

곡선부 주행 중 타오름 탈선의 매개변수 연구

A Parametric Studies to the Wheel Climb Derailment on the Curved track

황정택[†], 목진용*, 이승일** · 이희성***

Jeong Taek Hwang · Jin Yong Mok · Seung Il Lee · Hi Sung Lee

ABSTRACT

Derailment is likely to have a direct connection with human life and must be eliminated. A traveling safety evaluation method based mainly on derailment coefficient has already established. But this method is very difficult because Derailment is caused by multiple factors. To evaluate the derailment factor of running train that runs on the curved track, we make use of mechanism that wheel loads and lateral forces were affected by track and rolling stock parameter. In this paper, deal with a search on the parameter and derailment factor. According to results of computer simulation value of Q/P, running safety is connected with operation velocity, curve radius, cant, track irregularity, suspension stiffness and static wheel load ratio, etc.

1. 서론

현재 국내선로에서 주어진 규정속도로 선로를 운행하는 열차는 비교적 안전하지만 실제로 얼마나 안전한가에 대하여 열차의 탈선안전도를 정량적으로 평가하기는 매우 어렵다. 이는 차륜과 레일의 상호작용이 단순하지 않으며, 차륜형상, 현가장치 등의 차량조건, 곡선반경, 캔트, 환화곡선 등의 선로조건, 운전조건 등의 다양한 영향인자들이 복합적으로 결합하여 탈선을 유발시키기 때문이다. 운전규정에 곡선반경별 속도제한은 있으나 실제로 탈선 발생 없이 가능한 곡선반경별 최대 곡선통과속도에 대하여 지금까지 객관적 검증없이 곡선반경별 속도제한을 실행하고 있다. 이는 탈선에 대한 위험도를 지수로써 표현할 수 있는 탈선안전도 기준이 아직까지 국내에서 규격이나 기준으로 제정되어 있지 않기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 향후에 열차의 주행안전성 확보를 위하여 탈선 위험도를 정량적으로 파악하기 위한 기술적 요건을 도출하기 위하여 우선 일본 철도총합연구소[1]에서 제시한 윤중횡압추정식을 이용하여 곡선반경이 작은 구간에서 횡압최대치와 윤중최소치를 계산하여 탈선계수 추정치를 계산하고 탈선관련 매개변수들에 대한 분석을 통해 탈선안전도를 향상시키고자 한다.

2. 곡선부에서 탈선에 대한 안전성 평가이론

2.1 원심력에 의한 윤중 증감

†책임저자, 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 서울도시철도

E-mail : jeongts20@naver.com

TEL : (02)6311-3137 FAX : (02)6311-4122

*저자 철도기술연구원 책임연구원

**저자 한국철도대학

***저자 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

$$\therefore \overline{P}_o = \frac{W_o}{2} \left[\left\{ \gamma + \frac{v^2}{g \times R} \times \frac{C}{G} \right\} + \frac{H_G^*}{G/2} \left\{ \frac{v^2}{g \times R} - \frac{C}{G} \right\} \right]$$

$$\therefore \overline{P}_i = \frac{W_o}{2} \left[\left\{ (2-\gamma) + \frac{v^2}{g \times R} \times \frac{C}{G} \right\} - \frac{H_G^*}{G/2} \left\{ \frac{v^2}{g \times R} - \frac{C}{G} \right\} \right]$$

- \overline{P}_o : 외측레일윤증정상분(KN) G : 궤간(m)
 \overline{P}_i : 내측레일윤증정상분(KN) C : 캔트(m)
 γ : 외측레일차륜의정지윤증비 R : 곡선반경(m)
 W_o : 정적축중(KN) g : 중력가속도(9.81m/s²)
 v : 주행속도(m/s) H_G^* : 차량유효높이(m)

