

## 고속철도 자갈궤도 체결구 최적 수직강성 평가

### Evaluation of the Optimal Vertical Stiffness of a Fastener Along a High-speed Ballast Track

양신추\* · 김 은

Sin-Choo Yang · Eun Kim

**Abstract** By increasing the vertical stiffness of the rail fastening system, the dynamic wheel load of the vehicle can be increased on the ballast track, though this increases the cost of track maintenance. On the other hand, the resistance acting on the wheel is decreased, which lowers the cost of the electric power to run the train. For this reason, the determination of the optimal fastener stiffness is important when attempting to minimize the economic costs associated with both track maintenance and energy to operate the train. In this study, a numerical method for evaluating the optimal vertical stiffness of the fasteners used on ballast track is presented on the basis of the process proposed by López-Pita et al. They used an approximation formula while calculating the dynamic wheel load. The evaluated fastener stiffness is mainly affected by the calculated dynamic wheel load. In this study, the dynamic wheel load is more precisely evaluated with an advanced vehicle-track interaction model. An appropriate range of the stiffness of the fastener applicable to the design of ballast track along domestic high-speed lines is proposed.

**Keywords** : High-speed railway, Ballast track, Track maintenance cost, Energy cost, Fastener stiffness

**초 록** 자갈궤도에서 레일과 침목을 연결하는 체결장치의 레일패드 강성이 증가함에 따라 윤증이 증가하고 궤도틀림진전이 증가되어 궤도유지보수비가 증가하게 된다. 반면에 레일패드강성이 감소하면 차량운행에 따른 전력소모비가 증가하게 된다. 따라서 자갈궤도 설계 시에 차량과 궤도 및 운영조건을 고려하여 궤도유지보수비와 전력소모비를 가급적 작게 할 수 있는 적정 레일패드강성을 결정하는 것은 철도 경제성 확보차원에서 중요한 과제라 할 수 있다. 본 연구에서는 López Pita 등이 제시한 자갈궤도에서의 최적레일패드 강성을 평가하는 프로세스를 기초로 적정 레일패드강성 범위를 구하였다. 연구결과에 중요한 영향을 주는 레일패드강성에 따른 윤증변화를 보다 정확하게 평가하기 위하여 궤도구성품의 거동특성을 보다 상세하게 고려할 수 있는 고도화된 수치해석적 기법을 사용하여 평가하였다. 또한 국내에서의 차량, 궤도 운영조건을 고려함으로써 국내에서 궤도설계에 적용할 수 있는 적정 레일패드강성 범위를 도출하였다.

**주요어** : 고속철도, 자갈궤도, 궤도유지관리비, 전력소모비, 체결구 강성

## 1. 서 론

자갈궤도에서는 일반적으로 자갈과 하부노반의 강성이 궤도지지강성에 큰 영향을 미치기 때문에 콘크리트궤도에 비하여 레일패드의 강성이 궤도거동에 미치는 영향은 크지 않다고 할 수 있다. 그러나 자갈궤도에서도 레일패드강성이 과도할 경우 자갈에 작용하는 압력의 증가로 인한 궤도에 작용하는 충격력과 가속도의 증가로 궤도구성품의 재료적 손상과 궤도

틀림 진전이 가속화 될 수 있다. 반면에 레일패드 강성이 너무 낮은 경우에는 레일두부의 횡 변위 발생에 따른 궤간확대에 의하여 탈선에 대한 안전성이 저하될 수 있고, 또한 열차주행에 필요한 전력량의 증가로 운영비가 증가하게 된다. 따라서 궤도 유지보수비와 전력 소모비의 합이 최소로 되는 최적 레일패드강성을 평가하여 현장에 적용할 필요가 있다.

그러나 레일패드와 같이 고무 또는 폴리우레탄 재질을 사용하는 제품들은 정확하게 특정한 강성값을 갖도록 제작하기 어려워 또한 체결구별로 제작 원리가 달라 전체 체결장치 성능확보 차원에서 특정 강성값을 갖도록 레일패드를 제작할 수만은 없기 때문에 유지보수비 및 전력소모비의 총합의 크게 변하지 않은 일정범위의 레일패드 강성값을 정할 필요가 있다.

\*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5328, E-mail : scyang@krii.re.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.2.139>

