

플로팅 슬래브궤도 슬래브 연결부에서의 차량 및 궤도의 동적 거동

Dynamic Behavior of Train and Track at Slab Joints of Floating Slab Track

장승엽† 양신추* 황성호* 안미경** 최원일***
Seung Yup Jang Sin Chu Yang Sung Ho Hwang Mi Kyung Ahn Won-Il Choi

ABSTRACT

Highlighted is significance of the floating slab track for mitigating vibrations induced by train, together with the recent trends towards speed-up of railways. In the design of the floating slab track, it is more beneficial to increase the slab length since a significant impact can be induced on the train and track at the discontinuous points between slabs with the finite slab length. However, if the slab length is too long, the tensile stress of slab concrete and the additional stress on rail due to the temperature change and shrinkage of concrete slab. Thus it is of great importance to relevantly determine the slab length. In this study, to understand these phenomena and establish the countermeasures, the dynamic behaviors of train and track at the inter-slab discontinuous points have been explored and the effect of dowel joints as one of countermeasures has been analytically investigated.

1. 서론

최근의 철도 고속화 추세와 더불어 열차의 진동을 줄이기 위한 플로팅 슬래브궤도의 중요성이 크게 부각되고 있다. 플로팅 슬래브궤도의 설계에 있어서 슬래브를 유한의 길이로 할 경우에는 슬래브와 슬래브 사이의 불연속부에서 궤도와 차량에 큰 충격이 발생할 수 있으므로 슬래브의 길이를 가능한한 길게 하는 것이 유리하지만, 슬래브의 길이가 지나치게 길어지면 콘크리트 슬래브의 온도변화와 수축현상에 의해 슬래브에 발생하는 응력과 레일에 부가되는 축력이 커지게 되므로 슬래브의 길이를 적절히 정하는 것이 중요하다.

이러한 현상을 이해하고 대안을 수립하기 위해 본 연구에서는 플로팅 슬래브 간 불연속부에서의 궤도와 차량의 동적 응답을 차량-궤도 상호작용 해석을 통해 고찰하고, 그 대책으로써 다웰 조인트(dowel joint)의 설치에 따른 효과를 해석적으로 검토하였다.

2. 다웰 조인트의 모델링

다웰 조인트는 종방향으로 슬래브의 신축을 구속하지 않도록 슬립을 하면서 수직하중을 전달하기 위해 다웰바(dowel bar)를 설치하는 조인트이다(그림 1 참조). He and Kwan[1]에 따르면 그림 2에 나타난 바와 같이 다웰바를 연속 탄성 스프링에 의해 지지되는 보(beam on elastic foundation)로 가정하면 등가의 전단 스프링으로 나타낼 수 있다.

† 교신저자, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실

E-mail : syjang@krri.re.kr

* 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실

** 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실

*** 한국철도시설공단, KR연구원 기술연구소

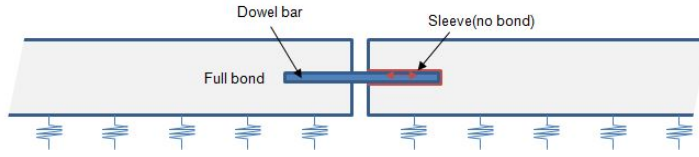


그림 1. 다웰 조인트 개념도

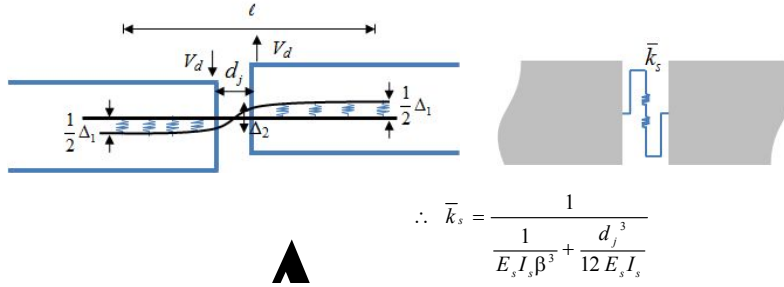


그림 2. Dowel joint의 등가 전단 강성

$$k_s = E_s I_s \beta^3 \quad (1)$$

여기서, E_s : 다웰바 탄성계수

I_s : 다웰바의 단면 2차 모멘트

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_b d_b}{4 E_s I_s}} \quad : \text{다웰바의 등가 지지강성}$$