2.2 선로 틀림에 의한 윤증 증감

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{8b^2} \left\{ \frac{\Delta t_c}{2} \cdot K_\phi + \Delta t_a \cdot k'_\phi \right\} K_\phi = \frac{1}{\frac{1}{4k_1 b_1^2} + \frac{1}{2k_2 b_2^2}}, \quad k'_\phi = 2k_1 b_1^2$$

$$\Delta t_c = \frac{2c}{a_{TC}} + t_c, \quad \Delta t_a = \frac{2a}{a_{TC}} + t_a$$

- $\overline{\Delta P}$: 평면성 굴절에 의한 정적 윤증감소분(KN) 2b₂ : 2차 현가장치 스프링 간격(m)
 K_ϕ : 종합회전 스프링상수(KN.m/rad) k₁ : 상하 1차 현가장치 스프링 정수/축당(KN/m)
 k'_ϕ : 대차 종합회전 스프링상수(KN.m/rad) k₂ : 상하 2차 현가장치 스프링 정수/대차편축당(KN/m)
 2b : 좌우접촉점 간격(m) Δt_c : 캔트체감분을 제외한 대차중심간 평면성 틀림(m)
 2b₁ : 1차 현가장치 스프링 간격(m) Δt_a : 캔트체감분을 제외한 축거평면성 틀림(m)

2.3 공기스프링에 의한 윤증 증감

$$F' = kb_2 \tan \phi = kb_2 \frac{c}{R}$$

$$M = 2F' b_2 = \frac{2kb_2^2}{R} = d(F_1 + F_2) = \frac{2kb_2^2 c}{R} \quad F_1 = \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{R}$$

- F' : 수평하중(kN) 2c : 대차중심간 거리(m)
 k : 2차스프링 전후강성 R : 곡선반경(m)
 2b₂ : 2차 현가장치 스프링 간격(m) F₁ : 공기스프링에 의한 윤증 증감
 ϕ : 플랜지 접촉각(radian) β : 윤축횡압 F₁의 보정 계수[1]

2.4 내,외측 레일의 윤증 추정식

$$P_i = \left\{ \overline{P}_i + \overline{\Delta P} - F_1 \times \frac{\eta}{\tan 60^\circ} \right\}$$

$$P_o = \left\{ \overline{P}_o - \overline{\Delta P} + F_1 \times \frac{\eta}{\tan 60^\circ} \right\}$$

P_o : 외측 레일의 윤중(KN)

P_i : 내측 레일의 윤중(KN)

\overline{P}_o : 외측 레일의 윤중정상분(KN)

\overline{P}_i : 내측 레일의 윤중정상분(KN)

$\overline{\Delta P}$: 평면성 틀림에 의한 정적 윤중감소(KN)

F_1 : 공기스프링의 비틀림에 의한 윤축횡압(KN)

η : F_1 의 윤중보정계수[1]

2.5 곡선 전향 횡압

$$\overline{Q}_i = xP_i$$

\overline{Q}_i : 내측측 횡압정상분(kN)

x : 내측측 횡압/윤중비[1]

2.6 원심력 및 공기스프링에 의한 횡압

$$\Delta Q_{AS} = W_o \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + F_1 = W_o \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2kb^2c}{aR}$$

2.7 궤도 틀림, 이음부 충격에 의한 횡압 변동분

$$\Delta Q_{AD} = 3W_o k_Q \sigma_Z V$$

$$\Delta Q_{unspr} = \left\{ \frac{\epsilon}{100} \right\} \times \left\{ \frac{2500}{R} + 4 \right\} \times \frac{V}{100}$$

ΔQ_{AD} : 윤축횡압변동분(KN)

ΔQ_{unspr} : 이음부의 횡압변동분(KN)

σ_Z : 궤도줄틀림 표준편차(mm)

ϵ : 이음부의 횡압변동의 유효분(%)

k_Q : 윤축횡압변동계수(1/mm/(km/h))

2.8 외측레일의 윤압 추정식

$$Q_o = \overline{Q}_i + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + \Delta Q_{unspr}$$

Q_o : 외측측 횡압(KN)

ΔQ_{AD} : 궤도틀림에 의한 윤축횡압변동분(KN)

\overline{Q}_i : 내측측횡압정상분(KN)

ΔQ_{unspr} : 레일이음부 횡압변동분(KN)

ΔQ_{AS} : 윤축횡압정상분(KN)

3. 평가의 기본 조건

3.1 차량조건

차량의 일반 제원은 아래와 같다.

