Journal of Korean Society of Steel Construction
Vol.38, No.5, pp.275-284, October, 2026

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054
DOI https://doi.org/10.7781/kjoss.2026.38.5.275

곡선부 정척레일 강재 이음매판의 종방향 구속 역해석 연구

배준현[1] · 임남형[2*]

[1]선임기술원, 한국철도기술연구원, 철도시험인증본부, [2]교수, 충남대학교, 토목공학과

Inverse Analysis of Longitudinal Restraint by Steel Joint Bars in Curved Jointed Track

Bae, Jun Hyun[1], Lim, Nam Hyoung[2*]

[1]Senior Engineer, Railroad Accredited Test & Certification Department, Korea Railroad Research Institute, Geonggi-do, 16105, Korea
[2]Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

Abstract – This study inversely estimated effective joint resistance from repeated measurements of joint gap and rail temperature and examined its use for comparing joint restraint conditions. Effective joint resistance (R) was defined as the threshold longitudinal resistance initiating joint slip. An elasto-frictional hysteresis model was applied to 25 measurement campaigns conducted over approximately two years at 16 joints on a curved jointed track. Point estimates ($\hat{R}$) for 14 identifiable joints ranged from 63 to 282 kN, with a median of 222 kN; resistance could not be uniquely identified at the remaining two low-response joints, which were classified as seized under the model. Rail-wise analysis revealed left-right restraint differences obscured by joint averages, indicating the potential use of gap-temperature records to screen targets for detailed inspection. However, the estimates have not been independently validated and remain sensitive to model assumptions and measurement frequency.

Keywords – Bolted rail joint, Jointed track, Friction restraint, Inverse analysis, Effective joint resistance, Track maintenance

1. 서 론

현장 유간·레일온도 이력으로 공용 중 정척레일 이음부의 구속 정도를 추정하는 일은, 볼트 제원만으로 알기 어려운 실제 이음부 거동을 평가하는 데 중요하다. 정척레일은 온도가 변하면 신축하지만, 레일과 이음매판 사이의 마찰 구속 때문에 유간이 자유 열팽창량만큼 즉시 변하지 않는다. 같은 온도에서도 이전의 온도 경로와 이음부의 구속 상태에 따라 유간이 달라질 수 있어, 단일 시점의 유간값만으로 구속 정도를 판단하기 어렵다[1].

기존 연구는 이러한 유간 거동을 해석할 물리적 근거를 제시하였다. Ciobanu and Nogy[1]는 이음매 저항력과 궤도 종방향 저항을 고려하여 온도 변화에 따른 유간 변동 영역과 이력 거동을 이론적으로 설명하였다. 볼트 마찰접합 분야에서는 Kim *et al.*[2]이 볼트 구멍 형상에 따른 미끄럼 거동을 실험하였고, Shin *et al.*[3]이 반복가력에 따른 볼트 체결축력 감소를 계측하였다. 이들 연구는 저항력과 체결 조건의 중요성을 보여주지만, 접합 형식과 하중 조건이 서로 달라 그 실험값을 공용 레일 이음매의 저항력으로 직접 사용할 수는 없다.

현장 계측을 이용한 연구에서는 절연이음매의 연속 유간 관측으로 상태 변화를 모니터링하거나[4], 온도와 궤도 변수를 이용해 유간을 예측하였다[5]. 그러나 유간 자체의 관측·예측과, 유간·온도 이력에 반영된 이음부의 종방향 구속을 저항력으로 역추정하는 것은 서로 다른 문제이다. 선행연구는 저항력을 입력하여 유간 거동을 계산하는 순방향 해석과 유간 예측에 주로 초점을 두었으며, 공용 중인 개별 기계식 이음매의 반복 계측 자료로부터 유효 저항력을 추정하고 그 식별 가능성을

Note.-Discussion open until April 30, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 8, 2026; revised on September 19, 2026; approved on September 21, 2026.
Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction
*Corresponding author.
Tel. +82-42-825-7005 Fax. +82-42-825-0318
E-mail. nhrim@cnu.ac.kr

평가한 결과는 상대적으로 부족하다.

이러한 현장 기반 추정이 필요한 이유는 설치조건에서 계산한 저항력이 공용 중 이음부의 체결·접촉 상태를 반드시 대표하지 않기 때문이다. 영국 표준 이음매에 대해 설치조건 약 185 kN과 장기 공용조건 100 kN을 계산 또는 적용한 사례가 있으나[1],[6], 대상 구간의 제원과 실제 체결 상태가 다르면 그 값을 그대로 적용할 수 없다. 또한 유간의 온도 응답 크기만으로는 관측된 온도 경로와 이음부의 마찰 구속을 분리하기 어려우므로, 반복 계측자료에 역학 모델을 적용하여 저항력의 추정 가능 범위를 검토할 필요가 있다. 모델에서 얻은 값은 현장 저항력의 직접 계측값이 아니라 가정에 의존하는 유효 매개변수이다.

본 연구에서는 이음부의 미끄럼을 개시시키는 임계 종방향 저항력을 유효 이음매 저항력 R (effective joint resistance)로 정의한다. 국내 시험선로의 반경 250 m 곡선 자갈궤도에서 약 2년간 25회 계측한 정척레일 이음매 16개소의 유간·레일온도 이력에 탄성-마찰 모델을 적용하여 개소별·레일별 R을 역추정한다. 추정값을 대상 구간의 볼트 제원으로 계산한 기준값 및 제한된 현장 관찰과 비교하고, 점추정 가능 여부와 레일별 구속 차이를 분석한다. 이를 통해 공용 이음부의 구속 상태를 정량적으로 비교할 가능성과 모델·계측자료에 따른 한계를 평가한다.

2. 자료 및 방법

2.1 실측자료와 이력 특성

분석 대상은 국내 시험선로 반경 250 m 곡선 자갈궤도의 25 m 정척레일(60kgKR[7]) 이음매 16개소에서 약 2년간 25회차 반복 계측한 좌·우 레일별 유간과 레일온도이며, 계측 조건을 Table 1에 요약하였다.