K_b : 콘크리트 지압강성

d_b : 다웰바 직경

콘크리트 지압강성은 콘크리트 강도에 따라 다음과 같이 달라지며 Soroushian 등[2]의 연구를 참조하면 아래 식을 적용할 수 있다.

$$K_b = \frac{127 c_1 \sqrt{f_{ck}}}{d_b^{2/3}} \quad (2)$$

여기서, f_{ck} : 콘크리트 압축강도

c_1 : 다웰바 간격에 따른 상수 (순간격 25mm 이하 0.6, 25mm 초과 1.0)

3. 해석

다웰 조인트에서의 차량과 궤도의 동적응답을 구하기 위해 양신추 등[3]이 제시한 차량-궤도 동적 상호작용 해석기법을 적용하였다(그림 3 참조). 110m 길이의 플로팅 슬래브궤도에서 조인트 없이 연속 슬래브가 적용된 경우(Case 1)와 슬래브 중앙부에 다웰 조인트를 설치한 경우

(Case 2), 그리고 다웰 조인트 없이 불연속인 경우(Case 3)를 각각 해석 대상으로 하였다(그림 4). 다웰 조인트를 설치한 경우에는 다웰비를 0.657%를 기준으로 하여 0.055%까지 감소시키면서 해석을 수행하였다. 그 밖에 해석에 사용된 차량은 KTX 동력차 5량을 적용하였고, 자세한 차량과 플로팅 슬래브케도의 물성과 치수는 표 1, 2에 나타난 바와 같다.

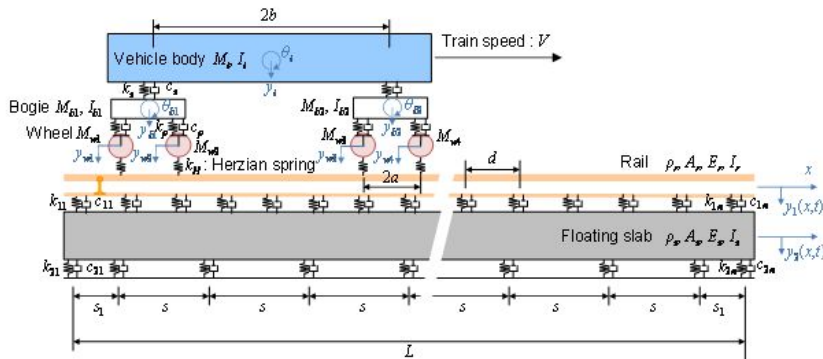
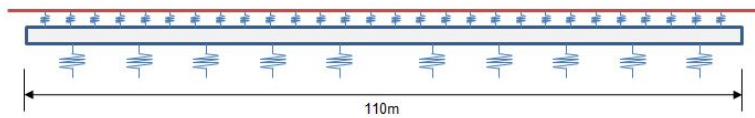
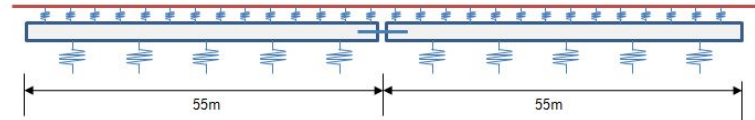