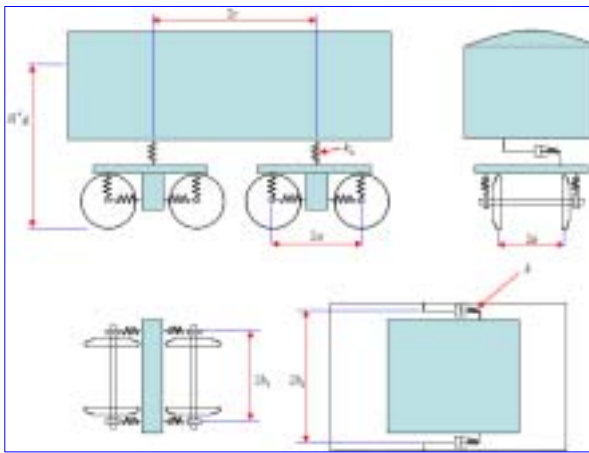


그림 1. 차량 조건

변수명	수치
차량중심높이(m)	1.76
정적축중(kN)	99

정지윤증비	1.0
축간거리(m)	2.3
대차중심간거리(m)	15.9
플랜지각(°)	60°
주행속도(m/s)	25m/s
1차현가장치강성/축상	1020
2차현가장치강성/편측(kN/m)	295
좌우접촉점간격(m)	1.5
1차현가장치간격(m)	1.93
2차현가장치간격(m)	2.0
2차현가장치전후강성(m)	160
내궤측횡압윤증비(m)	0.3-0.55

표 1. 차량 입력변수

3.2 선로선형조건

안전성 평가의 기본 조건으로 사용한 선로선형조건은 그림 2와 같다.

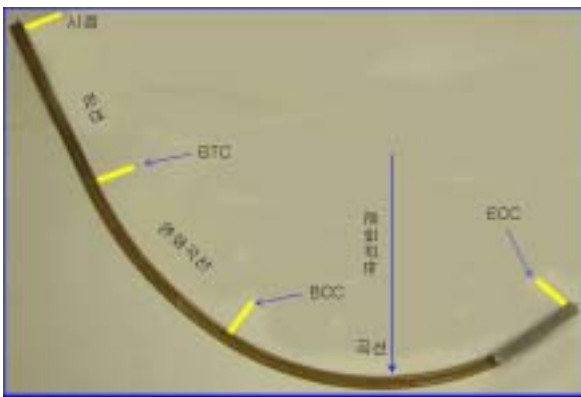


그림 2. 선로선형조건

3.3 궤도틀림조건

안전성 평가의 기본 조건으로 사용한 궤도 틀림 조건은 아래와 같다.

