

# 플로팅 슬래브궤도와 일반 콘크리트궤도 접속부에서의 열차 및 궤도의 거동 분석

## Analysis of Behavior of Train and Track at Transition Zone between Floating Slab Track and Conventional Concrete Slab Track

장승엽<sup>†</sup>  
Jang, Seung Yup

양신추<sup>\*\*</sup>  
Yang, Sin Chu

박만호<sup>\*\*\*</sup>  
Park, Man Ho

조수익<sup>\*\*\*\*</sup>  
Joh, Su Ik

---

### ABSTRACT

It is of great importance to assure the running safety and ride comfort in designing the floating slab track for the mitigation of train-induced vibration. In this paper, for this, analyzed are the system requirements for the running safety and ride comfort, and then, the behavior of train and track at the transition zone between the floating slab track and the conventional concrete slab track according to several main design variables such as spring constant, damping coefficient, spacing and arrangement of isolators and slab length, using the dynamic analysis technique considering the train-track interaction. The results of numerical analysis demonstrate that the discontinuity of the support stiffness at the transition results in a drastic increase of the vertical vibration acceleration of the train body, wheel-rail interaction force, rail bending stress and uplift force. The increase becomes higher with the decrease of the spring constant of isolators and the increase of the isolator spacing, but the damping ratio does not significantly affect the behavior of train and track at the transition. Therefore, to assure the running safety and ride comfort, simultaneously increasing the effectiveness of vibration isolation, it is effective to minimize the relative vertical offset between the floating slab and the conventional track slab by adjusting the spring constant and spacing of isolators at the transition.

---

### 1. 서론

플로팅 슬래브궤도는 하부에 스프링상수가 낮은 방진재를 배치하여 열차의 진동을 효과적으로 감소할 수 있도록 구성된 일종의 질량-스프링 시스템(mass-spring system)이다. 플로팅 슬래브궤도는 일반 궤도에 비해 처침이 크고 안정성이 낮아질 수 있기 때문에 설계에 있어서 무엇보다 열차의 주행안전과 승차감의 확보가 중요하다. 특히 플로팅 슬래브궤도와 일반 궤도가 접속하는 구간에서는 지지조건의 불연속성으로 인해 열차의 불안정성이 현저히 증가될 수 있다.

본 논문에서는 플로팅 슬래브궤도 시스템의 설계를 위해 열차 주행안전과 승차감 확보를 위한 요구조건을 분석하고 열차-궤도 상호작용을 고려한 동적 해석기법을 적용하여 방진재 스프링상수, 감쇠계수, 간격 및 배치 등 주요 시스템 변수에 따라 플로팅 슬래브궤도와 일반 콘크리트궤도와의 접속부에서 열차 및 궤도의 거동을 분석하였다.

---

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원

E-mail : syjang@krii.re.kr

Tel : (031)460-5302, Fax : (031)460-5814

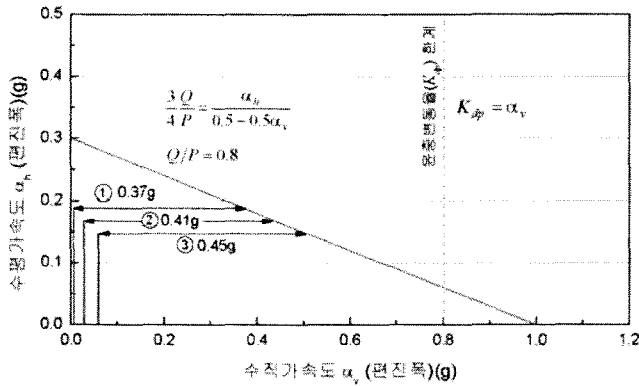
\* 정희원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 수석연구원

\*\* 비회원, 한국철도시설공단, KR연구원, 과장

\*\*\* 비회원, 한국철도시설공단, KR연구원, 부장

2. 열차 주행안전 및 승차감 확보를 위한 요구조건 분석

일본 철도구조물 등 설계표준 및 동해설 - 변위제한편(2006)[1]에 따르면 열차의 주행안전한계는 운중변동율(감소율)로 정의할 수 있다. 탈선계수 0.8의 보수적인 기준을 적용하고, 수평방향의 진동이 최대로 발생하는 경우에 대해 허용될 수 있는 운중변동율의 한계값은 0.37이 된다(그림 1 참조).



