

# 주행안정성을 고려한 고속철도 콘크리트궤도 레일패드강성 상한값 결정

## Determination of the Upper Limit of Railpad Stiffness in Concrete Track of High-Speed Railways Considering the Running Stability of Train

양 신 추\* · 장 승 엽\*\* · 김 은\*\*\*  
Yang, Sin-Chu · Jang, Seung-Yup · Kim, Eun

### 요 약

본 연구에서는 경부고속철도의 콘크리트궤도에서 열차주행안전측면에서 관리해야할 레일패드강성의 상한값을 차량 및 궤도의 동특성과 운영환경을 고려하여 결정하는 방법을 제시하였다. 차량과 궤도의 상호작용의 해석의 중요 입력파라메타인 궤도틀림과 관련하여 프랑스 및 독일에서 제시한 궤도틀림 PSD(Power Spectral Density)와 경부 1단계구간 콘크리트궤도에서 측정한 궤도틀림 자료를 통하여 얻은 PSD를 기초로 하여 넓은 범위의 주파수영역에서 적용할 수 있는 콘크리트궤도의 궤도틀림 PSD를 제시하였다. 제시된 PSD 기준모델을 사용하여 시간영역에서의 궤도틀림 입력을 Random Generation을 통하여 구한 후 개발된 차량-궤도 상호작용해석 기법을 사용하여 레일패드에 따른 윤중감소율을 산정하였다. 산정된 윤중감소율에 대하여 국내 철도차량 안전기준에 관한 규칙의 탈선계수 규정을 적용하여 주행안전측면에서 허용할 수 있는 레일패드강성의 상한값을 제시하였다.

**Keywords:** 레일패드, 고속철도, 차량-궤도 상호작용 해석, 궤도틀림, *Power Spectral Density*

## 1. 서 론

체결구의 중요부품인 레일패드의 초기 강성이 매우 크거나 사용년도의 경과에 따라 레일패드강성이 크게 증가될 경우 차량/궤도 상호작용에 따른 동적 윤중의 증가로 레일의 피로 및 마모와 궤도구성품의 손상이 발생할 뿐만 아니라 차량의 들림에 의한 윤중의 감소로 열차의 주행안정성이 저하되게 된다. 따라서 체결장치 사용수명 동안 소정의 성능을 확보할 수 있는 레일패드강성의 상한값을 설정하여 체결구를 유지관리하는 것은 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 경부고속철도의 콘크리트궤도에서 열차주행안전측면에서 관리해야할 레일패드강성의 상한값을 차량 및 궤도의 동특성과 운영환경을 고려하여 결정하는 방법을 제시하였다. 차량과 궤도의 상호작용의 해석의 중요 입력파라메타인 궤도틀림과 관련하여 프랑스 및 독일에서 제시한 궤도틀림 PSD(Power Spectral Density)와 경부 1단계구간 콘크리트궤도에서 측정한 궤도틀림 자료를 통하여 얻은 PSD를 기초로 하여 넓은 범위의 주파수영역에서 적용할 수 있는 콘크리트궤도의 궤도틀림 PSD를 제시하였다. 제시된 PSD 기준

\* 정희원 · 한국철도기술연구원 수석연구원 scyang@krri.re.kr  
\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원 syjang@krri.re.kr  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원 eunkim@krri.re.kr

모델을 사용하여 시간영역에서의 궤도틀림 입력을 Random Generation을 통하여 구한 후 개발된 차량-궤도 상호작용해석 기법을 사용하여 레일패드에 따른 윤중감소율을 산정하였다. 산정된 윤중감소율에 대하여 철도 차량 안전기준에 관한 규칙(국토해양부, 2008)의 탈선계수 규정을 적용하여 주행안전측면에서 허용할 수 있는 레일패드강성의 상한값을 제시하였다.

