

# 차량-궤도 상호작용 해석을 통한 사전 제작형 플로팅 슬래브 궤도의 동적 안정성 검토

장동두<sup>1\*</sup>, 김진호<sup>1</sup>, 권세곤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 스마트역사연구팀, <sup>2</sup>한국철도공사

## Evaluation of Dynamic Stability of Precast Floating Slab Track with Vehicle-Track Interaction Analysis

Dongdoo Jang<sup>1\*</sup>, Jin-Ho Kim<sup>1</sup>, Se-Gon Kwon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Smart Station Research Team, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>Research Institute, Korail

**요약** 기존 선하역사의 소음 및 진동 문제를 해결하기 위해 제안된 사전 제작형 플로팅 슬래브 궤도는 길이 5m 정도의 슬래브 패널을 공장에서 제작하고 방진장치를 설치하여 일체화한 궤도이다. 이를 통해 별도의 열차 운행 중단 없이 급속 시공이 가능하여 신설역사 뿐 아니라 기존 선하 역사에 적용이 가능한 장점이 있다. 그러나 패널 길이가 5m로 짧아 실제 시공 구간 길이에 따라 다수의 패널이 설치되어야 함에 따라 궤도의 불연속 구간이 많이 발생한다. 또한 플로팅 슬래브 궤도의 작동 원리 상 일반 궤도에 비해 차량 운행으로 인한 과도한 변위가 발생할 여지가 있고 기존 궤도와의 접속부에서의 지지 강성 차이로 인해 동적 불안정성이 발생할 우려가 있다. 본 연구에서는 사전 제작형 플로팅 슬래브 궤도에 대해 차량-궤도 상호작용 해석을 수행하여 윤중변동율, 차체가속도, 레일응력 및 상압력의 검토를 통해 동적 안정성을 확인하였다. 검토 결과 플로팅 궤도 구간 내에서의 동적 안정성은 확보하는 것으로 나타났지만 기존 궤도와의 접속부에서는 일부 기준을 초과하는 것으로 나타나 이를 해소하기 위한 방진장치 배치 방안을 제시하였다.

**Abstract** A precast floating slab track with a 5m slab panel and installed with isolators is proposed to solve the noise and vibration problem at existing elevated railway stations. Thus, the construction can be carried out rapidly without interrupting the train operation. However, dynamic instability problems may be caused by repeated discontinuities in track due to the short slab panel length and excessive rail displacement due to the inherent operation mechanism of a floating system in reducing the vibration. Furthermore, the difference of the supporting stiffness at the transition between the floating track and ballast track may raise problems. In this study, the assessment factors to evaluate the dynamic stability of the precast floating slab track are presented and assessed with the vehicle-track interaction analysis. Through the analysis, all values relevant to the stability at the floating track section are found to be acceptable, and the slab panels at the transition section are designed to satisfy the stability.

**Keywords** : Dynamic Stability, Elevated Railway Station, Noise and Vibration, Precast Floating Slab Track, Vehicle-Track Interaction

### 1. 서론

최근 철도부지 확보의 어려움으로 철도 선로의 입체

화가 진행되면서 선로 하부의 유휴공간을 활용하여 역사를 건축하는 선하역사의 건설이 증가하고 있는 추세이다. 이는 선하역사가 부지면적을 최소화하고 여객동선을

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(16RTRP-B072484-04)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Dongdoo Jang(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5740 email: ddjang@krri.re.kr

Received February 22, 2017

Revised February 27, 2017

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

단축할 수 있어 경제적이기 때문이다. 그러나 선로가 대합실, 상가시설, 역무실 등의 역사 바로 위에 위치하기 때문에 열차 운행으로 차량-궤도에서 발생하는 하중 및 진동이 직접적으로 역사 구조물로 전달되므로 타 형식의 역사에 비해서 소음 및 진동에 더 취약한 구조이다. 특히 도심지와 같은 인구 밀집 지역에 위치한 공간 활용에 대한 요구가 증가하고, 역사 내 정온시설의 입점이 늘어남에 따라 고도의 진동 제어 대책이 더욱 필요하다.