궤도틀림에 의해 발생하는 가속도의 상한값(편진폭, 곡선부 보정 후)[1]

구분	초과확률에 대응한 가속도		비고
	연직동	수평동	
①	0.03g	0.167g	
②	0.06g	0.147g	연직 동요가 탁월하는 경우
③	0.005g	0.187g	수평 동요가 탁월하는 경우

그림 1. 주행안전한계

승차감 지표는 일반적으로 일정 시간 승차했을 때의 총체적인 승차감(구간 승차감)과 각각의 지점에 있어서 순간적인 승차감(지점 승차감)으로 크게 나눌 수 있는데, 플로팅 슬래브궤도에 대해서는 차량이 해당 구간을 통과할 때의 단시간의 차량 동요를 대상으로 하기 때문에 지점 승차감으로 평가한다. 일반적으로 승차감을 평가하는 지표는 차체의 연직가속도로, 그림 #는 일본 국철에서 적용되어 오던 승차감 기준과 차량동요 관리기준을 나타내고 있다. 일본 철도구조물 등 설계표준 및 동해설 - 변위제한편(2006)[1]에서는 이 두 기준으로부터 교량 거더의 처짐한계 설정을 위한 승차감 기준을 아래와 같이 제시하고 있다.

$$\begin{aligned}
 \alpha_v &= 2.0 & f < 1.5 \\
 \alpha_v &= 3.0/f & 1.5 \leq f < 6.0 \\
 \alpha_v &= 0.5 & 6.0 \leq f \leq 20.0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

구조물 위를 통과하는 차량의 진동 파형은 경간  $L$ 을 주기로 하는 강제가진에 가까운 형태로 나타나기 때문에 여기서 차량에 의한 가진진동수  $f$ 는  $v/L$ 로 정의된다.

이 밖에 궤도구조 안정성과 관련된 항목으로 레일응력과 레일 상향력(uplift force) 등을 검토할 필요가 있다. 레일응력과 레일 상향력이 크게 발생한 경우 레일의 수명이 짧아지거나 레일패드 빠짐 등으로 인해 빈번한 유지보수를 요하게 되어 궤도 사용성이 저하될 수 있다. 레일응력의 한계값으로는 허용응력의 약 70% 수준인 90MPa을 적용하고, 레일 상향력의 경우는 레일패드가 느슨해져서 움직이는 일이 없도록 충분한 안전율을 고려하여 초기 체결력의 70% 이하를 한계값으로 설정한다[2].

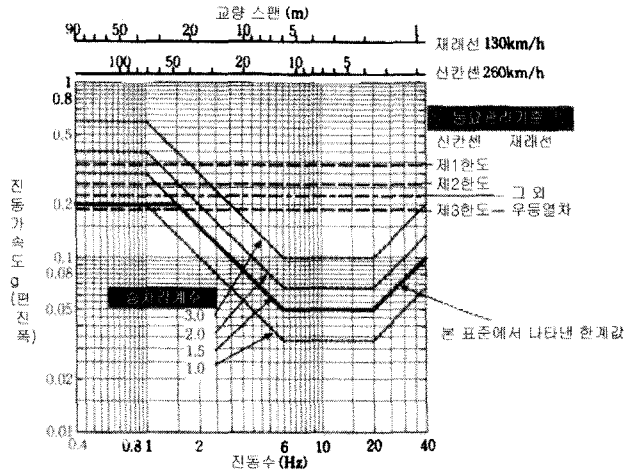


그림 2. 승차감 기준

### 3. 해석

#### 3.1 해석모형

플로팅 슬래브궤도를 주행하는 차량의 거동과 궤도의 거동을 모사하기 위하여 아래 그림 3과 같은 차량-궤도 상호작용을 고려한 동적해석모형을 적용하였다. 여기서 차륜과 레일의 상대변위  $\Delta$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta = y_w - y_r(x_w) - y_{w/r}(x_w) \quad (2)$$

여기서,  $y_w$ ,  $y(x_w)$ 는 각각  $x_w$  위치에서 차륜 및 레일변위이고,  $y_{w/r}(x_w)$ 는  $x_w$  위치에서 차륜/레일 상대조도(Relative Roughness)이다. 헤르츠(Hertz)의 이론(Esveld, 1989[3])에 의하면 상호작용력  $F_H$ 는 차륜/레일 상대변위로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_H = c_H \Delta^{3/2}, \quad \Delta \geq 0 \quad (3)$$

$$F_H = 0, \quad \Delta \leq 0$$

상세한 모형화 방법과 수치해석 방법 등에 대해서는 문헌을 참고하도록 한다[4].