좌레일은 곡선 내궤, 우레일은 외궤이나 자유팽창 이론 기울기는 -αL=-0.300 mm/℃로 동일하다(α=1.2×10^{-5}/℃[8], L=25 m). 유간은 이음매 상태를 가장 즉각적으로 반영하는 지표로, 연속 유간 계측으로 정상·이상 거동을 구분한 사례도 보고되어 있다[4]. 역해석 입력은 레일 단위에서는 각 레일 두 관측점의 평균, 개소 단위에서는 좌·우 레일을 통합한 회차 평균값이며, 동일 레일

Table 1. Summary of the field measurement

Test section	Domestic test line, 10k077~10k452; curve radius 250 m circular and transition curves; ballasted track
Rail and joint	25 m jointed 60kgKR rail; joint-bar length 820 mm with 6 bolt holes (n=3 per rail end); fishing slope 1:4; M20 bolts (SM45C) and nuts (SCM440)
Joints measured	16 joints×2 rails (left=inner, right=outer)=32 rail-wise series
Measured items	Joint gap (digital vernier caliper, 2 points per rail: gauge side and field side); rail temperature
Period/ campaigns	Apr. 2021 – Feb. 2023; 25 campaigns (no gap adjustment or tamping during the period)
Observations	1,337 temperature-gap pairs; 263 unavailable owing to missing gap or temperature records
Rail temperature	−19.9 to+56.8℃ (ΔTspan=76.7℃)
Scatter of paired points	Mean absolute difference between the two points on the same rail=0.94 mm (used as the reference scale for fitting residuals)

두 관측점 사이의 산포(평균 절대차 0.94 mm, Table 1)는 피팅 잔차의 크기를 판단하는 비교 기준으로 사용한다.

실측 유간-온도 관계는 마찰 구속 특유의 이력 구조를 보이며, 그 징후를 Table 2에 요약하였다. 유간의 온도 응답을 자유팽창과 비교하는 지표로 신축응답비 r을 식 (1)로 정의한다.

$$r = |b|/\alpha L \tag{1}$$

여기서 b는 개소별 유간-레일온도 선형회귀 기울기(mm/℃), α는 레일강의 선팽창계수(1.2×10^{-5}/℃), L은 유간에 기여하는 유효 신축 길이(25 m)이며, αL=0.300 mm/℃는 자유팽창 기울기의 절댓값이다. 회귀의 결정계수는 R^2로 표기하며, 저항력 R과는 무관한 통계량이다. Table 2의 세 징후(전 계절 응답 결손 r 중앙값 0.52, 상승·하강 기울기의 비대칭, 온도 반전 직후의 일중 사구간)는 이음부 신축이 임계 저항력을 넘는 축력에서만 미끄러지는 마찰 요소로 이상화될 수 있음을 시사한다. 일중 응답의 Δg와 ΔT는 같은 날 두 계측 시점 사이의 유간 변화량(mm)과 레일온도 변화량(℃)이다. 상승·하강기의 회귀기울기 차이에는 온도 경로와 표본 구성의 영향이 포함될 수 있으며, 복진·계절 요인의 영향도 배제할 수 없다. 이러한 마찰 이력 거동은 볼트 접합 구조

Table 2. Statistics of the measured gap–temperature response

Item	Definition	Value
Overall response	Median regression slope b of gap vs. rail temperature (all campaigns, per joint)	−0.157 mm/℃ (52% of −αL)
Phase asymmetry	Mean slope on heating vs. cooling phases (15 joints)	−0.197 vs. −0.149 mm/℃ ($p<0.001$)
Intraday response	Median $\|\Delta g/\Delta T\|/\alpha L$ of same-day pairs (157 pairs, $\|\Delta T\|\geq 2$℃)	14 % (21 % on summer heating days)

물에서 널리 관찰되며, 탄성 요소와 마찰 슬라이더를 조합한 표준 이력 모델(Iwan 모델 등)로 표현되어 왔다[9].

좌·우(내·외궤) 통합 기울기는 각각 -0.141 및 -0.153 mm/℃로 차이가 작았다. 개소별 좌·우 기울기 차이는 관측점 단위 자료에서 유간을 레일온도, 레일 구분 및 양자의 교호작용으로 설명하는 선형회귀의 교호작용항 p값으로 평가하였다. 다중비교 보정 전 $p<0.05$는 16개소 중 8개소에서 나타났으며, 결과는 탐색적으로 해석하였다. 레일별 기울기와 신축응답비는 Table 4에 제시하였으며, 이는 개소 평균이 레일별 차이를 가릴 수 있음을 보여준다.

2.2 마찰 구속 모델과 역해석

이음부는 레일의 탄성 요소와 임계 마찰저항 ±R의 슬라이더를 직렬로 연결한 모델로 이상화하였다(Fig. 1).

온도 변화에 따른 축력의 절댓값이 R에 도달하면 미끄럼이 발생하여 유간이 자유팽창 기울기 -αL로 변화한다. 온도 변화 방향이 반전되면 축력이 반대쪽 임계값에 도달할 때까지 유간이 일정하게 유지되어 사구간이 형성된다. 양방향 미끄럼 시 유간-온도 관계는 평행사변형 이력 루프를 이루며, 사구간 온도폭 ΔTd(℃)는 식 (2)와 같다.

$$\Delta T_d = 2R/\alpha EA \tag{2}$$

이 이력 구조는 Ciobanu and Nogy[1]가 제시한 유간 변동 영역(joint gap variation domain) 도해와 같으며, 본 연구는 그 폭을 R로 매개화하였다. E는 레일의 탄성계수(kN/mm^2), A는 레일 단면적(mm^2)이며, αEA는 단위 온도 변화에 따른 열축력 변화의 크기로 αEA ≈ 19.5 kN/℃이다(α=1.2×10^{-5}/℃, E=210 kN/mm^2, A=7,730 mm^2; 60kgKR[10] 제원). 역해석에서 추정하는 미지 매개변수는 R과 첫 관측 시점의 초기 유간 g_0(mm) 두 개이며, α·E·A·L은 고정 입력값이다.