자갈궤도의 적정 레일패드강성을 정하기 위한 관련 연구는 López Pita 등의 연구[1]가 국내외적으로 거의 유일하다고 할 수 있다. López Pita 등은 궤도강성에 따라 변화하는 윤증으로 궤도틀림진전 모델식을 도출한 후 궤도틀림진전과 궤도유지관리비의 상관관계를 도출하여 레일패드강성에 따른 궤도유지보수비를 구하고, Sauvage와 Fortin의 연구결과[2]를 토대로 레일패드강성에 따른 전력소모비를 산출하여 궤도유지보수비 및 전력소모비의 총합이 최소가 되는 최적레일패드강성을 산정하였다. 그러나 그의 연구에서는 궤도틀림진전 모델에 매우 중요한 역할을 하는 윤증을 Prod'Homme이 제시한 매우 간략한 근사식[3]을 사용하여 평가함에 따라 레일, 체결장치, 침목, 자갈, 그리고 노반으로 구성되는 궤도구성품들의 거동특성을 제대로 반영할 수 없어 레일패드강성 변화에 따른 자갈궤도에서의 윤증변화를 정확하게 고려하는데 한계가 있다고 할 수 있다. 또한 López Pita 등의 연구결과는 스페인에서의 차량, 궤도 및 운영조건과 체결장치 시험조건을 고려하여 도출된 것으로 국내에서의 설계 및 운영조건은 이들과 차이가 있기 때문에 국내에 적용하기 위해서는 국내의 제반 조건을 고려하여 적정 레일패드강성이 도출되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 López Pita 등이 제시한 자갈궤도에서 최적레일패드강성을 평가하는 프로세스를 기초로 하여 적정 레일패드강성 범위를 구하되 연구결과에 중요한 영향을 주는 레일패드강성에 따른 윤증변화를 보다 정확하게 평가하기 위하여 궤도구성품의 거동특성을 보다 상세하게 고려할 수 있는 고도화된 수치해석적 기법을 사용하여 평가하였다. 또한 국내에서의 차량, 궤도, 운영조건을 고려함으로써 국내에서 궤도설계에 적용할 수 있는 최적레일패드강성 범위를 도출하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 레일패드의 강성변화에 따른 궤도유지보수비

#### 2.1.1 궤도강성에 따른 윤증변동

##### (1) 유사정적윤증(Quasi-Static Wheel Load)

궤도에 작용하는 윤증은 차량의 중량과 원심력 등 시간에 따라 하중의 변화가 거의 없는 유사정적윤증과 차량과 궤도의 상호작용에 의한 동적윤증의 합으로 나타내진다. 곡선구간에서 KTX 차량에 의한 유사정적윤증은 정적하중과 원심하중의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{quasi} = Q_0 \left( 1 + \frac{2lh}{e} \right) \quad (1)$$

여기서

$Q_0$  = static wheel load (=17ton)

$l$  = cant deficiency (=100mm)

$h$  = gravity center of vehicle (=1440mm)

$e$  = track gauge (=1500mm)

(2)

##### (2) 동적윤증(Dynamic Wheel Load)

차량/궤도 상호작용해석을 할 경우 하중이 이동하므로 정지하여 있는 체결장치에는 하중이 순간적으로 지나가기 때문에 여러 위치에서 다양하게 변하는 하중을 통계적으로 평가하기 어렵다.

그러나 선로를 따라 궤도조건이 동일하다고 가정하여 주파수영역의 차량/궤도 상호작용해석을 수행할 경우 체결장치에 작용하는 하중의 표준편차를 용이하게 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주파수영역에서의 차량-궤도 상호작용해석을 통하여 레일패드 강성에 따른 동적윤증을 구하였는데 주파수영역에서의 차량-궤도 상호작용해석은 문헌[4]에 자세히 소개되어 있기 때문에 여기서는 해석모델과 해석에 사용된 제원 및 물성치를 간단히 나타내었다.

차량과 궤도의 상호작용은 수직방향만을 고려하였으며 해석모델은 Fig. 1과 같다. 차량은 차체, 대차, 그리고 윤축으로 구성되며 이들은 강체로 가정하여 질점으로 모델링 한다. 대차는 윤축으로부터 1차 현수장치로 지지되며 이들은 스프링과 댐퍼로 모델링 되고, 차체는 대차로부터 2차 현수장치로 지지되며 역시 스프링과 댐퍼로 모델링 된다. 따라서 차량시스템은 총 10개의 자유도로 나타내진다. 궤도시스템은 레일, 침목, 자갈층으로 구성된 다층 지지 보(Multi-layered Beam)로 모델링 된다[4]. 각각의 층들 사이는 등 분포된 스프링과 댐퍼로 연결된 것으로 가정된다. 자갈궤도의 경우 침목층과 자갈층은 휨강성이 없는 것으로 가정된다.

차량과 궤도의 상호작용력을 유발하는데 중요한 역할을 하는 궤도틀림은 다음 식으로 나타내지는 프랑스에서 제시한 궤도의 고저틀림 PSD를 사용하여 고려하였다[5].