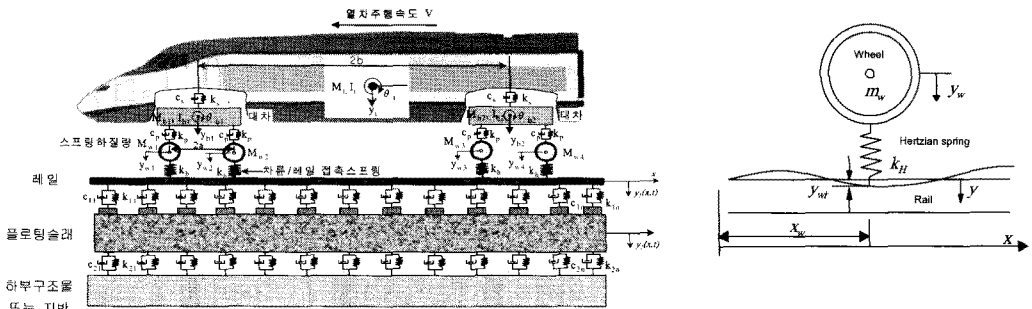


그림 3. 차량/슬래브궤도 상호작용 해석모형

### 3.2 해석변수

차량 주행 시뮬레이션을 통해 플로팅 슬래브케도 구간, 특히 일반 콘크리트케도와 플로팅 슬래브케도의 접속부에서의 케도와 차량의 거동에 대해 주행안전 및 승차감 요건을 검토하였다. 주요 해석변수는 아래와 같다.

- 시스템 고유진동수(방진장치 스프링상수) : 5.5~10Hz
- 방진장치(Isolator) 지지간격 : 2~8m (단부 지지간격 별도)
- 방진장치 감쇠비 : 5~20%
- 플로팅 슬래브케도구간-일반구간 연결부의 스프링상수 체감방안 : 아래 그림 4 참조

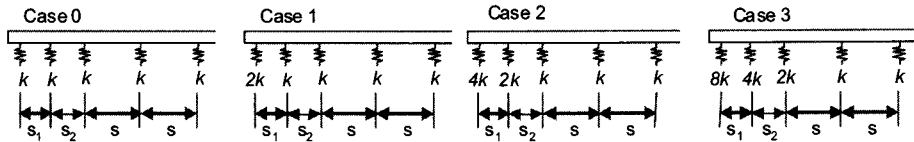


그림 4. 플로팅 슬래브 단부에서의 스프링상수 체감

### 4. 결과분석

그림 5는 고유진동수 6Hz, 스프링 간격 2m, 감쇠비 10%, L=38.4m(단경간)에 대해 새마을 5량 편성(LM+3PC+LM, LM : 동력차, PC : 객차) 차량이 200km/h 속도로 주행하는 경우 해석결과 예를 보여주고 있다. 해석결과에서 알 수 있듯이 플로팅 슬래브 단부에서 윤중 감소율, 차체 가속도, 레일응력 및 상향력(부압력) 등이 급격히 증가되고 있다. 특히 출구측에서 윤중 감소와 레일응력이 현저히 큰 것을 확인할 수 있다.