그림 3. 차량-궤도 동적 상호작용 해석모델

Case 1 : Continuous slab



Case 2 : with a dowel joint



Case 3 : without a dowel joint

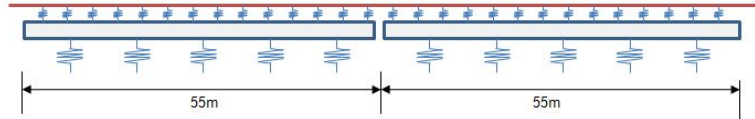


그림 4. 해석 대상 플로팅 슬래브궤도

표 1. 차량의 해석 물성(KTX 동력차)

Items	Unit	KTX - Motor unit
Vehicle body mass	ton	27.480
Vehicle body moment of rotational inertia	ton m ²	565,950
Bogie mass	ton	1.210
Bogie moment of rotational inertia	ton m ²	1.297
Unsprung mass	ton	1.024
Spring constant for primary suspension	kN/m	1.252×10 ³
Damping coefficient for primary suspension	kN s/m	16.0
Spring constant for secondary suspension	kN/m	1.268×10 ³
Damping coefficient for secondary suspension	kN s/m	28.5
Distance between bogies	m	14.0
Distance between axles	m	3.0
Wheel radius	m	0.46
Elastic modulus of wheel	kN/ m ²	2.1×10 ¹²

표 2. 궤도 해석 물성

Items	Unit	Floating slab track
Rail type	-	UIC 60
Hertzian spring constant	$\text{kN m}^{-3/2}$	1.025×10^8
Rail mass	ton/m	0.06
Rail height	m	0.172
Height to neutral axis of rail	m	0.0809
2 nd moment of cross-sectional area of rail	m^4	3055×10^{-8}
Elastic modulus of rail	kN/m^2	2.1×10^{12}
Poisson ratio of rail	-	0.3
Slab height	m	2.8
Slab width	m	0.54
Mass density of slab	ton/m^3	2.5
2 nd moment of cross-sectional area of 1/2slab	m^4	1.84×10^{-2}
Elastic modulus of slab concrete	kN/m^2	3.10×10^7
Poisson ratio of slab concrete	-	0.17
Spring constant of rail pad	kN/m	36.04×10^3
Damping coefficient of rail pad	kN s/m	10
Sleeper distance	m	0.65
Isolator spring constant(k)	kN/m	7.44×10^3
Isolator damping coefficient	kN s/m	41.150
Distance between isolators(S)	m	2.0

4. 결과 및 토의

그림 5는 속도 400km/h로 주행할 때 해석 결과 중 차륜-레일 접촉력의 변화를 보여 주고 있다. 모든 경우 일반 궤도에 비해 플로팅 슬래브궤도 구간에서는 접촉력이 증가하는 경향을 나타내고 있지만, 조인트가 없는 Case1에 비해 Case3에서는 조인트 위치에서 급격한 접촉력의 증감이 관찰되고 있음을 알 수 있으며, Case2의 결과에서는 다웰 조인트를 설치함으로써 접촉력의 증감이 상당 수준 완화된다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 Case2에서 다웰비에 따라 응답을 나타낸 것이다. 그림에서 다웰비에 따라 차륜-레일 접촉력과 차체가속도, 레일 휨응력 등의 차량과 궤도의 응답이 거의 변화가 없고, 레일 인상력(rail uplift force)의 경우 약 0.2% 이상이면 응답의 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 다시 말해 최소한의 다웰비로도 충분한 동적 성능을 보장할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 동적 성능보다는 다웰비의 항복 또는 피로 파괴 방지를 고려하여 최소 다웰비를 결정해야 할 것이다.