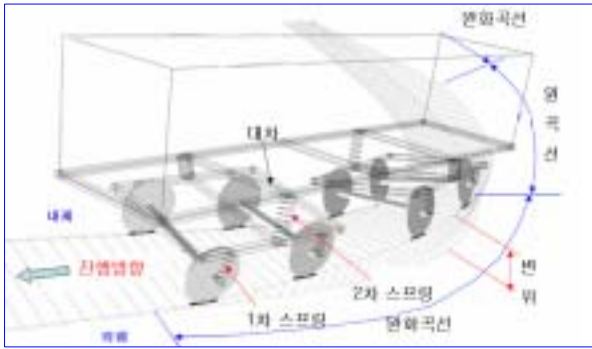


그림 3. 출구측 완화곡선 통과시 차량의 거동

대차평면성틀림	5mm마다 측정
표준편차	1.5
이음매충격유효분	20 %
마찰계수	0.3
윤축횡압변동계수	0.00015

표 2. 궤도틀림조건외 입력변수

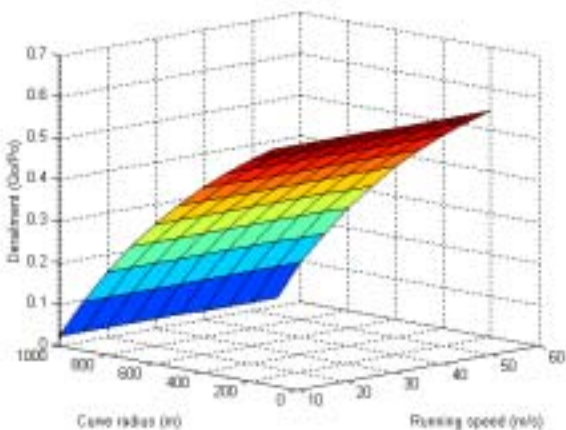
4. 평가 분석

4.1 3차원 민감도 해석

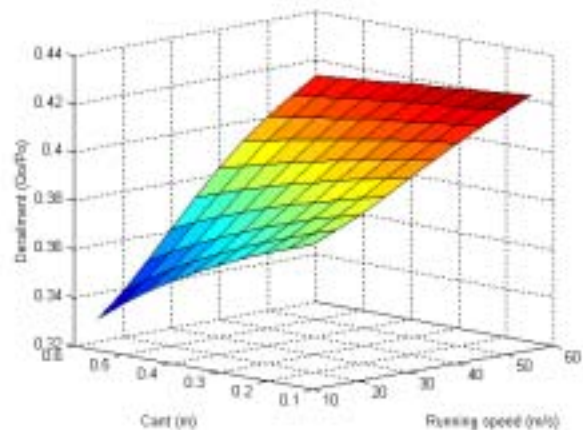
차량조건과 선로조건외 변수에 대한 추정탈선계수의 영향을 곡선부 형상과 통과속도에 따른 민감도 해석을 수행하였다.

(1) 주행속도

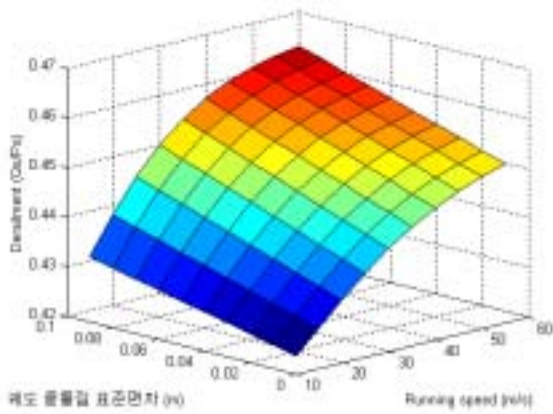
그림 4는 곡선반경, 캔트, 궤도 줄틀림 표준편차, 내측측 횡압윤증비, 외측측 차륜의 정지윤증비의 변화와 곡선 통과속도의 변화(10 m/s ~ 55 m/s)에 따른 외측측 추정탈선계수의 민감도 해석을 수행한 결과이다. 그림 4의 (a)에서와 같이 일정 캔트(110 mm)에서 곡선반경의 감소와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 곡선반경에 대한 민감도가 크게 나타났다. 그림 4의 (b)에서와 같이 일정 곡선반경(R=300 m)에서 캔트의 감소와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다. 그림 4의 (c)에서와 같이 일정 곡선반경(R=300 m)과 캔트(110 mm)에서 궤도 줄틀림 표준편차와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다.



