에 노반의 궤도지지강성이 매우 크므로 본 연구에서는 궤도를 레일과 체결구만으로 구성된 1층 보(1 Layered Beam) 모델로 모형화하였다.

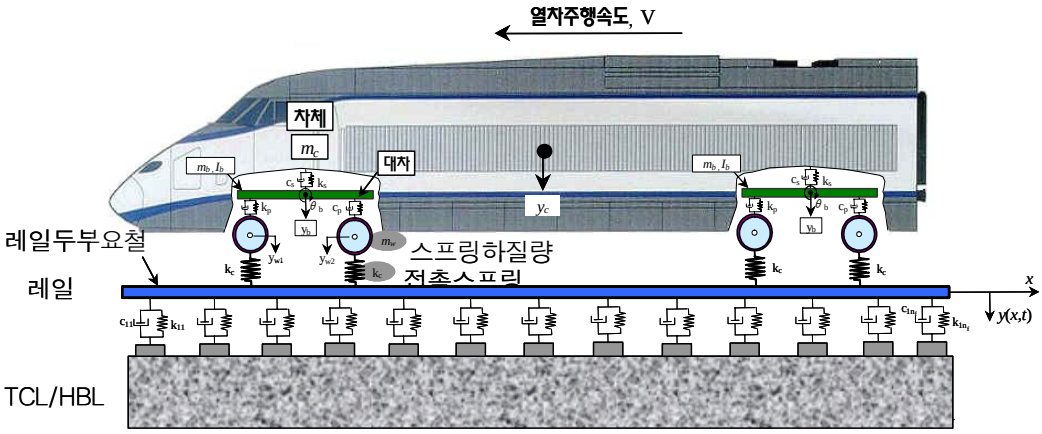


그림 3. 차량/콘크리트궤도 상호작용 해석모형

3.2 계산 제원

가. 차량과 궤도 제원 및 물성치

표 1은 차량과 궤도의 제원 및 물성치를 나타낸다. 차량의 물성치 및 제원은 KTX차량을 대상으로 적용하였으며, 궤도강성변화는 레일지지강성 즉 레일패드 강성이 변화하는 것으로 가정 레일패드 감쇠계수는 실내 또는 현장에서 측정한 값들 중에서 비교적 적은 값으로 평가되는 5.0 kN/(m/sec)을 적용하였다.

표 1. 차량/궤도모델의 물성치(궤도 편측당)

차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
주행속도(㎞/h)	350	차체회전관성모멘트(ton·m^2)	565.95
차체질량(ton)	27.48	차륜반경(㎜)	430
2차 현가장치 스프링(kN/m)	1.26×10^3	레일	UIC60
2차 현가장치 댐핑(kN·s/m)	28.5	레일표면반경(㎜)	300
대차질량(㎏)	1.21	레일질량(㎏/m)	60.3
1차 현가장치 스프링계수(kN·s/m)	1.252×10^3	레일강성도(kN·m^2)	6.42×10^3
1차 현가장치 댐핑계수(kN·s/m)	16.0	대차간 거리(m)	14.0
축간거리(m)	3.0	궤도패드 댐핑계수(kN·s/m)	5.0
스프링하질량(ton)	1.024	침목간격(m)	0.625

나. 활동체결구 레일패드의 물성치

활동체결장치와 일반체결장치의 접속부에서 열차주행안전성 문제를 검토하기 위해서 실제 열차하중조건에서 레일패드의 스프링계수를 산정하였다.

적용하중은 KTX 열차하중과 슬래브궤도에서의 충격계수를 고려하여 산정하였고, EN규격의 시험하중, 충격계수를 고려한 하중과 고려하지 않은 하중으로 구분하여 산정하였다.

최대 시험하중은 EN규격의 시험하중에서 체결장치의 초기체결력을 제거한 75kN으로 하였고, 충격계수를 고려한 열차하중을 산정하기 위해 KTX 윤중과 독일 슬래브궤도의 동적충격율 1.5, 침목 1정당 배분율을 30%를 고려하여 계산하였다. 그리고 활동체결장치임을 고려하여 초기체결력은 0로 하여 정적 스프링계수를 산정하였다. 동적스프링계수는 계산된 정적스프링계수에 동배율 1.5를 고려하여 산정하였다.