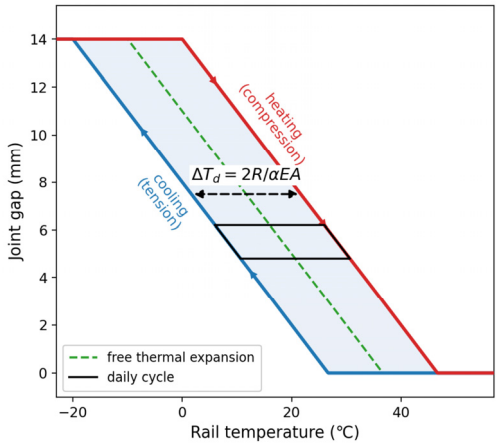


Fig. 1. Gap–temperature hysteresis of the elasto-friction joint model

이하에서 R은 모델의 임계 저항력을, $\hat{R}$은 실측 자료로부터 역해석된 추정치를 나타내며, 첨자 geo와 fit은 각각 이력 루프 기하 추정과 온도 경로 피팅을 뜻한다. 이 탄성-마찰 직렬 구조는 Iwan 모델의 구성요소인 Jenkins 요소에 해당하며, 본 연구에서는 이를 이용하여 이음부의 마찰 이력을 모사하였다.

다음으로, 이 해석은 네 가지를 가정한다. (i) 단일 임계 저항력: 불규칙한 간격의 이산 계측자료에서는 미끄럼 개시 직후의 정지·운동마찰 전이는 포착할 수 없으므로 단일 임계값 R로 통합하고, 추정값 $\hat{R}$은 미끄럼 개시를 지배하는 유효 저항력으로 해석한다. (ii) 왕복 사구간: 승온·강온이 반복되는 실측 경로에서 온도 반전 시 축력이 -R에서 +R까지 재하되는 구간을 사구간으로 보아 그 폭을 $\Delta T_d = 2R/\alpha EA$로 둔다. 기본 모델은 닫힘·열림 방향의 임계 저항력을 동일한 R로 가정하며, 기울기 비대칭(Table 2)의 영향을 검토하기 위해 방향별 저항력을 Rc(닫힘)와 Rt(열림)로 구분한 비대칭 모델을 적용한다. 두 모델의 사구간 폭이 같을 때 R=(Rc+Rt)/2가 성립한다. (iii) 미끄럼 구간의 기울기: 저항력을 넘어선 이후 유간은 자유팽창 기울기 -αL로 변화한다고 보며, 도상·체결장치의 분포 종저항은 별도 요소로 두지 않고 미끄럼 기울기 변경에 대한 민감도로 그 영향을 검토한다. (iv) 계측기간 중 R 불변: 저항력은 볼트 이완·접촉면 변화로 시간에 따라 변할 수 있으나[1],

본 계측자료만으로 그 변화를 구분하기 어려워 계측기간 중 R이 일정하다고 가정한다. 추정값 $\hat{R}$은 해당 기간의 대표 유효 저항력으로 해석한다.

동일한 레일온도에서도 접촉면의 수분·부식, 일사에 따른 레일 단면 내 온도 분포, 열차 통과 이력과 복진 정도에 따라 이음부 거동은 달라질 수 있다. 본 모델은 이러한 요인을 개별 변수로 고려하지 않으며, 환경 인자별 영향의 분리는 후속 과제로 둔다.

추정값 $\hat{R}$의 타당성은 볼트 마찰 이론에 따른 저항력과 비교하여 검토하였다. Ciobanu and Nogy[1]는 Radu의 계산법에 따라 이음매 저항력을 식 (3)으로, 접촉면 수직력을 식 (4)로 정리하였다.

$$R = 4 \cdot n \cdot N \cdot f \tag{3}$$

$$N = \frac{T_b \cdot \sqrt{(m^2+1)}}{2} \tag{4}$$

여기서 n은 레일 단부당 볼트 수, N은 물림면 한 면의 접촉 수직력(kN), f는 마찰계수, Tb는 볼트 축력(kN), m은 물림면 경사비 1:m의 계수이다. 이음매판 2장이 레일 두부 하면과 저부 상면에 접촉하여 볼트 1개당 마찰면 4개가 형성되며, 식 (3)의 계수 4는 이를 반영한다.

대상 구간의 준공도면[10]에 제시된 이음매 제원(Table 1)에 따라 n=3, m=4를 적용하였으며, 이음매볼트는 M20 규격의 SM45C 강재이다. 일반 볼트의 초기 체결응력을 항복강도의 65 %–90 %[11]로 설정하여, 비교 기준 산정을 위한 체결축력을 항복축력의 70 %로 가정하였다. 계산에는 M20의 유효단면적 245 mm^2를 적용하고, SM45C의 조질 상태를 가정하여 항복강도 490 N/mm^2를 사용하였다. 이에 따라 Tb=0.7×245×490/1,000 ≈84 kN이며, 식 (4)에 대입하면 N≈173 kN이다.

식 (3)에 n=3, N≈173 kN과 윤활조건 마찰계수 f=0.16[1]을 대입하면 R≈332 kN이다. 이 값을 설치조건 기준값 Rinst로 정의하였다. 장기 공용 저항력을 설치값의 50 %로 두는 문헌[1]의 가정에 따라 장기 공용조건 기준값은 약 166 kN으로 설정하였다.

R은 두 방법으로 추정한다. 첫째, 응답 결손을 이력루프의 사구간으로 근사하는 기하 추정이다. 전체 계측기간의 최고·최저 레일 온도폭 ΔTspan(=76.7℃)에 대해 식 (1)의 r과 사구간의 기하 관계로부터 식 (5)로 산정한다.

$$\hat{R}_{geo} = \frac{\alpha EA \cdot (1-r) \cdot \Delta T_{span}}{2} \tag{5}$$

식 (5)는 관측 온도폭에서의 응답 결손(1-r)을 마찰 사구간으로 근사한 비교용 추정식이다. 전 계절 회귀기울기로 산정한 신축응답비 r은 표본의 온도 분포와 경로 이력에 의존하며, 복진·도상 크리프와 계측 변동의 영향도 받을 수 있다. 이러한 영향으로 식 (5)의 추정값은 실제 저항력의 상한을 보장하지 않는다. 또한 경로피팅값과의 차이에는 비마찰 요인뿐 아니라 두 추정법의 가정 차이도 반영되므로, 이 차이를 비마찰 성분의 정량값으로 해석하지 않았다.