## 2. 차량 및 궤도 상호작용 해석

그림 1은 차량과 궤도의 수직방향 상호작용 해석모델을 나타낸다. 차량 서브모델(Sub-model)은 차체와 2개의 대차, 그리고 4개의 윤축(wheelset)으로 구성되며, 이들은 각각 강체운동을 하는 것으로 가정하여 질점(lumped mass)으로 모델링된다. 차체와 대차를 연결하는 2차 현수장치와 대차와 윤축을 연결하는 1차 현수장치는 스프링과 감쇠(damping) 요소(element)로 모델링된다. 차량은 수직운동만 하는 것으로 가정하여 10개의 자유도 시스템으로 나타낸다. 궤도 서브모델은 레일 체결구가 강성노반 위에 놓인 것으로 하여 각각 탄성보로 모형화하였다. 최상부층을 구성하는 레일은 티모센코 연속보로 나타내진다. 하부의 체결구 및 패드는 질점, 선형스프링(linear spring) 및 댐퍼(damper)로 모델링 된다. 본 해석방법을 토대로 개발된 해석프로그램(GTDAP)은 문헌(Yang, 2009)을 통하여 사용성이 검증된 바 있다. 해석에 사용된 KTX 차량과 콘크리트궤도의 제원과 물성치는 각각 표 1과 2에 나타냈다.

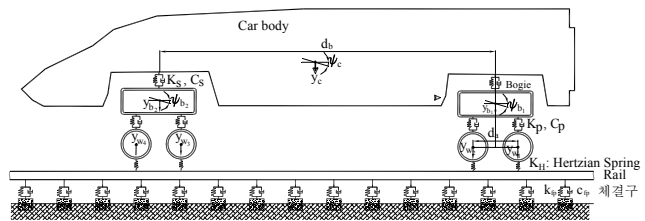


그림 1 KTX 차량과 콘크리트궤도 상호작용 해석모델

표 1 KTX 제원 및 물성치

Parameter	Value
Car body mass (loaded)	27.48ton
Car body mass moment of inertia about Y axis	565.95ton · m <sup>2</sup>
Bogie mass	1.210ton
Bogie mass moment of inertia about Y axis	1.297ton · m <sup>2</sup>
Secondary suspension stiffness	1.268x10 <sup>3</sup> kN/m
Secondary suspension damping	28.5kNs/m
Primary suspension stiffness	1.252x10 <sup>3</sup> kN/m
Primary suspension damping	16.0kNs/m
Distance between two bogie Y-direction centrelines	14.0m
Wheelset base	3.0m
Wheel radius <sup>c</sup>	0.43m

표 2 콘크리트궤도 제원 및 물성치

Parameter	Value
Rail mass per meter	60.3x10 <sup>-3</sup> ton/m
Rail cross-section area	7.687x10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup>
Elastic modulus of rail	2.10x108kN/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio of rail	0.3
Rail second moment of area	3.055x10 <sup>-5</sup> m <sup>4</sup>
Rail profile radius on top	0.3m
Timoshenko shear coefficient	0.34
Rail pad damping	변수
Rail pad stiffness	변수

## 3. 궤도틀림 모델링

그림 2는 프랑스 국철에서 양호한 궤도관리구간과 보통의 궤도관리구간에서 측정된 장과장(2~40m) 궤도틀림의 PSD, 독일 고속궤도구간에서 측정된 단과장(7m이하) 궤도틀림 PSD, ISO에서 규정한 차량의 소음성

능을 측정하기 위해서 궤도가 관리되어야하는 단과장 궤도틀림 PSD한도, 통상의 국내외 기존궤도 궤도의 PSD 등을 나타낸 것이다. 해석의 기준이 되는 PSD, 즉 Reference PSD(전 주파수 대역의 궤도틀림 PSD)를 장과장에 대해서는 프랑스의 양호한 궤도틀림 PSD를 취하고 단과장에 대해서는 독일 고속궤도 PSD를 취함으로써 그림 2의 원형마크와 같이 구축하였다. 그림 3은 이미지맵핑(Image Mapping)기법을 사용하여 경부고속궤도 콘크리트구간의 외측, 내측레일의 궤도틀림을 측정된 결과의 일부를 나타낸 것이다. 측정된 궤도틀림의 유효과장은 3m~50m이다. 국내 고속궤도 콘크리트궤도구간에서 측정된 궤도틀림(sampling: 1km 간격)의 PSD를 나타내면 그림 4와 같다. 각 구간에서 궤도틀림 PSD를 식 (1)의 프랑스와 같은 아래의 회귀식을 사용하여 PSD를 구하고 평균값을 취하면 그림 5와 같다.