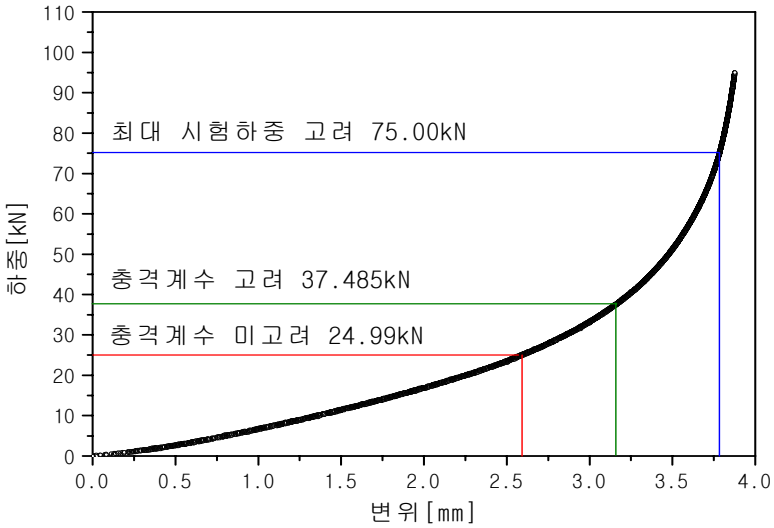


그림 4. 레일패드 하중-변위선도(11m)

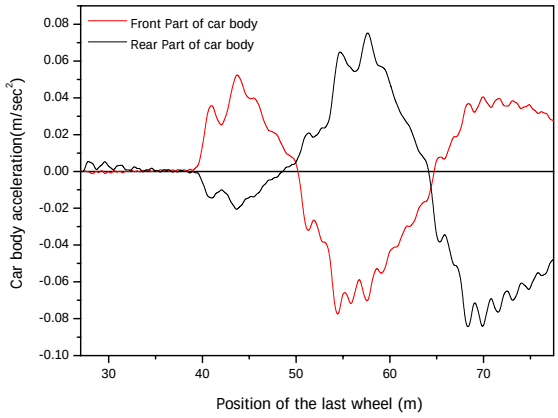
표 2. 활동체결장치 레일패드의 스프링계수

하중 유형	구분	하중 [kN]	변위 [mm]	레일패드 스프링계수	
				정적 [kN/mm]	동적 [kN/mm]
체결구 시험하중	$P_{max(1)}$	75.00	3.78	19.84	29.76
	$P_{min(1)}$	0.00	0.00		
실하중 (충격계수 미고려)	$P_{max(2)}$	24.99	2.58	9.69	14.53
	$P_{min(2)}$	0.00	0.00		
실하중 (충격계수 고려)	$P_{max(3)}$	37.485	3.16	11.86	17.79
	$P_{min(3)}$	0.00	0.00		

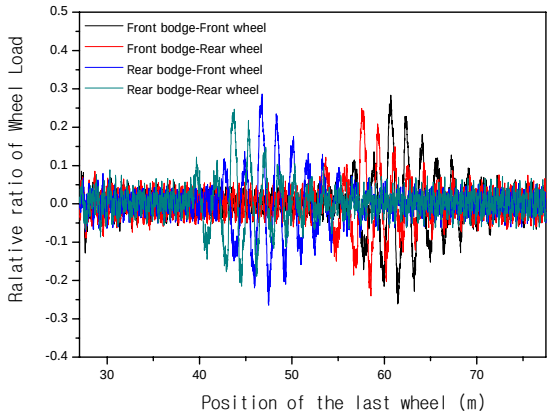
4. 해석결과

3가지 하중유형에 대하여 활동체결구를 각각 1, 2, 3, 4, 5개 및 10m를 부설하는 경우들에 대하여(총 18경우) 차량/궤도 상호작용해석을 수행하였다.

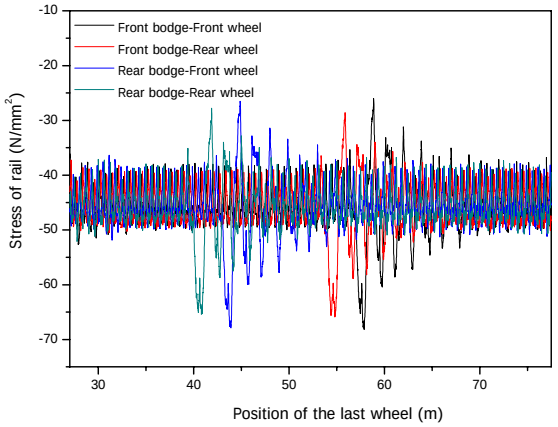
그림 5는 실내시험을 통하여 얻어진 일반체결구 및 활동체결구의 레일스프링계수를 적용하였을 경우 접속구간에서 10m 구간에 거쳐 활동체결구를 부설하는 경우에 대한 해석결과이다.