둘째, 실측 온도 경로를 입력하여 유간 변화를 모사하는 경로 피팅이다. 개소별 계측 시계열(총 25회차 중 유효한 회차의 평균 유간·레일온도)을 시간순으로 입력하고, 첫 관측 시점의 축력은 0으로 가정하였다. R을 0 kN–1,560 kN 범위에서 변화시키며 유간을 계산하였으며, 탐색 간격은 사구간 온도폭 ΔTd를 기준으로 0.5℃로 설정하였다(ΔTd 탐색 범위: 0℃–160℃). 각 R에서 초기 유간 g_0는 계측 유간과 계산 유간의 잔차 제곱합이 최소가 되도록 산정하고, 이 잔차 제곱합이 가장 작은 R을 경로 피팅 추정값 $\hat{R}_{fit}$으로 결정하였다. 관측된 승온·강온 반전을 반영한다는 점에서 $\hat{R}_{fit}$을 주 추정치로 사용하였다. 다만 계측 사이의 미관측 온도 반전은 복원하지 못하므로, 기하 추정보다 정확도가 높다고 단정하지 않았다. 동일한 절차를 레일별 시계열에도 적용하였다.

식 (2)의 사구간 온도폭을 전체 관측 온도폭 ΔTspan=76.7℃와 같게 두면, R=αEA·ΔTspan/2≈747 kN이다. 이 값은 전체 온도폭에 대한 무미끄럼 이상모델의 참고값이며, 개별 시계열의 무미끄럼 조건은 해당 온도폭과 초기 축력에 따라 달라진다. 따라서 점추정 가능 여부는 R에 따른 잔차 변화를 나타내는 잔차 프로파일로 판단하였다. 최소 잔차가 큰 저항력 영역의 평탄 구간에서 나타나 특정 R을 식별하기 어려운 경우를 '고착(모델 기준)'으로 분류하고, 평탄 구간의 시작값을 해당 초기조건에서의 모델상 하한으로 제시하였다.

개소별 온도 응답은 r과 결정계수 R^2로 응답($0.35 \le r \le 1.05$ 및 $R^2 \ge 0.30$), 준이상($0.15 \le r < 0.35$ 또는 $0.15 \le R^2 < 0.30$), 저응답(그 미만)으로 구분하였다. 이는 관측거동을 기술하기 위한 잠정적 분류이며, 잔차 프로파일에 따른 고착 판정과 구별된다.

추정값 $\hat{R}$의 타당성은 볼트 제원에 따른 기준값과의 크기·분포 비교, 저저항 추정 레일의 볼트 이완 관찰, 전·후기 부분표본의 저응답 경향 재현성, 모델 가정에 대한 민감도 분석으로 검토하였다. 이러한 검토는 추정값의 물리적 개연성과 내부 일관성을 확인하는 데 한정되며, 저항력의 독립 계측 검증을 의미하지는 않는다.

3. 역해석 결과와 해석

3.1 개소별·레일별 저항력 분포

저응답 2개소를 제외한 14개소의 경로 피팅 추정값 $\hat{R}_{fit}$은 63 kN–282 kN이며, 중앙값 222 kN은 설치조건 기준값 332 kN과 장기 공용조건 기준값 166 kN 사이에 위치하였다(Table 3, Fig. 3). 신축응답비가 가장 큰 10k152 ($r=0.83$, $R^2=0.92$)에서 가장 낮은 저항력 63 kN이 추정되어, 온도에 따른 유간 응답과 추정 저항력의

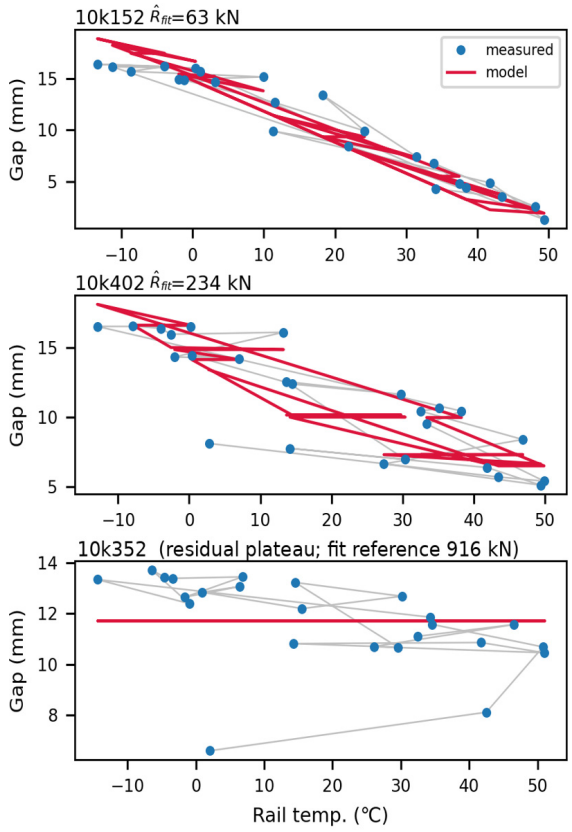
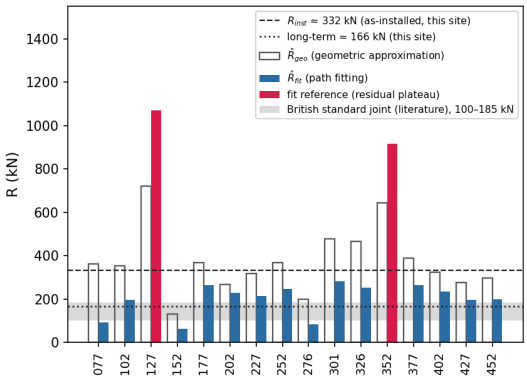