선하역사에서 열차의 운행으로 발생하는 하중 및 진동은 궤도 및 교량을 통하여 주요 구조재인 기둥, 슬래브, 벽체 등을 통하여 전달되며, 이로 인하여 역사 공간에서도 구조재의 진동으로 공기를 진동시키고 이의 진동수가 가청주파수에 해당할 경우 소음으로 발생하는 2차 소음(structure-borne noise) 피해가 발생한다. 소음 및 진동의 저감을 위한 대책은 일반적으로 발생원(sorce), 전달경로(path), 응답원(receiver)에서 각각 수립이 가능하지만, 선하역사의 경우와 같이 발생원이 명확한 경우에는 발생 가진원에서의 대책을 수립하는 것이 가장 효과적이다. 철도의 발생원 대책으로 가장 효과적인 방법 중 하나는 플로팅 슬래브 궤도 공법이다[1-3].

열차 운행으로 인한 가진 하중은 궤도를 통해 하부 구조물로 전달되는데 이 때 궤도는 일종의 필터 역할을 한다. 플로팅 슬래브 궤도는 슬래브 궤도와 하부 구조물 사이에 방진장치를 설치해 궤도를 하부구조물과 격리시킴으로써 궤도를 저역필터(Low pass filter)화 하는 것이다. 다시 말해 플로팅 슬래브 궤도 시스템은 특정 주파수 이상의 가진하중을 감소시켜서 하부 구조물로 전달되도록 하는 시스템이다.

플로팅 슬래브 궤도는 국내외 다수의 사례를 통해 소음 및 진동 저감 효과가 검증된 바 있다[1-4]. 그러나 기존 대부분의 플로팅 궤도는 현장 타설식 공법을 적용하고 있다. 따라서 신설 역사 또는 장기간 열차 운행을 중단이 가능한 역사 등에서는 적용이 가능하나, 도심지 교통의 중요한 역할을 하고 있는 일반철도 및 도시철도와 같이 열차 운행의 중단이 곤란한 기존 운영 선상의 역사에는 적용이 불가능하다.

이와 같은 기존 역사의 소음 및 진동 문제를 해결하기 위해 급속 시공이 가능한 사전 제작형 플로팅 슬래브 궤도에 대한 연구가 현재 이루어지고 있다[5]. 사전 제작형 플로팅 슬래브 궤도는 길이 5m정도의 패널을 프리캐스트로 공장에서 제작하고 방진장치를 설치하여 일체화한

궤도이다. 이를 통해 야간 열차 차단 시간동안 시공이 가능해 별도의 열차 운행 중단 없이 기존 역사의 소음 및 진동 저감을 해결할 수 있다. 그러나 제작 및 시공 편의성을 위해 슬래브 패널의 길이가 다소 짧아 궤도의 불연속 구간이 자주 반복되어 나타난다. 또한 플로팅 슬래브 궤도의 작동 원리 상 일반 궤도에 비해 열차 운행 중 과도한 변위가 발생할 여지가 있고 기존 궤도와의 접속부에서의 지지강성 차이로 인한 동적 불안정성이 발생할 우려가 있다[6]. 이에 따라 동적 해석을 통해 열차 주행 중 안정성에 대한 검토를 수행해야 한다.

본 연구에서는 차량-궤도 상호작용 해석을 통해 사전 제작형 플로팅 슬래브 궤도의 열차 주행 중 동적 안정성을 검토하였다. 그리고 기존 자갈궤도와의 접속구간에서 발생할 수 있는 동적 불안정성을 해소하기 위한 방안을 마련하였다.

## 2. 동적 안정성 검토 항목

궤도 구조물의 동적 안정성과 관련해서 검토해야 할 항목들은 크게 안전성, 사용성, 복구성과 관련한 것들로 나눌 수 있다. 안전성과 관련된 것으로는 상시 주행 안전성이 있고 사용성으로는 승차감, 복구성으로는 궤도의 구조 안정성이 있다.