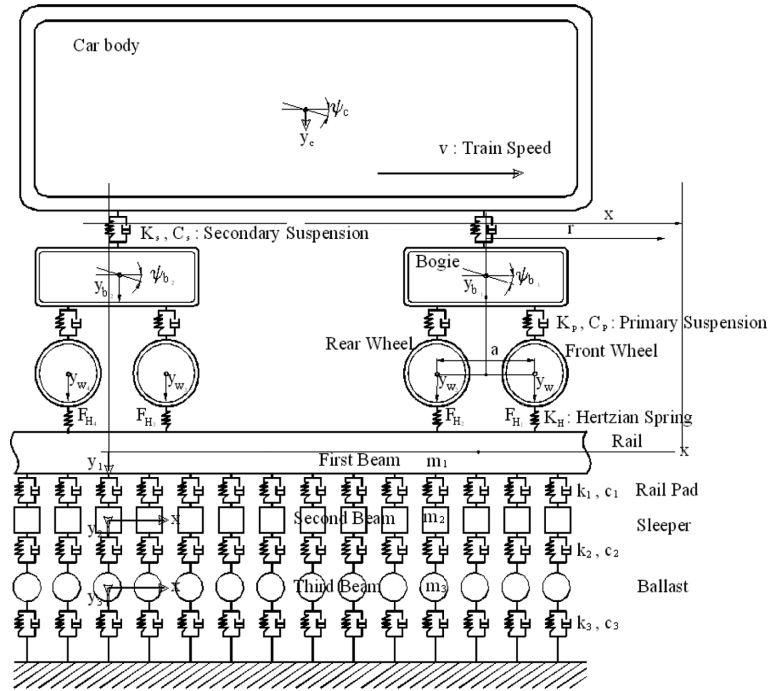


Fig. 1. Simulation model of a track with a continuous beam.

$$S_{r/w}(f) = \frac{C_0 \times 10^{-6}}{(0.36 + 2\pi f)^3} (m^2/(1/m)) \quad (3)$$

여기서

$$f = \text{spatial frequency (1/m)} \\
C_0 = \text{coefficient of track irregularity} \quad (4)$$

본 연구에서  $C_0$ 는 경부고속철도 1단계 자갈궤도에서 검측한 궤도틀림의 PSD의 회귀분석을 통하여 얻은 1.2를 사용하였다(Fig. 2)[4].

해석에 사용된 차량 및 궤도의 해석 제원 및 물성치는 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

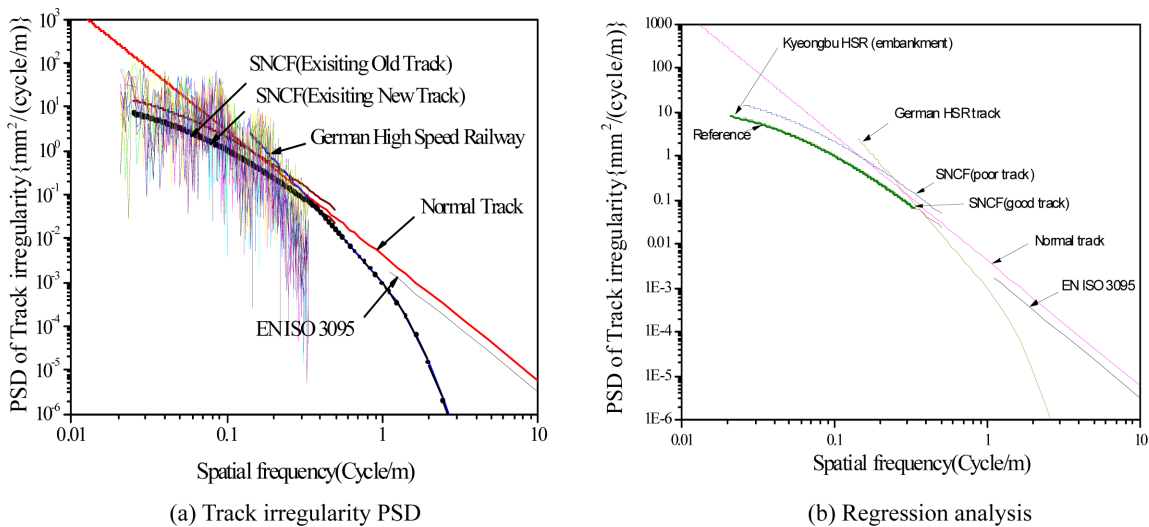


Fig. 2. Measured track irregularity PSD along a HSR line and the result of the regression analysis.

**Table 1.** Parameters for the vehicle model.

Parameter	Value (half side)
Wagon body mass (loaded)	27.48ton
Wagon 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	1.268D+3kN/m
Secondary suspension damping	2.85D+1kN/(m/s)
Primary suspension stiffness	1.252D+3kN/m
Primary suspension damping	2.85D+1kN/(m/s)
Distance between two bogie Y-direction centerlines	14.0m
Wheel set base	3.0m
Wheel radius	0.46m
Unsprung mass	1.024ton

**Table 2.** Parameters for the track model.

Parameter	Value (half side)
Rail mass per meter	60.3kg/m
Rail cross-section area	7.687D-3m <sup>2</sup>
Elastic modulus of rail	210.0D6kN/m <sup>2</sup>
Poisson's ratio of rail	0.3
Rail second moment of area	3055.0D-8m <sup>4</sup>
Rail profile radius on top	0.3m
Timoshenko shear coefficient	0.34
Fastener damping	Variable
Fastener stiffness	Variable
Sleeper mass	140kg
Sleeper spacing	0.6m
Sleeper supporting damping	900.0kN/(m/s)
Sleeper supporting stiffness	326.6×10 <sup>3</sup> kN/m
Ballast supporting damping	100.0kN/(m/s)
Ballast supporting stiffness	92.3×10 <sup>3</sup> kN/m