Fig. 2. Measured joint-averaged gaps and fitted paths for representative joints

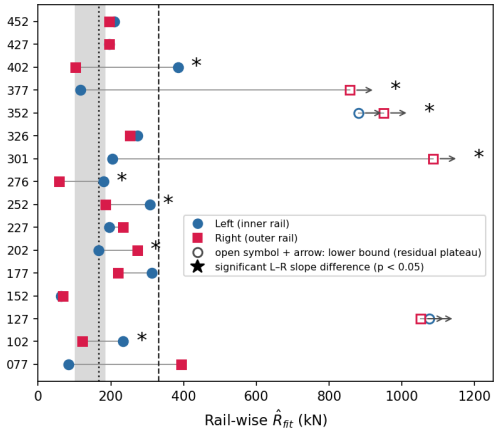
Table 3. Joint-wise inverse-analysis results of joint resistance

Joint	r	R^2	$\Delta T_{d,geo}$ (°C)	$\hat{R}_{geo}$ (kN)	$\Delta T_{d,fit}$ (°C)	$\hat{R}_{fit}$ (kN)	RMSE (mm)	Class
10k077	0.52	0.17	37	362	9.5	93	1.2	Marginal
10k102	0.53	0.76	36	352	20.0	195	2.0	Responsive
10k127	**0.04**	**0.02**	**74**	**720**	**110.0**	**1071**†	**0.8**	**Low-response**
10k152	0.83	0.92	13	130	6.5	63	1.5	Responsive
10k177	0.51	0.69	38	367	27.0	263	2.0	Responsive
10k202	0.64	0.73	27	268	23.5	229	1.9	Responsive
10k227	0.58	0.78	33	317	22.0	214	2.2	Responsive
10k252	0.51	0.57	38	369	25.5	248	2.2	Responsive
10k276	0.73	0.79	20	199	8.5	83	2.1	Responsive
10k301	0.36	0.43	49	477	29.0	282	2.1	Responsive
10k326	0.38	0.56	48	465	26.0	253	2.3	Responsive
10k352	**0.14**	**0.11**	**66**	**645**	**94.0**	**916**†	**1.7**	**Low-response**
10k377	0.48	0.55	40	388	27.0	263	2.3	Responsive
10k402	0.57	0.50	33	323	24.0	234	1.9	Responsive
10k427	0.63	0.79	28	276	20.0	195	1.8	Responsive
10k452	0.60	0.81	31	298	20.5	200	2.1	Responsive

† Fit references for joints with a residual plateau (not point estimates). Shading: low-response joints.



(a) Joint-wise



(b) Rail-wise

Fig. 3. Resistance estimates

관계가 정성적으로 일치하였다. 기하 추정값 $\hat{R}_{geo}$의 중앙값은 337 kN으로 경로 피팅값보다 높았으며, 이는 온도 경로와 응답 결손을 처리하는 두 추정법의 차이를 반영한다.

대표 개소의 계측 유간과 모델 계산값을 Fig. 2에 비교하였다. 모델 경로의 수평 구간은 사구간을 나타내며, 전체 개소의 평균제곱근오차(RMSE)는 0.8 mm–2.3 mm였다. 동일 레일 두 관측점 간 평균 절대차 0.94 mm는 잔차의 크기를 판단하는 참고값으로 사용하고, 저응답 2개소에서는 상수에 가까운 모델 경로로도 작은 잔차가 나타났으므로, 낮은 RMSE만으로 저항력의 점추정 정확도를 판단하지 않았다.

레일별 시계열에 동일 피팅을 적용한 결과(Table 4, Fig. 3(b)), 개소 통합 응답이 뚜렷한 곳에서도 한쪽 레일만 고착(모델 기준) 수준인 사례가 확인되었다.

10k301과 10k377은 개소 단위에서 응답 범주로 분류되었으나, 레일별 해석에서는 우레일이 고착(모델 기준)으로 선별되었으며, 10k402에서도 좌·우 추정 저항력이 약 4배 차이를 보였다(Table 4, Fig. 3(b)). 레일별 해석으로 저응답 2개소에 속한 4개 레일 외에 2개 레일이 추가 선별된 결과는 개소 평균에 가려진 구속 차이를 보여준다. 이에 따라 상세점검 대상의 선별 기준은 레일별 해석 결과로 설정하였다.

Table 4. Rail-wise estimates and L–R significance

Joint	Slope L (mm/℃)	Slope R (mm/℃)	r_L	r_R	$\hat{R}_{fit}$ L (kN)	$\hat{R}_{fit}$ R (kN)	Inter. p
10k077	-0.197	-0.103	0.66	0.34	83	394	n.s.
10k102	-0.134	-0.183	0.45	0.61	234	122	<0.05
10k127	-0.007	-0.017	0.02	0.06	1076*	1052*	n.s.
10k152	-0.250	-0.246	0.83	0.82	63	68	n.s.
10k177	-0.133	-0.172	0.44	0.57	312	219	n.s.
10k202	-0.217	-0.169	0.72	0.56	166	273	<0.05
10k227	-0.185	-0.158	0.62	0.53	195	234	n.s.
10k252	-0.111	-0.195	0.37	0.65	307	185	<0.05
10k276	-0.184	-0.260	0.61	0.87	180	58	<0.05
10k301	-0.163	-0.050	0.54	0.17	205	1086*	<0.05
10k326	-0.107	-0.119	0.36	0.40	273	253	n.s.
10k352	-0.008	-0.076	0.03	0.25	881*	950*	<0.05
10k377	-0.201	-0.082	0.67	0.27	117	857*	<0.05
10k402	-0.079	-0.266	0.26	0.89	385	102	<0.05
10k427	-0.181	-0.198	0.60	0.66	195	195	n.s.
10k452	-0.171	-0.190	0.57	0.63	209	195	n.s.

* Fit references for rails with a residual plateau (not point estimates). P-values are unadjusted for multiple comparisons (n.s.: p≥0.05).