$$S(f) = \frac{C}{(0.36 + 2\pi f)^3} \tag{1}$$

국내 고속궤도구간 궤도틀림을 기초로 콘크리트구간에서는 대체로 장과장구간에서는 40%정도로 작지만 단과장 영역에서는 독일 고속궤도와 비슷한 것으로 가정하여 참조 PSD의 80%를 기준 입력값으로 정하였다.

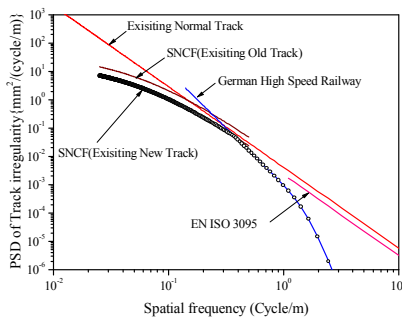


그림 2 Reference PSD

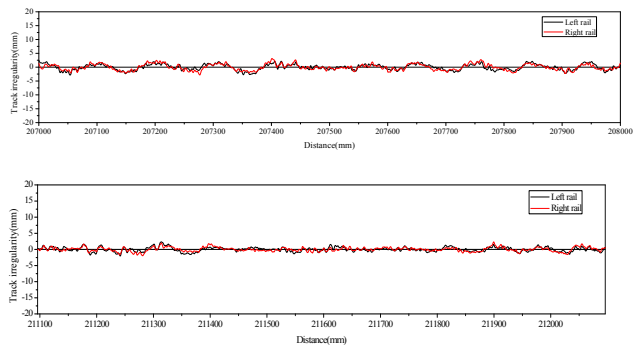


그림 3 경부고속궤도 콘크리트궤도 궤도틀림 측정결과

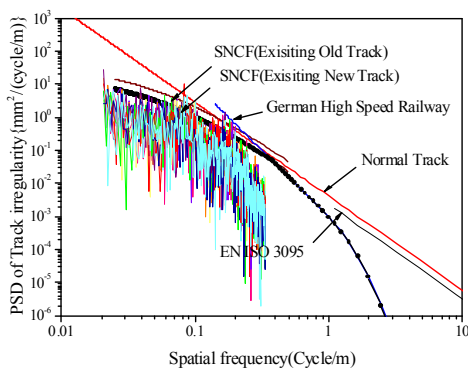


그림 4 국내고속궤도 터널구간에서 측정된 궤도틀림 PSD

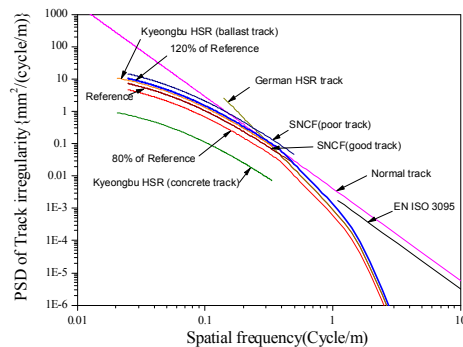


그림 5 콘크리트궤도 구간의 PSD평균값

#### 4. 운전변동에 대한 열차주행 안전 검토

본 연구에서는 열차주행안전성 측면에서 자갈궤도와 콘크리트 궤도에서 레일패드 강성에 따른 동적 운전감소율이 누적빈도를 고려한 동적 운전감소율의 허용한도기준 만족여부를 판단하였다. 이를 위해 콘크리트 궤도의 경우 앞서 제시한 궤도틀림 기본모델의 80%를 적용하여 해석을 수행하였다. 레일패드 강성범위를

100~150kN/mm범위에서 파라메타해석을 수행하였다.