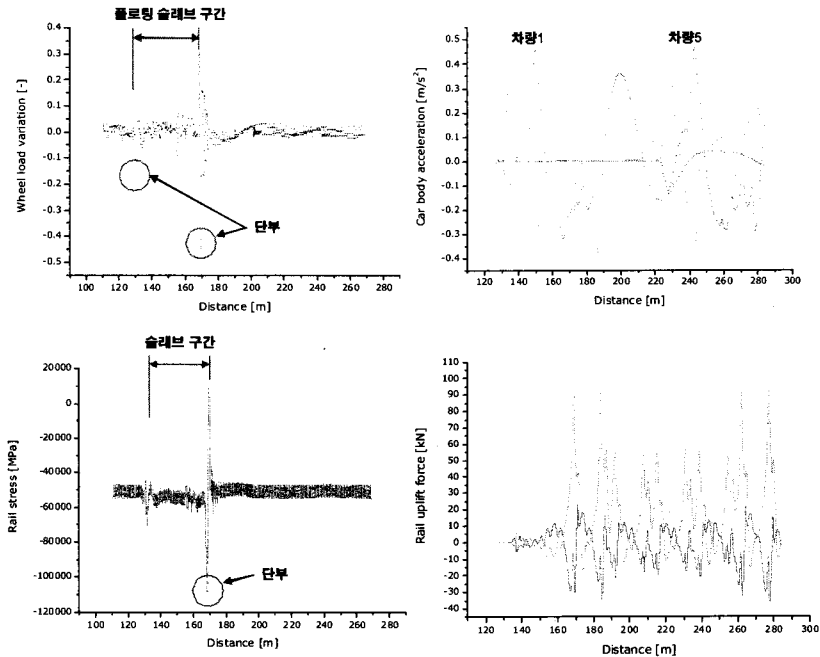


그림 5. 차량 주행 시뮬레이션 해석결과 예

(고유진동수 6Hz, 스프링 간격 2m, 감쇠비 10%, L=38.4m 단경간, 새마을 5량 편성(LM+3PC+LM), 속도 200km/h)

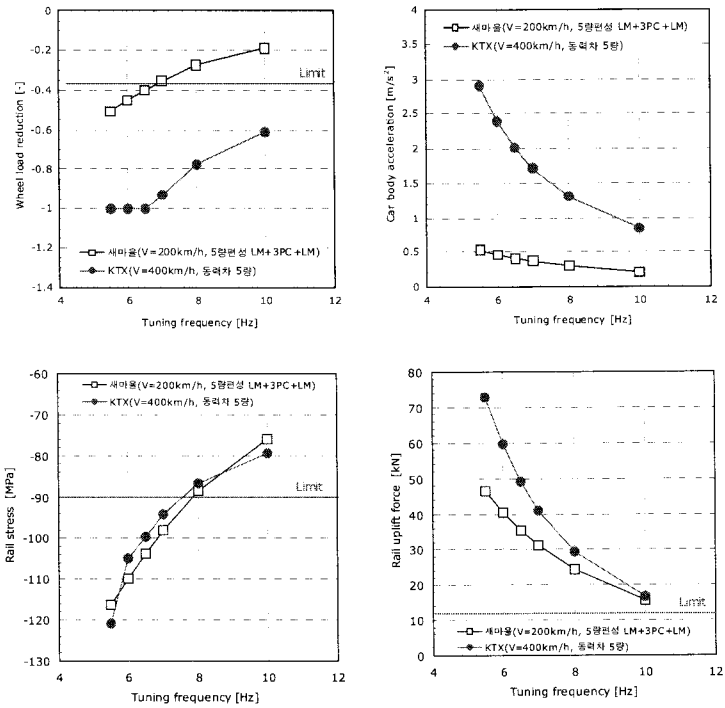


그림 6. 시스템 고유진동수에 따른 차량 및 궤도 응답  
(스프링간격 2m, 감쇠비 10%, L=38.4m 단경간)

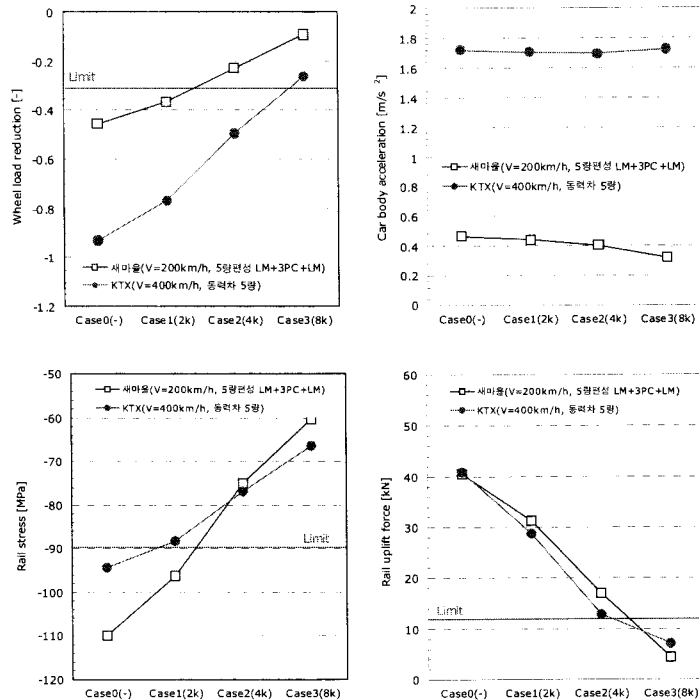


그림 7. 단부 스프링상수 채감에 따른 차량 및 궤도 응답  
(스프링간격 2m, 감쇠비 10%, L=38.4m 단경간, 고유진동수 6Hz (V=200km/h) 또는 7Hz (V=400km/h))