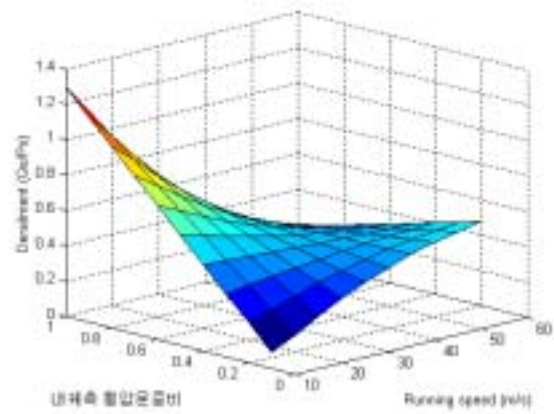
(a) 통과속도와 곡선반경



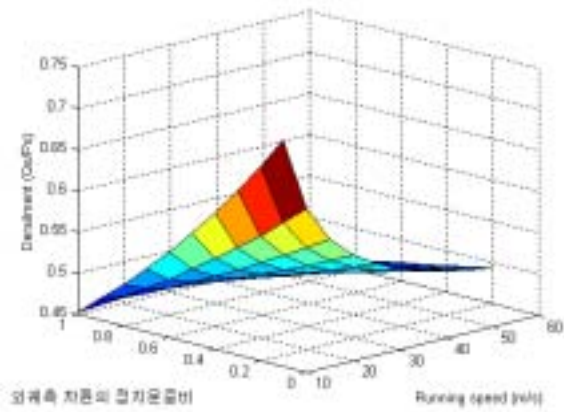
(b) 통과속도와 캔트



(c) 통과속도와 궤도 줄뜸림 표준편차



(d) 통과속도와 내궤측 횡압윤중비



(e) 통과속도와 외궤측 차륜의 정지윤중비

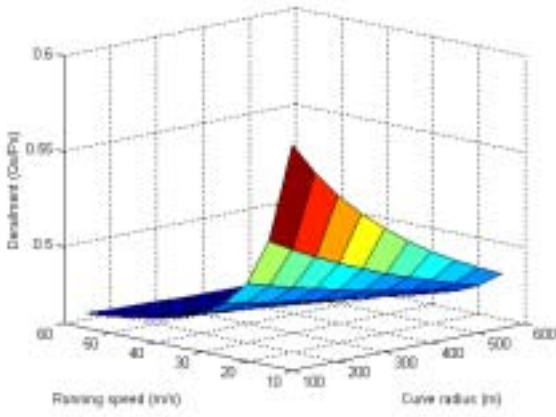
그림 4. 통과속도와 각 변수간의 민감도 해석

그림 4의 (d)에서와 같이 일정 곡선반경($R=300$ m)과 캔트(110 mm)에서 곡선반경에 따른 내궤측 횡압윤중비와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 내궤측 횡압윤중비에 대한 민감도가 크게 나타났다. 그림 4의 (e)에서와 같이 일정 곡선반경($R=300$ m)과 캔트(110 mm)에서 외궤측 차륜의 정지윤중비의 감소와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 외궤측 차륜의 정지윤중비에 대한 민감도가 크게 나타났다.

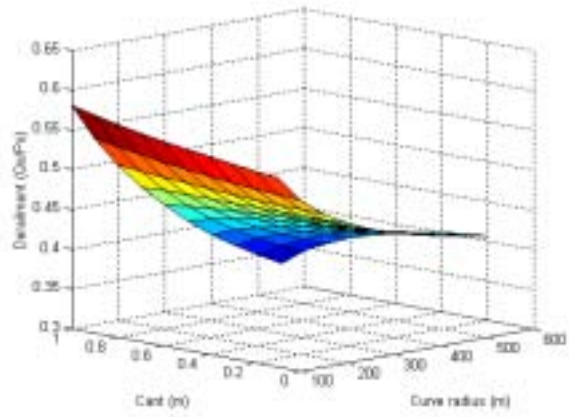
(2) 곡선반경

그림 5는 통과속도, 캔트, 궤도 줄뜸림 표준편차, 내궤측 횡압윤중비, 외궤측 차륜의 정지윤중비의 변화와 곡선반경의 변화($R=100$ m ~ 550 m)에 따른 외궤측 추정탈선계수의 민감도 해석을 수행한 결과이다. 그림 5의 (a)에서와 같이 일정 캔트(110 mm)에서 통과속도와 곡선반경이 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었다. 그림 5의 (b)에서와 같이 일정 통과속도($v=25$ m/s)에서 캔트의 증가와 곡선반경의 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 캔트에 대한 민감도가 크게 나타