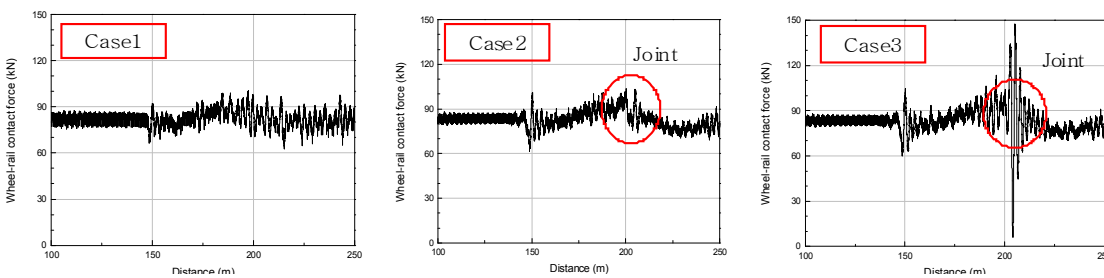


그림 5. 조인트 유무에 따른 차륜-레일 접촉력 변화

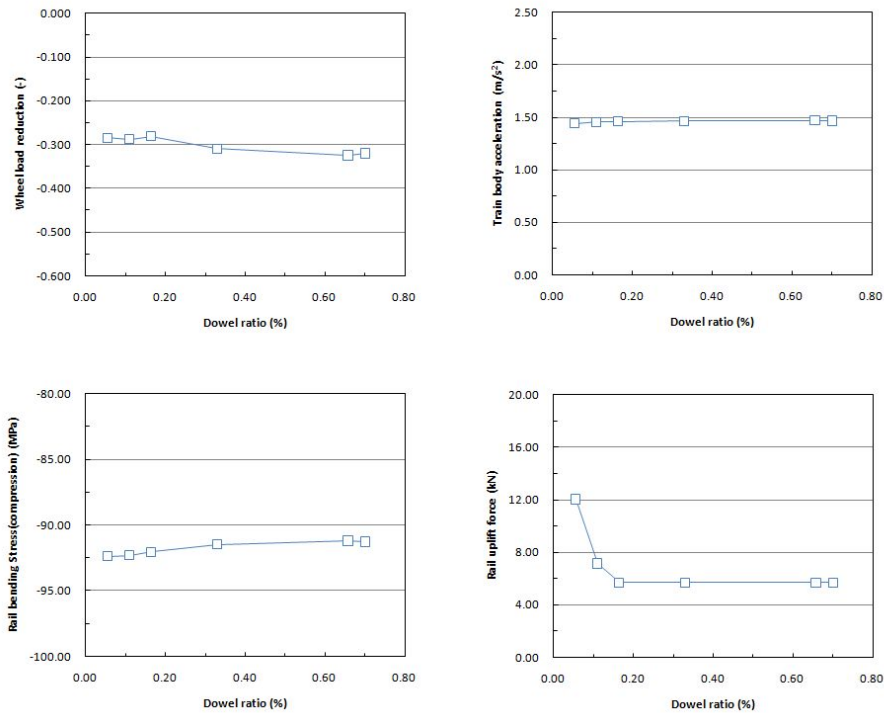


그림 6. 다웰비에 따른 차량과 궤도의 동적 응답 비교

5. 결론

본 연구에서는 플로팅 슬래브 간 불연속부에서의 궤도와 차량의 동적 응답을 차량-궤도 상호 작용 해석을 통해 고찰하고, 그 대책으로써 다웰 조인트(dowel joint)의 설치에 따른 효과를 살펴 보았다. 해석 결과 다웰 조인트를 설치함으로써 차량-궤도의 충격을 효과적으로 완화시킬 수 있으며, 0.2% 이상의 다웰비만 확보하더라도 충분한 동적 성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 다웰비의 최소 요구량은 다웰비의 항복 또는 피로 파괴 등을 고려하여 결정할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. X. G. He, A. K. H. Kwan, "Modeling dowel action of reinforcement bars for finite element analysis of concrete structures," Computers and Structures, Vol. 79, pp.595-604, 2001.
2. P. Soroushian, K. Obaseki, M. C. Rojas, "Bearing strength and stiffness of concrete under reinforcing bars," ACI Mater. J., Vol. 84, No. 3, pp.179-87, 1987.
3. S. C. Yang and C. K. Hong (2007) A method for the analysis of train/slab track interaction on settled roadbed, Journal of the Korean Society for Railway, 10(3), pp. 296-305.