### 2.1 열차 주행 안전성

열차 주행 안전성은 일반적으로 식 (1)과 같이 동적 윤중에 대한 횡압의 비로 표현되는 탈선계수와 식 (2)의 윤중 감소율을 통해 검토를 하게 된다.

$$K_{PQ} = \frac{Q}{P} = \frac{8}{3} \frac{a_h}{1 - a_v} \quad (1)$$

$$K_{dP} = \frac{\Delta P}{P_0} = a_v \quad (2)$$

여기에서  $K_{PQ}$  는 탈선계수,  $P$ ,  $Q$ 는 각각 궤도틀림에 의한 동적 윤중과 횡압,  $a_v$ ,  $a_h$ 는 각각 차체의 연직 및 수평가속도,  $K_{dP}$ 는 윤중감소율,  $P_0$ ,  $\Delta P$ 는 각각 정적 윤중과 윤중 변동분이다. 탈선계수와 윤중감소율의 설계 한계값은 국내 철도차량안전기준에 관한 규칙[7] 및 일본의 ‘철도구조물 등 설계표준·동해설, 변위제한’[8] 등으로부터 0.8로 제한하고 있다.

차체의 응답은 궤도 구조물의 변위 응답에 의한 응답과 궤도 틀림에 의한 응답으로 이루어져 있다. 플로팅 슬래브 궤도에 의한 주행 안전성을 검토하기 위해서는 궤도 구조물의 변위 응답에 의한 차체 응답만을 고려해야 하는데, 일본 ‘철도구조물 등 설계표준·동해설, 변위제한’[8]에서는 각종 차량 형식의 주행 데이터를 정리하여 궤도 틀림에 의해 발생하는 가속도의 상한치 초과확률에 기반하여 제시하고 있다. 이에 따르면 수평방향 가속도의 최대치는 0.187g이고 이 때 연직가속도는 0.005g이다. 수평가속도 0.187g와 탈선계수의 한계값 0.8을 식 (1)에 대입하여 정리하면 연직가속도의 한계값은 다음과 같이 0.377g가 된다.

$$0.8 = \frac{8}{3} \frac{0.187}{1 - a_v} \rightarrow a_v = 0.377g \quad (3)$$

이는 차체 연직가속도의 전체 응답으로 궤도 틀림에 의한 응답 0.005g를 제외한 나머지 0.372g가 궤도 구조물의 변위 응답에 의한 차체 연직가속도의 한계값이 된다. 또한 윤중 감소율의 한계값은 식 (2)로부터 동일하게 0.372가 된다.

## 2.2 승차감

승객의 승차감은 일반적으로 차체의 가속도를 지표로 평가한다. 일본 ‘철도구조물 등 설계표준·동해설, 변위제한’[8]에서는 일본 국철에서 구조물 설계에 이용하는 승차감 기준과 궤도틀림 관리에 적용하는 차량 동요 관리 기준을 참고하여 다음과 같이 연직방향의 승차감 설계 한계값을 제시하고 있다.

$$a_v (m/s^2) = \begin{cases} 2.0 & f < 1.5 \\ 3.0/f & 1.5 \leq f < 6.0 \\ 0.5 & 6.0 \leq f \leq 20.0 \end{cases} \quad (4)$$

여기에서  $a_v$ 는 차체의 연직가속도의 편진폭,  $f$ 는 주파수이다. 이는 승차감을 위한 일본 국철 가속도 기준 중 ‘승차감 양호’에 해당하는 기준에서 1.5Hz 저주파 대역에서는 차량 동요 관리기준 중 제3한도 기준에 따라 차체 가속도를 0.2g로 제한한 값이다.