그림 6은 각각 자갈케도와 콘크리트케도에서 각 케도틀림 Random Generation과 레일패드강성별 윤증감소율에 따른 누적빈도를 나타낸 것이다. 콘크리트케도의 윤증감소율에 따른 누적빈도를 나타낸 그림 6으로부터 콘크리트케도는 윤증변동율-누적빈도는 레일패드강성에 따라 차이가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 콘크리트케도의 강성이 레일패드에 의해서만 제공되기 때문에 레일패드강성의 증가가 케도지지강성의 증가로 직결되기 때문으로 판단된다. 또한 이 결과로부터 고속철도에서 콘크리트케도의 레일패드강성이 130kN/mm 이상이 될 경우 철도안전법에서 정한 윤증감소율 기준을 만족하지 못함을 알 수 있다. 따라서 기준을 만족하는 120kN/mm를 레일패드강성의 상한 값으로 정하는 것이 타당하다고 판단된다.

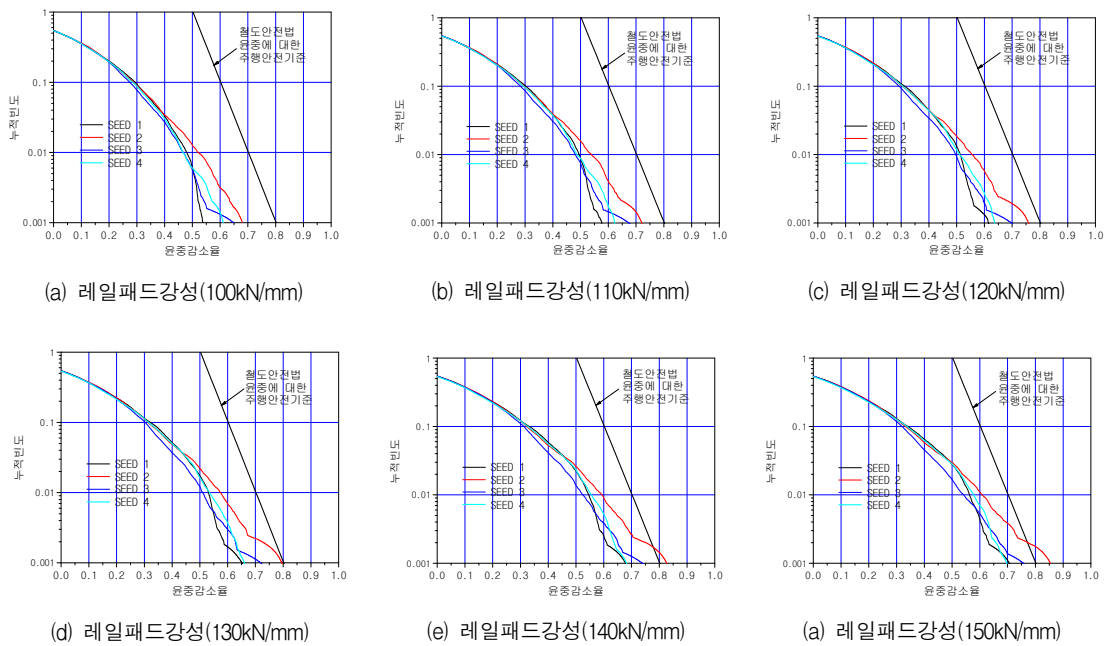


그림 6 콘크리트케도 레일패드강성에 따른 윤증감소율 빈도

## 5. 결론

본 연구에서는 경부고속철도의 자갈케도 및 콘크리트케도에서 열차주행안전측면에서 관리해야할 레일패드 강성의 상한값을 차량 및 케도의 동특성과 운영환경을 고려하여 결정하는 방법을 제시하였다. 연구결과로부터 열차주행안정성 측면에서 콘크리트케도 레일패드강성의 상한값을 120kN/mm로 정하는 것이 타당하다고 판단되었다.

## 참고문헌

국토해양부 (2008) 철도차량 안전기준에 관한 규칙, 국토해양부령 제4호(2008.03.14 일부개정).

Yang, S. C. (2009) Enhancement of the finite-element method for the analysis of vertical train-track interactions, *Proc. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 223, pp.609-620.