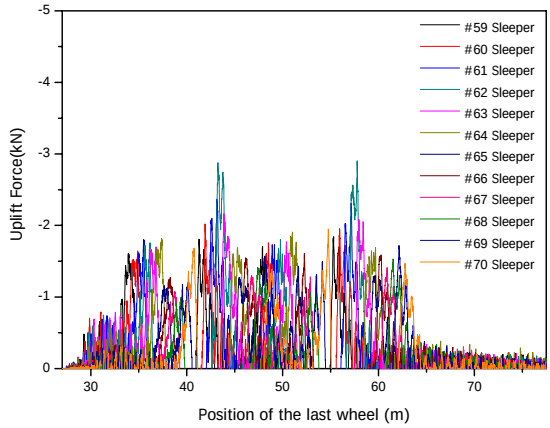
(a) 차량가속도



(b) 윤중변동율



(c) 레일응력



(d) 체결구 상압력

그림 5. 실험하중-10m 활동체결구를 사용하는 경우 해석결과

상기 18가지 경우에 대하여 차체가속도, 윤중변동율, 레일응력, 체결구압상력의 최대값을 정리한 결과를 표 3~5에 정리하였다.

표 3. 실험하중

항 목	1개 활동체결구	2개 활동체결구	3개 활동체결구	4개 활동체결구	5개 활동체결구	10m 활동체결구
차체가속도 (m/sec^2)	0.0168	0.0302	0.0357	0.0382	0.0405	0.0843
윤중변동율	-0.2380	-0.3231	-0.1764	-0.1691	-0.2648	-0.260
레일응력 (N/mm^2)	-63.4100	-68.1380	-68.2180	-66.3080	-66.1520	-64.7190
체결구 상압력(kN)	-2.8210	-3.0220	-3.0540	-2.9920	-2.8930	-2.901

표 4. 충격하중을 고려하지 않은 동적스프링계수

항 목	1개 활동체결구	2개 활동체결구	3개 활동체결구	4개 활동체결구	5개 활동체결구	10m 활동체결구
차체가속도 (m/sec^2)	0.0221	0.04250	0.0586	0.0668	0.0706	0.1427
윤중변동율	-0.1903	-0.2621	-0.2298	-0.1727	-0.1529	-0.1456
레일응력 (N/mm^2)	-68.4790	-78.0140	-81.4230	-78.2480	-76.8300	-76.4740
체결구 상압력(kN)	-2.1580	-2.5210	-2.2610	-2.2920	-2.2940	-2.2860

표 5. 충격하중을 고려한 동적스프링계수

항 목	1개 활동체결구	2개 활동체결구	3개 활동체결구	4개 활동체결구	5개 활동체결구	10m 활동체결구
차체가속도 (m/sec^2)	0.0198	0.0379	0.0497	0.0547	0.0577	0.1164
윤중변동율	-0.1949	-0.2625	-0.2003	-0.1511	-0.1455	-0.1427
레일응력 (N/mm^2)	-66.5760	-74.5500	-76.8070	-74.0650	-73.2510	-73.3530
체결구 상압력(kN)	-2.3980	-2.7540	-2.6270	-2.4440	-2.4430	-2.3820

이들 결과로부터 체결구 시험규정에 의한 시험하중으로 산정한 일반 및 활동체결구의 강성을 사용할 때 활동체결구를 2개 사용하는 경우 윤중변동율이 기준을 다소 초과하는 것 이외는 모든 경우 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. KTX의 경우 윤중변동을 고려한 최대하중은 체결구 시험하중을 넘지 않으므로 KTX하중에 의한 레일패드강성을 산정하는 것이 합리적이고 따라서 활동체결구를 사용함에 따라 일반체결구와의 접속부에서 차량의 주행안정성과 궤도의 구조안정성은 확보됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 일반체결구와 활동체결구 접속부에서 차량의 주행안정성 및 궤도의 구조안정성을 평가하였다. 활동체결구의 궤도지지계수는 실험하중조건과 실제하중조건(충격계수를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우)에서 구한 값을 적용하였으며, 각 하중조건에 대하여 활동체결구를 1개에서 5개까지 부설하는 각각의 경우와 10m 구간 모두를 활동체결구로 부설하는 경우 총 18경우에 대하여 검토하였다.

검토결과 시험하중으로 산정한 일반 및 활동체결구의 강성을 사용할 때 활동체결구를 2개 사용하는 경우 윤중변동율이 기준을 다소 초과하는 것 이외는 모두 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 따라서 활동체결구를 부설함에 따라 궤도지지계수 차이에 의하여 차량 주행안정성 및 궤도의 구조안정성 측면에는 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 이상의 평가결과는 일반체결구와 활동체결구 사이에 단차가 없는 경우에 한하며 단차가 발생할 경우에는 이를 고려하여 평가가 재 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도시설공단의 재정적 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 양신추 외, 콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구용역, 최종보고서, 한국철도시설공단, 2008.
2. 石田誠, 三浦重, 河野昭子, 軌道動的應答モデルとこの解析結果. 鐵道總研報告, Vol.11 No.2, 鐵道總合技術研究所, 日本, pp. 19-26. 1997.