사전 제작형 플로팅 궤도를 지나는 열차에서 발생하는 차량 연직 가속도는 차량의 동역학, 궤도의 틀림, 하부 방진장치의 강성, 슬래브 패널의 길이와 차량의 속도

에 따른 가진 주파수 등의 영향으로 인해 여러 주파수 성분을 포함하고 있다. 따라서 특정 주파수를 결정해 차체 가속도 시간열의 최대값을 검토하는 것은 정확하지 않을 수 있다. 그러나 차체 진동의 여러 주파수 성분 중 가장 큰 가속도 크기를 발생시키는 것은 차량의 현가장치에 의한 성분으로 판단되고 이는 1Hz 내외가 될 것이기 때문에 차량 연직가속도의 한계값으로 2.0 m/s<sup>2</sup>을 적용한다. 여기에 궤도 틀림과의 경합을 고려하여 이의 70% 수준[9]인 1.4m/s<sup>2</sup>을 한계치로 설정하였다.

## 2.3 구조안정성

사전 제작형 플로팅 궤도의 구조 안정성을 검토하기 위한 항목으로는 주요 구조 부재인 레일과 슬래브의 응력, 레일 체결장치에서의 레일 상향력, 방진장치의 응력이다. 이 중 방진장치와 관련된 것은 실험적으로 검증해야 하고 슬래브의 응력의 경우 단위 패널의 길이가 5m로 짧은 편이고 하부에 슬래브 패널의 휨강성 대비하여 강성이 작은 방진장치가 설치되어 있기 때문에 휨변형이 거의 발생하지 않을 것으로 판단되어 검토 항목에서 제외하였다.

### 2.3.1 레일 응력

피로를 고려한 60kg 레일의 허용응력은 일반적으로 130MPa 내외이다[10]. 본 해석에서는 궤도틀림을 고려하지 않기 때문에 실제로는 궤도틀림의 영향으로 레일응력이 증가할 여지가 있다. 이를 고려하여 레일 응력의 한계치는 130MPa의 70% 정도[9]인 90MPa로 하였다.

### 2.3.2 레일 상향력

레일체결장치 위치에서 레일의 상향력이 어느 이상 크게 발생하게 되면 레일패드와 빠지거나 틀어지게 된다. 그렇게 되면 레일의 틀림이나 슬래브 패널이 손상이 발생할 여지가 있어 잦은 유지보수가 필요하게 된다. 이를 방지하기 위해 레일 상향력을 레일 체결장치의 초기 체결력 이하로 제한할 필요가 있는데, 통상적인 레일 체결장치의 초기 체결력은 20 kN 내외이다[11]. 여기에 궤도 틀림과의 경합 및 안전율을 고려하여 70% 수준[9]인 14kN을 레일 상향력의 한계치로 하였다.

## 3. 차량-궤도 상호작용 해석

### 3.1 차량-궤도 상호작용 해석 모델

사전 제작형 플로팅 슬래브를 주행하는 차량과 궤도의 동적 응답의 검토를 위해 차량-궤도 상호작용을 고려한 동적 해석을 수행하였다[12]. 거동은 차량 주행 방향과 연직방향의 2차원 내에서 이루어지는 것으로 가정하였고 횡방향은 고려하지 않았다.

차량은 차체, 대차, 윤축에서 자유도를 갖는 것으로 가정하였고 대차와 윤축 사이에는 1차 현수장치로, 차체와 대차 사이에는 2차 현수장치로 연결되어 있는 것으로 하였다. 차체, 대차, 윤축은 탄성 변형이 없는 강체로 모델링하였고 각 현수 장치는 스프링과 댐퍼로 모델링하였다. 차량과 레일의 접촉은 비선형 스프링인 Hertzian 스프링 요소를 사용하였다(Fig. 1).

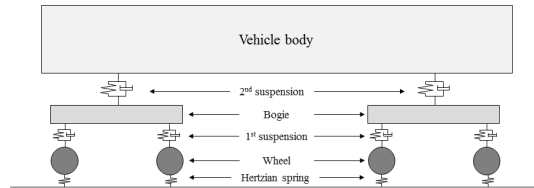


Fig. 1. Vehicle modeling

차량 모델은 KTX 고속열차와 새마을 열차를 사용하였다. KTX 차량은 10량(동력차-동력객차-객차 6량-동력객차-동력차) 1편성을 고려하였고 새마을 차량은 5량(동력차-객차 3량-동력차) 1편성을 고려하였고 열차의 운행 속도는 각각 300km/h, 150km/h이다. 해석에 사용한 각

차량의 물성치는 Table 1과 같다[13, 14].