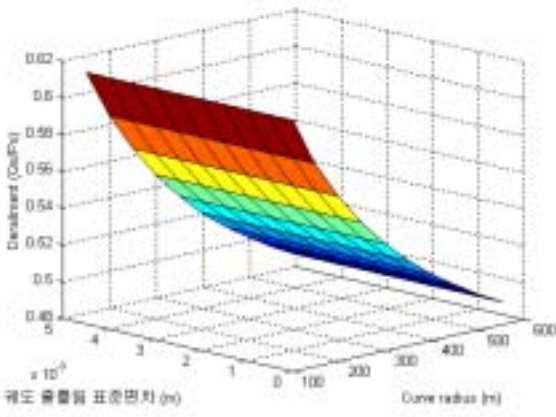
났다. 그림 5의 (c)에서와 같이 일정 통과속도($v=250$ m/s)과 캔트(110 mm)에서 궤도 줄틀림 표준편차의 증가와 곡선반경의 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다.



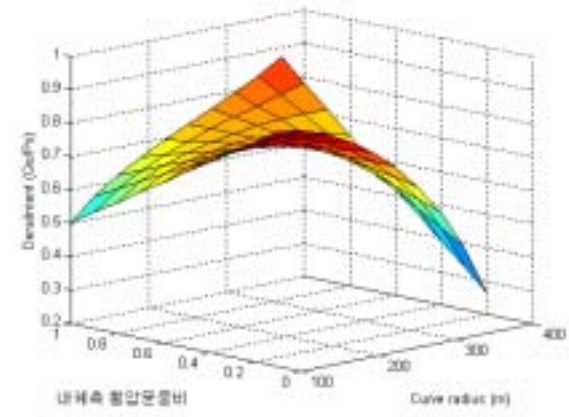
(a) 곡선반경과 통과속도



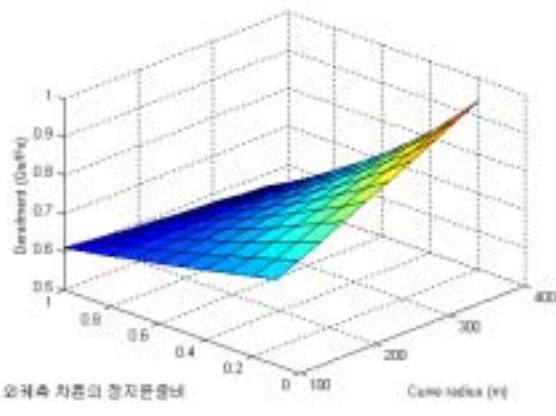
(b) 곡선반경과 캔트



(c) 곡선반경과 궤도 줄틀림 표준편차



(d) 곡선반경과 내궤측 횡압윤증비



(e) 곡선반경과 외궤측 차륜의 정지윤증비

그림 5. 곡선반경과 각 변수간의 민감도 해석

그림 5의 (d)에서와 같이 일정 통과속도($v=25$ m/s)과 캔트(110 mm)에서 곡선반경에 따른 내궤측 횡압윤증비와 곡선반경이 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 내궤측 횡압윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다. 그림 5의 (e)에서와 같이 일정 통과속도($v=25$ m/s)과 캔트(110 mm)에서 외궤측 차륜의 정비윤증비의 감소와 곡선반경이 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 외궤측 차륜의 정지윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다.

5. 참고문헌

- 1) 鐵道總研報告, "윤중, 횡압추정식에 의한 탈선에대한 안전성평가", Vol.15, No.4, 2001.4
- 2) 鐵道總研報告, "탈선에 대한 안전성평가지표의 연구", Vol.9, No.3, 1995.8
- 3) 鐵道總研報告, "급곡선 저속주행시의 타고오름 탈선에 관한 연구" Vol.18, No.8, 2004.8
- 4) C. Esvelde, Modern Railway Track, MRT-Productions, 2nd Edition, 2001.