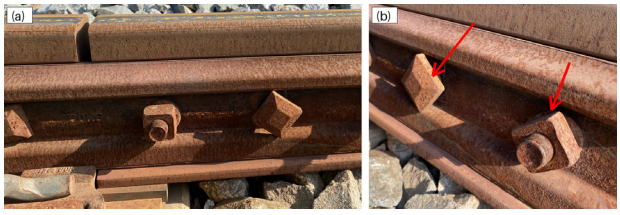
Table 4에서 보듯 다중비교 보정 전 p<0.05 기준을 충족한 개소는 8개소였으며, 구속 차이의 원인을 해석하려면 레일별 체결·접촉 상태를 함께 검토할 필요가 있다. 계측 당일(2021.11.6.) 토공-교량 전이부인 10k202 이음매판(내궤)에서 볼트 이완이 확인되었으며(Fig. 4), 해당 레일의 추정 저항력은 장기 공용조건 기준값 수준인 166 kN이었다. 이러한 관찰은 볼트 이완에 따른 구속 저하와 정성적으로 일치하여, 추정 결과의 물리적 개연성을 뒷받침한다. 본 역해석은 유간 시계열의 통계 모델로 이상 유무를 탐지하는 기존 접근[4]과 달리, 구속 크기를 비교할 수 있는 저항력 매개변수를 산정하며, 그 활용 범위는 상세점검 대상의 선별로 한정하였다.

레일별 추정 저항력의 좌·우 분포를 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 개소·레일별 추정 결과를 기준값과 점추정

Table 5. Grouping of estimates by reference resistance

Category	Criterion	Joints (n)	Rails (n)
Below service reference	$\hat{R}_{fit}$<166 kN	3	8
Between references	166≤ $\hat{R}_{fit}$≤332 kN	11	16
Above installation reference	$\hat{R}_{fit}$>332 kN; point estimate available	0	2
Seized (model-based)	Residual plateau (no identifiable slip)	2	6

† Classification uses unrounded estimates; the left rail of 10k202 (165.6 kN, tabulated as 166 kN) falls below the long-term reference.



(a) Joint overview (b) Square bolt heads and lifted nuts (arrows)

Fig. 4. Loosened joint bolts observed during measurement

가능 여부에 따라 Table 5에 분류하였다. 이 분류는 가정한 기준값과 모델 식별성에 따른 선별 결과이며, 실제 체결·접촉 상태의 판정과는 구별된다.

3.2 저응답개소의 구속수준과 원인해석

10k127과 10k352는 온도에 따른 유간 응답이 작고 잔차 프로파일에서 점추정이 제한되어 고착(모델 기준)으로 분류되었다. 첫 관측 온도 T_0에서 축력을 0으로 가정한 경우, 무미끄럼 조건은 $R \geq \alpha EA \cdot \max|T-T_0|$이다(T: 각 관측 시점의 레일온도, ℃). 이 조건에 따른 잔차 평탄 개시점은 10k352에서 약 916 kN, 10k127에서 약 1,071 kN이며, 해당 초기조건에서의 모델상 하한으로 해석하였다. T_0가 해당 개소의 최고·최저 온도의 중앙에 있으면, 무미끄럼 임계값은 그 개소의 관측 온도폭에 $\alpha EA/2$를 곱한 값이며, 중앙에서 벗어날수록 커진다. 따라서 전체 온도폭 76.7℃로 산정한 747 kN과 개소별 평탄 개시점의 차이는 적용한 온도 경로와 초기조건을 고려하여 해석해야 한다.

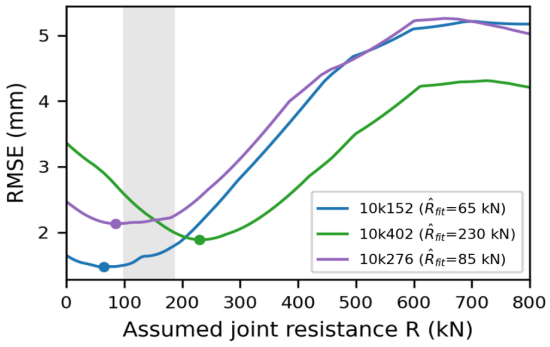
전체 온도폭 기준 참고값 747 kN은 설치 조건 기준값의 약 2.25배이며, 같은 볼트축력을 유지한 마찰식에서는 f≈0.36에 대응한다. 이는 윤활 기준 f=0.16으로는 설명되지 않는 크기로, 건조 강재 접촉의 마찰계수 0.5–0.8에서는 마찰계수 증가만으로도 도달할 수 있다. 가능한 원인은 접촉조건 변화, 체결축력 차이, 레일 단부 접촉·맞물림이며, 절연이음매 실물 시험에서 레일 단부 소성 유동에 의한 유간 폐쇄[12]가, 유한요소해석에서 볼트 상태가 이음부 응력 분포에 미치는 영향[13]이 보고되어 있다. 이러한 결과는 접촉면의 마찰과 함께 레일 단부의 변형 및 볼트 체결 상태를 구속 원인으로 검토할 필요가 있음을 보여준다. 다만 본 연구의 유간·온도 계측만으로는 각 요인이 해당 개소의 구속에 얼마나 기여했는지 구분하기 어렵다.

대상 구간은 연간 통과톤수가 수십만 톤 수준인 시험선로로, 통과톤수가 큰 영업선과 반복 하중 조건이 다르므로 결과의 일반화에는 이러한 차이를 고려해야 한다. 좌·우 구속 차이 역시 곡선부 내·외궤의 하중 환경, 복진 방향 및 체결 상태의 개별 편차[14]와 관련될 수 있다. 따라서 레일별 추정 저항력의 차이는 구속 상태를 구분하는 결과로 해석하되, 특정 원인에 직접 귀속하지 않았다.

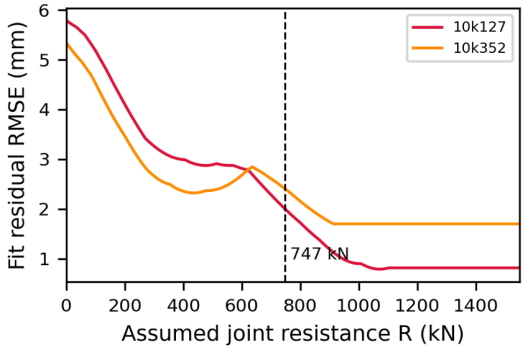
3.3 추정의 강건성과 적용 한계

$\hat{R}_{geo}$는 전 계절 응답 결손을 사구간으로 근사하고 $\hat{R}_{fit}$은 관측 순서에 따른 유간 경로를 적합하므로, 두 값의 차이에는 모델 가정·표본 구성·비마찰 변형이 함께 반영된다. 모델은 시간에 따라 일정한 R을 쓴다. 전·후기 부분표본에서 고착 2개소의 저응답 경향이 반복되어 선별 결과의 내부 일관성이 확인되었다. 반면 잔차에는 계절 편향이 나타났으며(겨울 -1.1 mm, 가을 +0.8 mm; $p<0.001$), 기간을 나누어 추정한 저항력의 중앙값도 253 kN에서 635 kN으로 달라졌다. 이 차이를 실제 저항력의 시간 변화와 표본 구성의 영향으로 구분하기는 어렵다. 따라서 저응답 개소의 반복적인 선별과 추정 저항력의 시간적 안정성은 구별하여 해석하였다.