해석을 통하여 얻은 유사정적하중 및 동적윤중, 그리고 이들의 합인 총윤중은 Fig. 3과 같다. 이 결과로부터 자갈궤도에 서는 레일패드강성이 증가할 경우 낮은 강성영역에서는 윤중이 증가하나 어느 정도 강성이 클 경우에는 윤중의 증가가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 레일패드가 경화하여 강성이 증가하더라도 노반강성이 레일패드강성보다 작게 되므로 노반 강성이 침목하부지지강성을 대표하게 되게 됨으로써 전체 침목지지강성이 증가하지 않기 때문으로 판단된다.

궤도강성은 레일의 단위변위(수직)를 유발하는데 작용하는 하중으로서 정의되며, 체결장치위치당 궤도하부의 탄성을 조합 한 등가강성이  $K_{eq}$ 라고 할 때 궤도강성은 다음 식으로 주어진다.

$$K = 4 \sqrt[4]{\frac{64EI}{d^3} K_{eq}^3} \tag{5}$$

여기서

$$\begin{aligned} EI &= \text{flexural rigidity of rail} \\ d &= \text{spacing of sleepers} \\ K_{eq} &= \text{equivalent stiffness of track} \end{aligned} \tag{6}$$

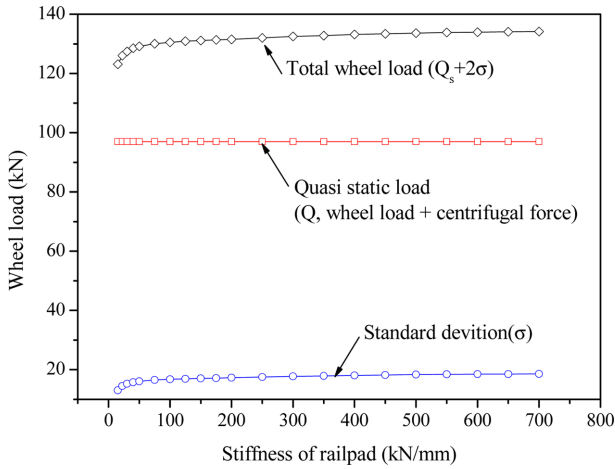


Fig. 3. Wheel load variation according to the stiffness of the rail pad.

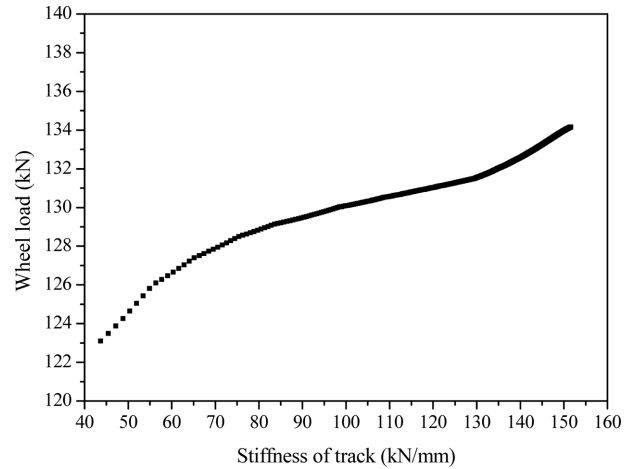


Fig. 4. Total wheel load according to the stiffness of the track.

자갈궤도에서 등가궤도지지강성은 다음 식으로 주어진다.

$$K_{eq} = \frac{1}{1/K_p + 1/K_b + 1/K_s} \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} K_p &= \text{stiffness of railpad} \\ K_b &= \text{stiffness of ballast} \\ K_s &= \text{stiffness of roadbed} \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 3의 레일패드강성에 따른 총윤중을 궤도강성에 따른 총윤중으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

## 2.2 윤중과 궤도틀림진전과의 상관관계

궤도품질에 미치는 이러한 수직하중의 영향은 궤도의 선형품질 저하 진전법칙 (궤도틀림 진전식)에 의해 평가될 수 있으며, 지난 몇 십 년간의 연구결과를 토대로, 다음과 같은 관계식이 제안된 바 있다[1].

$$\text{Settlement of ballast} = \lambda Q^a \quad (9)$$

ORE 위원회 D-117은 궤도의 침하량과 궤도결함과의 직접적인 연관성을 보여준 바 있으며[6], 궤도선형의 품질 저하에 미치는 윤중의 영향을 나타내는 데 있어서 식 (9)를 사용하였다. 지수  $a$ 에 대한 Lopez Pita의 조사에 의하면 Table 3과 같다 [7,8]. Lopez의 연구에 따른 식 (5)에서  $a$ 는 실제 상태의 궤도 조건인 경우에는 1을 적용하며, 궤도가 한계상태 조건에 도달했을 경우에는 2를 적용한다[1].

Table 3. The effect of the wheel load causing degradation of the railway alignment.