사전제작형 플로팅 슬래브 궤도는 기존의 자갈도상 궤도 일부 구간을 대체하는 것으로 이를 고려하여 본 해석에서는 Fig. 2와 같이 자갈궤도 구간 사이에 플로팅 궤도 구간이 위치하도록 고려하였다. 플로팅 궤도 구간의 길이는 100m이고 자갈궤도 구간의 길이는 앞 뒤로 각각 50m를 모델링하였다. 플로팅 궤도 구간의 모델은 레일과 궤도 슬래브의 2중보로 모델링하였으며 레일과 슬래브 사이에는 체결장치의 레일패드, 슬래브 하부는 방진장치가 지지하고 있다. 자갈궤도 구간은 마찬가지로 레일과 침목의 2중보로 모델링하였으며 하부는 자갈도상과 C형 매트로 지지하고 있다. 레일과 궤도 슬래브는 티모셴코 보요소로 모델링하였으며 레일패드, 방진장치 및 자갈-방진매트는 스프링-댐퍼로 모사하였다. 해석에 사용한 궤도 물성치는 Table 2와 같다.

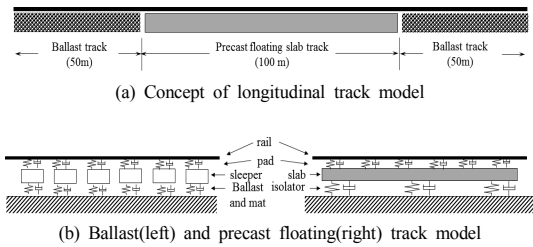


Fig. 2. Track modeling

Table 1. Properties of vehicles [13, 14]

Parameter	Saemaoul		KTX			
	Locomotive	Passenger Car	Power car	Motorized Passenger Car	Passenger Car	
mass	Vehicle body(ton)	56.46	29.92	54.96	42	26.5
	Vehicle body inertia moment(ton·m <sup>2</sup> )	1526.54	1885.28	1131.9	1643.6	955.3
	Bogie(ton)	3.5	3.5	2.42	3.076	3.018
	Bogie inertia moment(ton·m <sup>2</sup> )	3.012	3.012	2.594	3.26	3.2
	Axle(ton)	2.648	1.786	2.048	3.004	2.104
stiffness	Primary suspension(MN/m)	1.518	2.04	2.504	2.504	1.65
	Secondary suspension(MN/m)	1.582	0.6	2.536	0.8	0.6
damping	Primary suspension(MN·sec/m)	0.06	0.074	0.04	0.06	0.024
	Secondary suspension(MN·sec/m)	0.08	0.04	0.02	0.02	0.012
dimension	Bogie distance(m)	15.2	15.9	14	18.3	18.7
	Axle distance(m)	2.6	2.6	3	3	3
	Wheel radius(m)	0.43	0.46	0.46	0.46	0.46

Table 2. Properties of tracks

Parameter		Value
Rail	Elastic modulus(kPa)	$2.1 \times 10^8$
	Poisson's ratio	0.3
	Mass(ton/m)	$60.3 \times 10^3$
	Section area(m <sup>2</sup> )	$7.75 \times 10^3$
	Moment of inertia of area(m <sup>4</sup> )	$3.09 \times 10^5$
Rail pad	Stiffness coefficient(kN/m)	$2.0 \times 10^5$
	Damping coefficient(kN-sec/m)	$3.27 \times 10^4$
	200	
Slab	Length(m)	4.925
	Width(m)	0.9
	Height(m)	0.3
	Elastic modulus(kPa)	$356.8 \times 10^5$
	Poisson's ratio	0.18
	Mass(ton/m)	0.772
	Section area(m <sup>2</sup> )	0.27
Ballast and mat	Moment of inertia of area(m <sup>4</sup> )	$2.0 \times 10^3$
	Stiffness coefficient(kN/m)	$4.5 \times 10^4$
	Damping coefficient(kN-sec/m)	200