추정의 식별성은 잔차 프로파일로 확인된다(Fig. 5). 응답 개소는 특정 R에서 뚜렷한 최솟값을 보인 반면, 고착 개소는 큰 저항력 영역에서 최소 잔차가 평탄하게 유지되었다. 이는 고착 개소에서 작은 잔차를 얻더라도



(a) Responsive joints
(shaded band: reference range, 100 kN–185 kN)



(b) Low-response joints

Fig. 5. Fitting-residual profiles versus assumed resistance R

저항력을 하나의 값으로 정하기 어려움을 보여준다.

미끄럼 기울기를 –0.300에서 -0.260 mm/°C로 바꾸면 14개소의 $\hat{R}_{fit}$중앙값은 222 kN에서 168 kN으로 약 24 % 감소하여 장기 공용조건 기준값(166 kN) 수준까지 내려간다. 즉 중앙값이 두 기준값 사이에 놓인다는 결과 자체가 기울기 가정에 민감하며, 기준값과의 대조는 자릿수 수준의 개연성 점검에 한한다. 이 결과는 검토한 기울기 변경 조건에 대한 민감도이며 통계적 오차 범위는 아니다. 또한 도상·체결장치의 분포 종저항[15]을 명시적으로 반영한 모델의 결과와는 구별하여 해석하여야 한다. 마찰저항 특성은 접합부의 접촉면 조건에 따라 달라질 수 있으므로[16], 다른 레일·선구에 적용할 때는 해당 물성·유효 길이·온도 경로로 다시 추정한다.

사구간의 대칭성도 점검하였다. 비대칭 모델에서는 14개소의 Rc 중앙값이 약 100 kN, Rt 중앙값이 약 340 kN으로 방향별 임계값에 차이가 있었으나, 총 사구간에 대응하는 (Rc+Rt)/2의 중앙값은 약 219 kN으로 대칭 추정(222 kN)과 사실상 같다. 즉 방향별 저항력에는 차이가 있었지만, 동일한 사구간 폭을 기준으로 비교한 대표 저항력의 중앙값은 대칭성 가정에 크게 영향을 받지 않음을 확인할 수 있었다.

계측 빈도의 영향을 확인하기 위해 2년간 25회차의 자료를 연 4회 수준인 7–8회차의 부분표본으로 줄여 동일한 역해석을 수행하였다. 고착 2개소는 부분표본에서도 나머지 14개소의 추정 저항력 중앙값 대비 2배 이상을 유지하였으나, 전체 표본과 부분표본의 개소별 추정값 간 상관계수는 0.54였다. 검토한 부분표본에서는 큰 구속을 보이는 개소의 상대적 구분은 유지되었지만, 개별 저항력의 정량 추정은 계측 빈도와 표본 구성에 민감하였다.

결과의 해석 범위는 반경 250 m의 단일 곡선 구간과 제한된 현장 확인에 근거한다. 볼트 이완은 10k202에서만 확인되었으며, 더 낮은 저항력이 추정된 레일의 체결 상태는 조사되지 않았다. 또한 준이상으로 분류된 10k077 (R^2=0.17)은 점추정값을 제시하여 14개소 통계에 포함하였으나, 낮은 유간-온도 회귀 설명력을 고려하여 개별 추정값의 해석에 주의가 필요하다.

본 방법은 정기점검의 유간·레일온도 기록으로 레일별 유효 저항력을 추정하지만, 이산 계측자료에 기초하므로 온도 반전 직후의 세부 거동을 확인하는 데에는 한계가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 곡선부 정척레일 이음매 16개소의 유간·레일온도 이력에 탄성-마찰 모델을 적용하여 공용중 유효 이음매 저항력을 개소·레일 단위로 역추정하였다. 주요 결과와 해석 범위는 다음과 같다.

(1) 전 계절 유간 응답의 결손을 이용하는 기하 추정과 관측 온도 경로를 적용하는 피팅을 수행하였다. 경로 피팅 모델의 계측자료 내 평균제곱근오차(RMSE)는 0.8 mm–2.3 mm였으며, 온도 반전 후 유간 변화가 지연되는 사구간 등 주요 거동을 재현하였다. 그러나 같은 자료에 대한 적합 결과이므로, 이 RMSE만으로 추정 저항력의 정확도나 새로운 자료에 대한 예측 성능이 검증되었다고 볼 수 없다. 상승·하강기의 기울기 비대칭도 기본 모델로는 충분히 설명되지 않았다.

(2) 저응답 2개소를 제외한 14개소에서 경로 피팅 저항력의 점추정값은 63 kN–282 kN, 중앙값은 222 kN이었다. 이 값은 가정한 설치조건 기준값 332 kN과 장기 공용조건 기준값 166 kN 사이에 있으나, 두 기준값은 실측 저항력이 아니라 체결력·마찰계수 및 공용 중 저하율을 가정한 계산값이다. 저응답 2개소에서는 큰 저항력 영역의 잔차가 평탄하여 저항력을 하나의 값으로 식별할 수 없었고, 모델 기준의 상세점검 후보로 분류하였다.

(3) 레일별 역해석은 개소 평균에 가려진 좌·우 구속 차이를 드러냈다. 저응답 2개소의 4개 레일 외에 10k301과 10k377의 우레일이 모델 기준의 추가 점검 후보로 나타났다. 이는 레일별 결과가 개소 평균을 보완할 수 있음을 보여주지만, 이 후보의 실제 체결·접촉 상태는 현장 확인이 필요하다.이는 별도 계측장비 없이 정기점검의 유간·레일온도 기록만으로 레일 단위 구속 수준을 비교할 수 있는 저항력 매개변수를 제공한다는 점에서, 유간 자체를 관측·예측하는 기존 접근과 구별된다.