Reference	$a$	Observations
D-71 committee, ORE[7]	1-2	For low pressure of ballast
C-113 committee, ORE[8]	1-2	For track geometry defects
McCullough[9]	1	Considering track maintenance cost
Andreyev[10]	1	Considering track maintenance cost
Pennycook[11]	1	Considering roadbed settlement under axle load
Henn[12]	1.21	For ballast settlement (in lab. test)
Janin[13]	1	For track settlement

### 2.3 궤도강성과 유지보수비 상관관계

궤도강성에 따른 윤중은 2.2에 소개한 방법으로 적절히 평가할 수 있으며, 윤중에 따른 궤도틀림진전이 식(9)에서와 같이 윤중의 크기로 평가될 수 있으므로 궤도강성에 따른 궤도품질의 상대적 저하정도를 평가할 수 있다. 궤도품질의 저하정도와 유지관리비용 사이에 직접적인 연관성이 존재한다면, 유지관리비용 역시 동일한 경향성을 갖게 된다고 할 수 있다. 궤도수직강성에 대한 궤도 유지보수비용의 상관성은 실제 궤도수직강성(기준수직강성)과 실제 투입된 유지보수비용(기준유지보수비용)을 기준으로 궤도수직강성과 유지보수비용과의 관계식에서 추정할 수 있다.

Eisenmann 등의 연구결과에 따르면 궤도틀림의 정정을 위한 유지보수 비용은 궤도틀림의 진전도에 따른 함수이며[1], 궤도틀림의 진전도는 여러 연구자의 연구결과에서 알 수 있듯이 윤중 또는 침목하면압력의 함수라고 볼 수 있기 때문에 다음과 같이 침목하면압력의 함수로서 표현하고 있다.

$$\Delta CM = f(\Delta R^a) \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Delta CM &= \text{variation of maintenance cost for track irregularity correction} \\ \Delta R &= \text{variation of sleeper bottom pressure} \\ a &= \text{index of track condition} \end{aligned} \quad (11)$$

현재 상태의 궤도수직강성에 따른 침목하면압력을 받고 있는 궤도의 현재 투입되는 유지보수비를 알면 궤도수직강성변화에 따라 변화된 침목하면압력을 받은 궤도의 유지보수비를 다음의 비례식에서 구할 수 있다[14].

$$\left( \frac{R_{K_i}}{R_{K_{ref}}} \right)^a = \frac{CM_{K_i}}{CM_{K_{ref}}} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} R_{K_{ref}} &= \text{pressure of sleeper bottom at } K_{ref} \\ R_{K_i} &= \text{pressure of sleeper bottom at } K_i \\ CM_{K_{ref}} &= \text{cost of maintenance for track irregularity at } K_{ref} \\ CM_{K_i} &= \text{cost of maintenance for track irregularity at } K_i \end{aligned}$$

기준 유지보수비용은 실제 선로에 투입된 궤도틀림정정 비용을 조사함으로써 찾을 수 있다. 따라서 식(12)를 활용하여 레일패드의 수직강성 변화에 따른 궤도유지보수비용의 변화를 구할 수 있다. 식(12)로부터 2.2절에서 제시한 바와 같이  $a$  값을 1을 적용하면 변화된 궤도강성에 대한 유지보수비의 변동량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$CM_{K_i} = \left( \frac{R_{K_i}}{R_{K_{ref}}} \right)^1 CM_{K_{ref}} \quad (13)$$

### 2.4 고속철도 레일패드강성에 따른 자갈궤도 유지보수비 산정

궤도강성에 따른 유지보수비를 산정하기 위하여 2007년도 고속선 자갈궤도구간 유지보수 및 동구간에서 측정된 궤도강성을 평가하였다. 2007년 소요된 총비용 12,489백만원을 고속선 자갈궤도 총 길이 474.073km로 나누면 연간 km당 소요된 유지보수비는 26백만원/km이다[4]. 2007년도에 측정된 고속선 레일패드평균강성은 체결구 성능기준에 정한 하중범위 20~95kN에서 측정된 값은 330.1kN/mm이었다[4]. 고속선 자갈궤도구간에서 레일패드 1개가 받는 동하중은 50kN 이하이므로 현장에서 체결구 레일패드가 받는 하중범위는 초기체결력을 고려하여 20~70kN이라고 할 수 있다. 따라서 체결구 강성 변화에 따른 윤중발생량을 정확하게 산정하기 위해서는 현장의 체결구 강성을 대변할 수 있는 강성값을 대입할 필요가 있다. 따라서 현장에서 발생하는 하중범위에 맞게 조정된 동적강성은 Fig. 5에서 나타낸 하중범위 20~95kN과 20~70kN 상관관계로부터 293.06kN/mm(=0.88779×330.1)가 되는 것을 알 수 있다.