3.2 해석결과

그림 Fig. 3~6은 차량-궤도의 동적 상호작용 해석 결과를 보여준다. 모든 항목에서 플로팅 궤도 구간 내에서는 기준치 이내에 존재하고 있어 주행 안정성 및 승차감, 구조 안정성에서 문제가 없는 것으로 판단된다. 그러나 플로팅 궤도와 자갈궤도와의 접속부에서는 새마을 열차의 경우 레일 응력 항목에서 KTX 차량의 경우 운중변동율이 기준치에 근접한 결과를 보이고 있고 레일 상향력의 경우 기준치를 초과하는 것으로 나타났다.

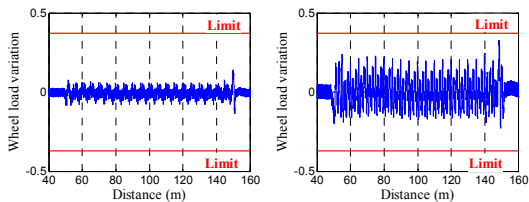


Fig. 3. Wheel load variation: Saemaeul(L), KTX(R)

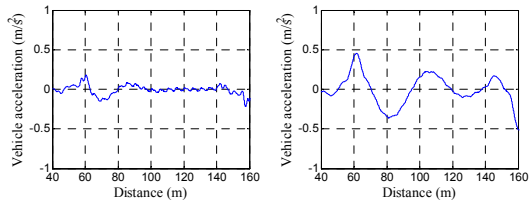


Fig. 4. Vehicle acceleration: Saemaeul(L), KTX(R)

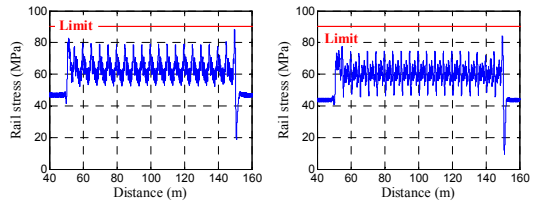


Fig. 5. Rail stress: Saemaeul(L), KTX(R)

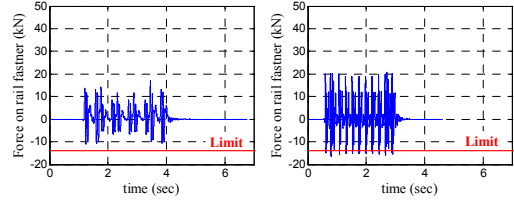


Fig. 6. Force on rail fastener: Saemaeul(L), KTX(R)

이와 같이 접속부에서의 급격한 궤도 및 차량의 응답 증가는 사전 제작형 플로팅 궤도와 자갈궤도와의 지지강성 불균일, 즉 방진장치만으로 슬래브 패널을 지지함으로 인해 지지강성이 낮아졌기 때문이다. 지지강성 불균일을 완화하기 위해서는 플로팅 궤도의 지지강성을 높여야 하는데 이를 위해서는 접속구간에서의 플로팅 궤도 방진장치의 강성을 높이거나 방진장치의 개수를 늘리는 방법이 있다. 이에 따라 접속구간 플로팅 궤도 시스템의 2개 패널에 대해 방진장치의 강성을 Table 3과 같이 조정하여 동적 안정성을 검토하였다. Case0은 별다른 조정을 하지 않은 경우이고 Case1은 개수는 동일하게 두고 강성만을 키운 경우, Case2는 강성은 동일하게 두면서 설치 개수를 늘린 경우이다.