(4) 미끄럼 기울기를 -0.300에서 -0.260 mm/℃로 바꾸자 14개소의 추정 저항력 중앙값이 222 kN에서 168 kN으로 약 24% 감소하였다. 25회 계측을 연 4회 수준의 7–8회 부분표본으로 줄였을 때 저응답 2개소의 상대적으로 큰 구속은 유지되었으나, 전체 표본과 부분표본의 개소별 추정값 간 상관계수는 0.54였다. 따라서 정기점검 자료를 이용한 구속 상태 비교의 가능성을 보여주었다.

(5) 볼트 제원에 따른 기준값 대조, 한 개소의 볼트 이완 관찰, 부분표본 및 민감도 분석은 추정 규모의 물리적 개연성과 선별 결과의 내부 일관성을 검토하는 근거를 제공하였다. 그러나 저항력의 독립 계측이 없어 추정값의 절대 정확도와 상세점검 선별 성능은 검증되지 않았다. 향후 서로 다른 추정 수준을 보이는 개소에서 저항력과 체결·접촉 상태를 독립적으로 확인하고, 다양한 선형·하중·환경조건의 장기 자료를 확보할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(DX기반 철도종합시험선로 운영 및 유지관리 플랫폼 구축, PK26913A0)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Ciobanu, C., and Nogy, L. (2017) Rail Thermal Force Calculations for Jointed Track, *The Journal, Permanent Way Institution*, Vol.135, Part 2.

[2] Kim, Y.H., Roh, W.K., Lee, S., Kim, J.H., and Choi, S.-M. (2008) Experimental Study on Behavior of High Strength Bolted Friction Joint with Oversized and Slotted Holes, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.6, pp.683−690 (in Korean).

[3] Shin, H., Lee, H.-D., and Shin, K.-J. (2019) Measurement of Bolt Tension of Friction Damper Using Manufactured Load Cell, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.171−178 (in Korean).

[4] La Placa, A., Freddi, F., and Giuliani, F. (2024) Monitoring of Insulated Rail Joints Based on Gap Value Measurement, *Urban Rail Transit*, Springer, Vol.10, No.1, pp.28−41.

[5] Jeon, D., Yi, N.-H., Bae, Y., and Yeo, I. (2025) Deep Learning-Based Site-Specific Prediction of Rail Joint-Gap Variations on Curved Ballasted Track Using Field-Measured Rail Data, *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, Vol.23, e05198.

[6] Radu, C. (1975) *Căi ferate. partea a II-a, Suprastructura Căii*, Institutul de Construcții București, Romania.

[7] Korean Society of Steel Construction (2019) *Track Materials*, KDS 47 20 45, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (in Korean).

[8] Korea National Railway (2025) *Continuous Welded Rail*, KR C-14050, Rev.7 (in Korean).

[9] Iwan, W.D. (1966) A Distributed-Element Model for Hysteresis and Its Steady-State Dynamic Response, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol.33, No.4, pp.893−900.

[10] Korea Rail Network Authority (2019) *As-built Drawings of the Railway Comprehensive Test Line: Rail Accessories and Joint Bolts (60kgKR)*, Drawing No. C9002247-025 and C9002247-064 (in Korean).

[11] Chambers, J.A. (1995) *Preloaded Joint Analysis Methodology for Space Flight Systems*, NASA

Technical Memorandum 106943, NASA Lewis Research Center, USA.

[12] Beagles, A.E., Beaty, P., Fletcher, D.I., Lewis, R., and Temple, B.P. (2015) Insulated Rail Joint Enhancement: Testing and Analysis, *Proceedings of the Stephenson Conference: Research for Railways*, Institution of Mechanical Engineers, UK.

[13] Zhu, K., Edwards, J.R., Qian, Y., and Andrawes, B. (2016) Finite Element Analysis of the Effects of Bolt Condition on Bolted Rail Joint Stresses, *Transportation Research Record*, Sage, Vol.2545, No.1, pp.36−45.

[14] Gräbe, P.J., and Jacobs, D. (2016) The Effects of Fastening Strength on the Variation in Stress-Free Temperature in Continuous Welded Rail, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Sage, Vol.230, No.3, pp.840−851.

[15] Min, K.H., Yun, K.-M., Park, J.-C., and Lim, N.-H. (2018) Estimation of Longitudinal Resistance of Concrete Tracks on Bridge Considering Longitudinal Resistance Characteristics of Rail Fastening System, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.18, No.5, pp.1−9 (in Korean).

[16] Park, Y.M., and Seong, T.R. (2000) Experiments on Slip Coefficients of High-Strength Bolt Connection with Weathering Steel (I), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.12, No.2, pp.167−175 (in Korean).

요 약 : 이 연구는 현장에서 반복 계측한 유간·레일온도 이력으로 정척레일 이음매의 유효 저항력을 역추정하고, 그 결과를 이음부 구속 상태 비교에 활용할 수 있는지 검토하였다. 유효 이음매 저항력 R은 이음부의 미끄럼을 개시시키는 임계 종방향 저항력으로 정의하였다. 약 2년간 25회에 걸쳐 계측한 곡선부 정척레일 이음매 16개소의 자료에 탄성-마찰 이력 모델을 적용하였다. 저항력을 점추정할 수 있는 14개소의 추정값 $\hat{R}$은 63 kN−282 kN이었으며, 중앙값은 222 kN이었다. 나머지 저응답 2개소는 저항력의 유일한 식별이 어려워 고착(모델 기준)으로 분류하였다. 레일별 해석에서는 개소 평균에 가려진 좌·우 구속 차이가 확인되었으며, 이 결과는 유간·온도 기록을 이용해 상세점검 대상을 선별할 가능성을 보여준다. 다만 추정 저항력은 독립 계측으로 검증되지 않았으며 모델 가정과 계측 빈도에 영향을 받는다.

핵심용어 : 볼트식 레일 이음매, 정척레일, 마찰 구속, 역해석, 유효 이음매 저항력, 궤도 유지관리