현장조건을 고려하여 적절히 평가한 Table 4의 현장레일패드지지강성, 자갈지지강성, 노반지지강성을 사용하여 등가궤도지지강성( $K_{eq}$ )을 구하면 57.77kN/mm 정도로 평가된다. 등가지지강성 57.77kN/mm에 대응하는 궤도강성은 138.36kN/mm이 된다. 이상을 정리하면 고속선 자갈궤도에서 2007년도 궤도강성은 128.36kN/mm이고, 연간 km당 소요된 유지보수비는 26백

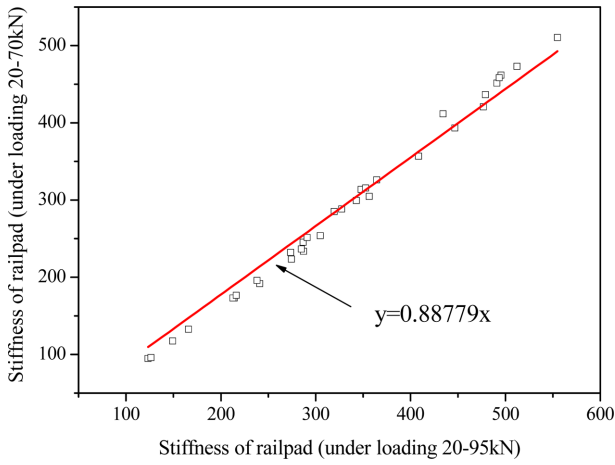


Fig. 5. Correlation between the rail pad stiffness and the loading range.

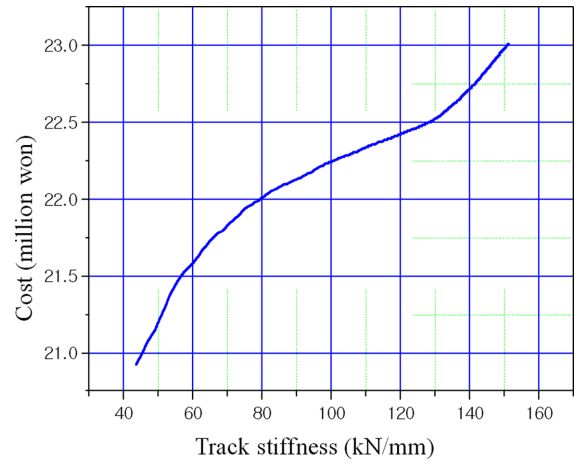


Fig. 6. Track maintenance cost according to the track stiffness along ballast track.

Table 4. Supporting stiffness of the track.

Rail supporting stiffness ( $K_1$ )	293.06kN/mm
Sleeper supporting stiffness ( $K_2$ )	326.6kN/mm
Ballast supporting stiffness ( $K_3$ )	92.3kN/mm

만원/km 정도로 평가된다. 궤도강성 128.36kN/mm에 대응하는 운중은 Fig. 4로부터 132.39kN이므로 2007년도 궤도틀림유지 보수비 및 레일패드강성을 기초로 궤도유지보수비는 식 (13)로부터 다음 식으로 나타내진다.

$$CM_{K_i} = 26 \left( \frac{Q}{132.29} \right) \quad (\text{million won}) \quad (14)$$

Fig. 6은 궤도강성에 따른 궤도틀림유지보수비를 나타낸 것이다.

## 2.5 궤도강성에 따른 전력소모비 산정

UIC60레일인 경우 KTX 열차속도  $V$  km/h로 주행시 궤도강성에 따른 소모되는 에너지는 다음 식으로 나타내진다[14].

$$C_{E(V)} = 365f_D \frac{W_{total}}{Q_{nominal}} \frac{\phi_V P_{300}}{V} C_{kWh} = 365f_D \frac{W_{total}}{Q_{nominal}} \frac{\phi_V 3215.1 K^{-1.5931}}{V} C_{kWh} \quad (15)$$

여기서

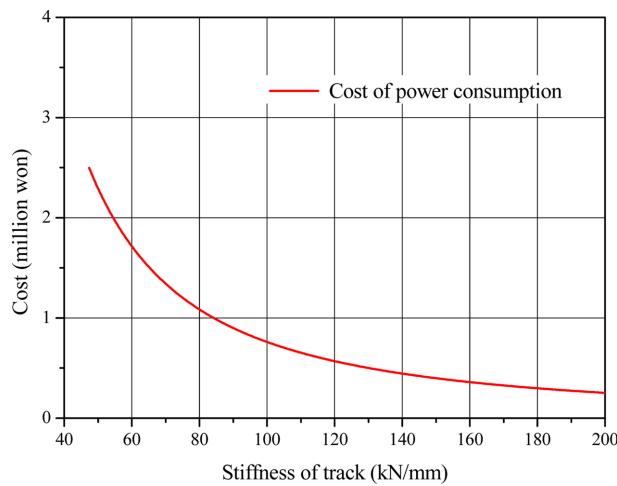
$f_D$  = the number of vechile runningmean per day,  $W_{total}$  = totalweight of KTX  
 $Q_{nominal}$  = wheel load of KTX,  $P_{300}$  = consumed energy per a axle at 300km/h  
 $V$  = train speed,  $K$  = stiffness of track  
 $C_{kWh}$  = the unit cost of electric power per1kWh,  $\phi_V$  = coefficient of speed

$$\phi_V = \left( \frac{V}{300} \right)^{2.25} \quad (16)$$

2007년 고속선의 kW당 단가는 79원으로 조사되었는데[4], 이 값과 Table 5의 KTX 300km 운행시 전력비용 산출을 위한 기본자료를 토대로 궤도강성에 따른 전력소모비용을 산정하면 Fig. 7과 같다.