Table 3. Analysis conditions of transition section

case 0	22.5kN/mm × 3ea	22.5kN/mm × 3ea	
case 1	30kN/mm × 3ea	30kN/mm × 3ea	
case 2	22.5kN/mm × 4ea	22.5kN/mm × 6ea	

기존 자갈궤도와의 접속구간에 대한 동적 안정성 검토 결과를 Fig. 7~9과 같이 정리하였다. 검토 결과 지지강성을 높이기 위한 Case1과 2, 두 경우 모두 관련 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 이에 따라 Case1과 2

중 어느 방안을 선택하더라도 동적 안정성은 만족하지  
 만, 수치 상으로는 Case2가 더 낮은 결과를 보이고 있어  
 보다 안전할 것으로 판단된다. 또한 방진장치를 강성이  
 다른 2종류로 하는 것보다는 동일한 강성을 갖도록 설계  
 를 하는 것이 제작 및 사후 관리 측면에서 보다 유리할  
 것으로 판단된다. 이에 따라 Case2를 사전 제작형 플로  
 팅 슬래브 궤도의 접속부 설계 방안으로 제시한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존 선하역사의 소음 및 진동 문제를  
 해결하기 위해 제안된 사전제작형 플로팅 슬래브 궤도에  
 대해 열차 주행 중 동적 안정성을 검토하였다. 열차 주행  
 중을 고려하기 위해 차량과 궤도를 한꺼번에 고려한 상  
 호작용 해석을 수행하였고 탈선계수 및 운중감소율 검토  
 를 통한 열차 주행 안정성, 차체 가속도를 통한 승차감,  
 레일 응력 및 레일 상향력을 통해 동적 안정성을 판단하  
 였다. 대상 차량은 5량 1편성의 새마을 열차와 10량 1편  
 성의 KTX를 사용하였다. 궤도 모델은 기존 자갈궤도와  
 의 접속부에서의 응답을 보기 위해 플로팅 궤도 100m  
 구간 양 쪽에 각각 50m 구간의 자갈궤도 구간을 모델링  
 하였다.

동적 안정성 검토 결과 플로팅 궤도 구간 내에서는 모  
 든 검토 항목을 만족하였다. 그러나 기존 자갈궤도와  
 의 접속부에서는 기준치에 근접하거나 일부 항목에서 기준  
 치를 초과하는 것으로 나타나 조치가 필요한 것으로 나  
 타났다. 이는 플로팅 궤도와 자갈궤도의 지지강성 차이  
 때문으로 판단되는 바 접속 구간 플로팅 슬래브 패널의  
 지지강성을 높임으로써 해결할 수 있을 것으로 보이고,  
 방진장치 설치 개수를 늘림으로써 동적 안정성을 확보함  
 을 확인하였다.