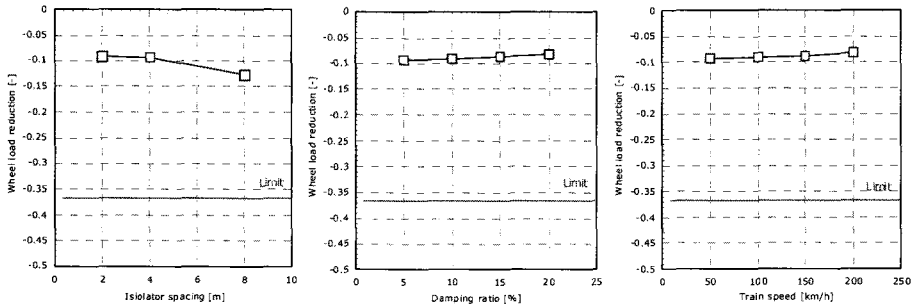


그림 8. 지지간격, 감쇠비, 열차속도에 따른 윤중변동을 비교

그림 6은 시스템 고유진동수에 따른 윤중 감소율, 차체 가속도, 레일 응력 및 상향력을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 6Hz내외의 고유진동수에서는 주행안전을 확보하기 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 앞서 그림 3.1.20의 결과에서 알 수 있듯이 윤중 감소율, 레일 응력 등 응답의 최대값은 슬래브 단부에서 레일 지지조건의 불연속으로 인해 발생하고 있다. 따라서 단부에서 스프링 간격을 좁히거나 스프링 강성을 증가하는 등의 대책을 강구함으로써 지지조건의 불연속을 완화할 필요가 있다. 그림 7은 단부의 스프링 지지강성을 점차 증가시키는 경우 윤중 감소율을 비교한 것으로, 단부의 강성이 커질수록 슬래브 단부에서의 피크치가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 단부에서의 스프링 강성의 조정으로 충분한 주행안전을 확보할 수 있다고 판단된다. 다만 차체 가속도의 경우는 단부의 스프링 강성 변화에는 영향을 상대적으로 작게 받는 것으로 나타났으나 승차감 기준(슬래브 길이를 충분히 길게 할 경우 기준치는  $2.0\text{m/s}^2$ , 2.3.2절 참조)은 충분히 만족할 수 있는 것으로 판단된다.

이 밖에 단부에서 스프링 강성을 증가할 경우에는 감쇠비, 지지간격(고유진동수는 동일하도록 지지강성 조정), 열차속도 등의 영향이 상대적으로 작은 것으로 나타났다(그림 8). 그러나 감쇠비의 경우는 공진점 부근에서 전달을 저감을 위해서는 어느 정도 수준 이상의 값을 확보해야 하며, 이것은 방진효율의 측면에서 고려되어야 한다.

## 5. 결론

이상 본 논문에서는 플로팅 슬래브궤도의 설계를 위해 열차 주행안전과 승차감 확보를 위한 요구조건을 분석하고 열차-궤도 상호작용을 고려한 동적 해석기법을 적용하여 방진재 스프링상수, 감쇠계수, 간격 및 배치 등 주요 시스템 변수에 따라 플로팅 슬래브궤도와 일반 콘크리트궤도와와의 접속부에서 열차 및 궤도의 거동을 분석하였다. 해석결과에 따르면 접속부에서 플로팅 슬래브와 일반 궤도 슬래브 간의 지지강성의 불연속에 의해 차량의 연직가속도와 차륜-레일 상호작용력, 레일응력, 상향력 등이 현저히 증가하게 되며, 그 증가정도는 스프링상수가 낮고 간격이 넓을수록 더욱 커지는 반면 감쇠비는 접속부 거동에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 따라서 방진효율을 증가시키면서 동시에 주행안전과 승차감을 확보하기 위해서는 접속부에서 방진재 스프링상수와 간격을 조정하여 플로팅 슬래브와 일반 궤도 슬래브의 상대 연직단차를 최소화하는 방안이 효과적인 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 일본 철도구조물 등 설계표준 및 동해설 - 변위제한편(2006).
2. Momoya, Y 외, 코일스프링 방진궤도의 성능평가, 철도총연보고(RTRI Report), April 2001.
3. Esveld, C. Modern Railway Track, 2nd ed., 1989.
4. 양신추, 차량과 궤도의 상호작용을 통한 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정, 대한토목학회논문집, 제17권 I-1, 1997.