**Table 5.** Parameter for power consumption cost at 300km/h(KTX).

Notation	Value	Remarks
$f_D$	110 car/days	
$\phi_V$	1	at 300km/h
$W_{total}$	421.5ton	Total weight of KTX
$Q_{nominal}$	8.15ton	The average weight of wheel load
$C_{kWh}$	79won	[4]

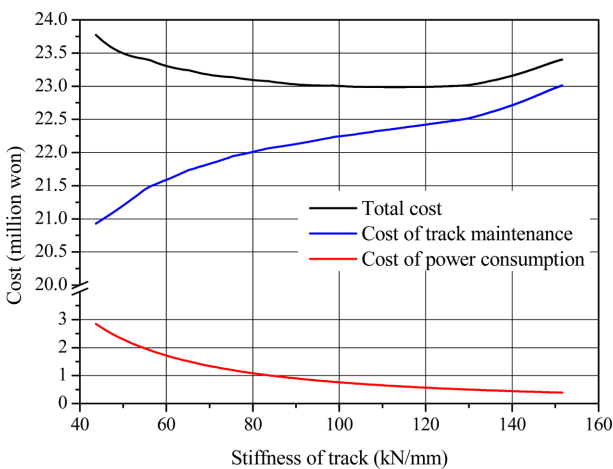


**Fig. 7.** Power consumption cost according to the track stiffness.

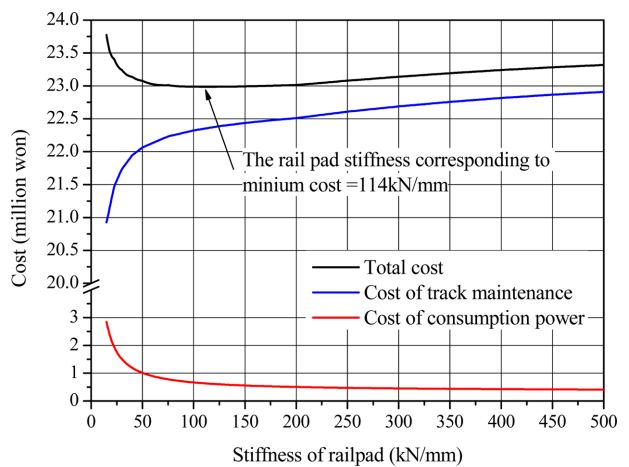
**2.6 최적 레일패드강성 산정**

앞서 산정한 궤도틀림 유지보수비 및 전력소모비를 궤도강성에 따라 나타내면 Fig. 8과 같고, 레일패드강성에 따라 나타내면 Fig. 9와 같다.

Fig. 9로부터 유지보수비 및 전력소모비의 합을 최소로 하는 레일패드 최적동적강성( $K_{dyn}$ )은 114kN/mm인 것을 알 수 있다. 시험으로부터 얻은 정적강성과 동적강성의 관계를 나타낸 Fig. 10으로부터 114kN/mm 동적강성에 대응하는 정적강성은 71.87kN/mm(하중범위 20~70kN)이다. 이 값은 현장을 대변할 수 있는 하중범위의 정적강성이라고 할 수 있으나 현실적



**Fig. 8.** Power consumption and track maintenance costs according to the track stiffness along a HSR line (ballast track).



**Fig. 9.** Power consumption and track maintenance costs according to the rail pad stiffness along a HSR line (ballast track).



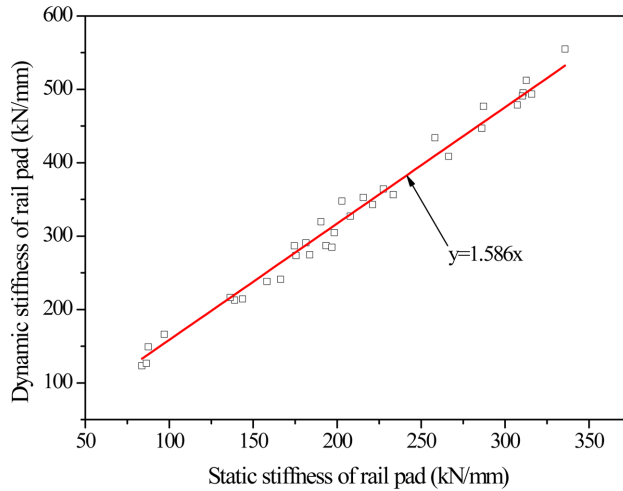


Fig. 10. Correlation between the dynamic stiffness and the static stiffness of the rail pad.