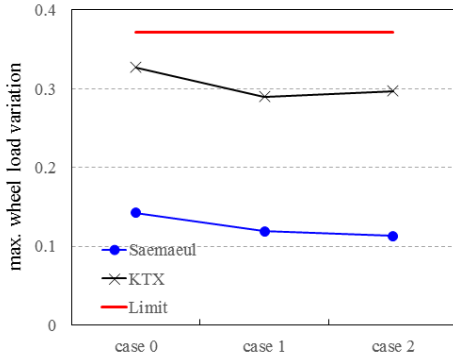


Fig. 7. Max. wheel load variation

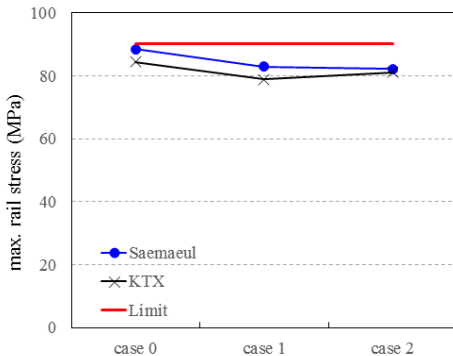


Fig. 8. Max. rail stress

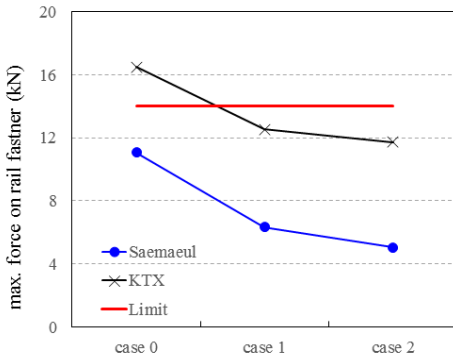


Fig. 9. Max. force on rail fastener

#### References

- [1] H. G. Wagner, "Attenuation of transmission of vibrations and ground-borne noise by means of steel spring supported low-tuned floating track-beds", *2002 World Metro Symposium*, Taipei, 2002.
- [2] F. Cui, C. H. Chew, "The effectiveness of floating slab track system-Part 1. receptance methods", *Applied Acoustics*, vol. 61, pp. 441-453, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00014-1)
- [3] C. M. Kuo, C. H. Huang, Y. Y. Chen, "Vibration characteristics of floating slab track", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 317, pp. 1017-1034, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.051>
- [4] Y. S. Jang, I. W. Lee, Y. S. Kang, "Track system technology for future advanced railway construction", *KSCE Magazine*, vol. 61, no. 9, pp. 41-51, 2013.
- [5] Y. S. Koh, Y. S. Ji, H. S. Choi, S. H. Choi, "Optimum Design Property Estimation of the Precast Floating Track System for Vibration Reduction", *Journal of Society of Hazard Mitigation*, vol. 16, no. 2, pp. 69-76, 2016. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.2.69>
- [6] S. Y. Jang, S. C. Yang, "Assessment of train running

safety, ride comfort and track serviceability at transition between floating slab track and conventional concrete track”, *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 15, no. 1, pp. 48-61, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.1.048>

- [7] Standards for railway vehicle safety criteria, Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2013.
- [8] Design Standards for Railway Structures and Commentary-Limit for displacement, Railway Technology Research, 2006.
- [9] A. Namura, K. Matsuo, S. Miura, *Introduction of buffers into a transitional track stiffness region*, RTRI report, vol. 11, no. 2, pp. 39-42, 1997.
- [10] S. C. Yang, M. C. Kim, J. S. Kim, “Prediction of bending fatigue limits of rail welded parts”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, vol. 20, no. 1-D, pp. 97-106, 2000.
- [11] C. Esvelde, *Modern Railway Track*, 3rd ed., MRT productions, 2001.
- [12] S. C. Yang, “Enhancement of the finite-element method for the analysis of vertical train-track interactions”, *Proc. of IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit*, vol. 223, pp. 609-620, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1243/09544097JRR285>
- [13] M. C. Kim, “Development of a quasi-three dimensional train/track/bridge interaction analysis program for evaluating dynamic characteristics of high speed railway bridge”, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, vol. 16, no. 2, pp. 141-151, 2003.
- [14] H. U. Lee, *A Study on the Analysis of Dynamic Behavior and Performance Evaluation Test of SCP Bridge*, Korea Railroad Research Institute, Shin-Sung Engineering & Construction Co., 2006.

**김 진 호(Jin-Ho Kim)**

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울시립대학교 대학원 구조공학 (공학석사)
- 2003년 9월 : UC Davis 토목공학과 (공학박사)
- 2001년 5월 ~ 2003년 2월 : California D.O.T. 연구원
- 2003년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>  
철도토목, 소음·진동

**권 세 곤(Se-Gon Kwon)**

[정회원]



- 2007년 8월 : 군산대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2013년 8월 : 군산대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2005년 3월 ~ 2013년 7월 : 한국철도공사 전북본부
- 2013년 8월 ~ 현재 : 한국철도공사 연구원 책임연구원

<관심분야>  
철도토목, 재난·안전

**장 동 두(Dongdo Jang)**

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사
- 2003년 3월 ~ 2007년 7월 : ㈜티이솔루션 연구원
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사
- 2014년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>  
궤도토목, 진동제어