으로는 레일패드강성은 체결구 성능시험기준에 의하여 관리되어야 한다. 따라서 공단 체결장치 정적강성 시험하중범위 20~95kN에 대응하는 정적강성을 산정하면 80.95kN/mm이 된다(Fig. 5로부터  $K_{s(20-70)}=0.88779K_{s(20-95)}$ ). 최적강성일 때를 기준으로 유지보수비 및 전력소모비용의 합산비용 즉 총비용이 0.1%상승될 때 동적강성범위는 76~187kN/mm이고, 이 동적강성에 대응하는 정적강성범위는 54.0~132.8kN/mm이다. 따라서 적정 정적강성범위는 60~130kN/mm로 하는 것이 적당할 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 López Pita 등이 제시한 자갈궤도에서의 최적레일패드강성을 평가하는 프로세스를 기초로 적정레일패드강성 범위를 구하되 연구결과에 중요한 영향을 주는 레일패드강성에 따른 운중변화를 보다 정확하게 평가하기 위하여 궤도 구성품의 거동특성을 보다 상세하게 고려할 수 있는 고도화된 수치해석적 기법을 사용하여 평가하였다. 또한 국내 고속철도 자갈궤도 설계 시 적용할 수 있는 적정레일패드강성을 평가하기 위하여 국내의 차량, 궤도, 운영조건을 고려하였다.

연구결과 고속철도 자갈궤도에는 레일패드강성에 따라 궤도유지보수비 및 전력소모비의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 자갈궤도의 강성은 체결장치, 자갈, 그리고 노반이 직렬로 연결된 시스템의 조합강성으로 정해지기 때문에 레일패드강성이 어느 정도 커지면 전체 조합강성에 큰 영향을 주지 못하기 때문으로 판단된다. 그럼에도 궤도유지보수비 및 전력소모비의 총합이 최소로 되는 최적강성은 존재하며 국내 체결장치 정적강성 시험하중범위 20~95kN에 대응하는 정적강성은 80.95kN/mm임을 알 수 있었다. 또한 최적강성을 기준으로 유지보수비 및 전력소모비용의 합산비용 즉 총비용이 0.1%이내로 상승되는 레일패드의 적정 정적강성범위는 60~130kN/mm가 되는 것을 알 수 있었다.

### References

- [1] A. López Pita, P.F. Teixeira, F. Robuste (2004) High speed and track deterioration: the role of vertical stiffness of the track, *Proceeding of the Instn. Mech. Engrs. Part F: J. Rail and Rapid Transit*, 218, pp. 31-40.
- [2] R. Sauvage, J. Fortin (1982) La traînée de roulement des véhicules de chemin de fer, *Rev. Générale Chemins Fer*, pp. 383-390.
- [3] A. Prud' Homme (1970) La voie, *Rev. Générale Chemins Fer*, pp. 56-72.
- [4] KRRRI (2009) A study of determining the replacement interval for the rail fastening system in HSR.
- [5] Ing. C. Onorii (2007) Mechanical Behaviour of Traditional and Antivibration Railway Tracks with Recycled Rubber Materials, University Degli Studi Di Napoli Federico II
- [6] Comité D-117, ORE (1983) Optimum adaptation of the conventional track to future traffic: synthesis report. ORE, Report 29.
- [7] Comité D-71, ORE (1970) Sollicitation de l'avoie du ballast et de la plateforme sous l'ødation des charges roulantes. ORE, Report1.
- [8] Comité C-113, ORE (1970) Masse par essieu admissible pour les wagons en fonction du diamètre des roues et de la vitesse. ORE, Report1.
- [9] McCullough (1972) Effect on track of heavy axle load, *Proceeding of the Instn Mech. Engrs.*
- [10] Andreyev (1974) Particularidades de la conservación de la vía en sectores de alta velocidad de circulación de los trenes(translation from

Russian by Fundación de Ferrocarriles Españoles), Zhelieznodorozhniy Transport 1.

- [11] T. J. Pennycook (1976) The effect of axle load on the vertical settlement of the track, Research and Development Division, Railway Technical Centre, Derby, Technical Note TN.SM. 144, File 261-201-144.
- [12] W. Henn (1978) La repercusión de la forma de la superestructuray de la carga por eje en la alteración del nivel de la vía, Technical University of Munich, Germany, Report 30.
- [13] G. Janin, (1982) La maintenance de la geometrie de la voie, Rev. Générale Chemins Fer, pp. 331-346.
- [14] A. López Pita, (2001) The vertical stiffness of the track and the deterioration of high-speed lines, Rev. Obras Púlicas, pp. 7-26.

【 Received 3 March 2014; Revised 24 June 2014; Accepted 23 March 2015 】

---

**Sin-Choo Yang** : scyang@krii.re.kr

High Speed System Research Center, Advance HSR Research Division, KRRI, 176, Cheoldo bangmulgawan-ro,  
Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea

**Eun Kim** : eunkim@krii.re.kr

High Speed System Research Center, Advance HSR Research Division, KRRI, 176, Cheoldo bangmulgawan-ro,  
Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea