

탈선 안전성능 향상을 위한 매개변수에 관한 연구

A study on the parameters to enhance derailment safety

황정택[†] · 이희성^{*}

Jeong-Taek Hwang · Hi Sung Lee

Abstract Technical requirements associated with derailment to ensure running safety of train are discussed. By using estimated derailment coefficient ratio, interaction of various parameters such as operation velocity, curve radius, cant, track irregularity, suspension stiffness and static wheel load ratio are analyzed to enhance derailment safety. Sensitivity analysis in terms of pattern and passage speed of curve is performed by using rolling stock and track conditions associated with SMRT Line No. 5.

Keywords : derailments, derailment coefficients (Q/P), running safety

요 지 열차주행안전성을 확보하기 위한 기술적 요건을 도출하기 위하여 탈선관련 매개변수들을 분석한다. 윤중횡압 추정식을 이용하여 탈선안전도 향상에 기여하는 매개변수들간의 상호작용을 분석한다. 특히, 도시철도 5호선 전동차의 차량조건 및 선로조건을 이용하여, 추정탈선계수의 영향을 곡선부 형상과 통과속도에 따른 민감도 해석을 수행한다.

주 요 어 : 탈선, 탈선계수(Q/P), 주행안전성

1. 서 론

현재 국내 선로에서 주어진 규정 속도로 운행하는 열차가 비교적 안전하지만 실제로 얼마나 안전한가에 대하여 탈선 안전도를 정량적으로 평가하기는 매우 어렵다. 이는 차륜과 레일의 상호작용이 단순하지 않으며, 차륜형상, 현가장치 등의 차량조건, 곡선반경, 캔트, 완화곡선 등의 선로조건, 운전 조건 등의 다양한 영향인자 등이 복합적으로 결합하여 탈선을 유발시키기 때문이다.

운전규정에 곡선반경별 속도제한은 있으나 실제로 탈선 발생 없이 주행 가능한 속도에 관해서는 지금까지 객관적 검증 없이 곡선 반경별 속도제한을 실행하고 있다. 이는 탈선에 대한 위험도를 지수로써 표현 할 수 있는 탈선안전도 기준이 아직까지 국내에서 규격이나 기준으로 제정되어 있지 않기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 향후에 열차의 주행 안전성 확보, 즉 탈선 위험도를 정량적으로 파악하기 위한 기술적 요건을 도출하기 위하여 일본 철도종합연구소[1]에서 제시한 윤중 횡압 추정식을 이용하여 곡선 반경이 작은 구간에서 횡압 최대치와 윤중 최소치를 계산하여 탈선계수 추정치를 계산하고, 탈선관련 매개변수들에 대한 분석을 통해 탈선 안전도 향상에 기여하는 매개변수들 간의 상호 영향을 분석하였다. 특히, 서울 도시철도 5호선 전동차의 차량 조건과 선로 조건 (길동 → 강동)을 대상으로 추정탈선계수를 연구하였으며, Visual Fortran을 이용하여 수치해석과 도식화를 수행하였다.

2. 추정탈선계수의 수치해석

2.1 윤중횡압 추정식[1]

(I) 원심력에 의한 윤중 증감분

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

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

† 책임저자 : 회원, 서울도시철도공사

E-mail : jeongts20@naver.com

TEL : (02)6311-3134 Fax : (02)6311-4122

* 교신저자 : 회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

E-mail : hslee@snut.ac.kr

(2) 선로면의 비틀림에 의한 윤종의 증감

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{8b^2} \left\{ \frac{\Delta t_c}{2} \cdot K_\phi + \Delta t_a \cdot k'_{\phi 1} \right\}$$

$$K_\phi = \frac{1}{\frac{1}{4k_1 b_1^2} + \frac{1}{2k_2 b_2^2}}, \quad k'_{\phi 1} = 2k_1 b_1^2$$

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

(3) 공기 스프링의 비틀림에 의한 윤종의 증감

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

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

$$F_1 = \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{R}$$

(4) 내측·외측 레일 윤종의 추정식

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

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

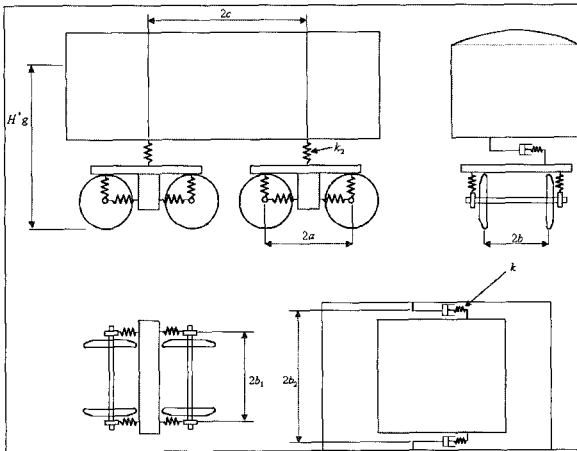


Fig. 1. Geometrical indication of R/S parameters

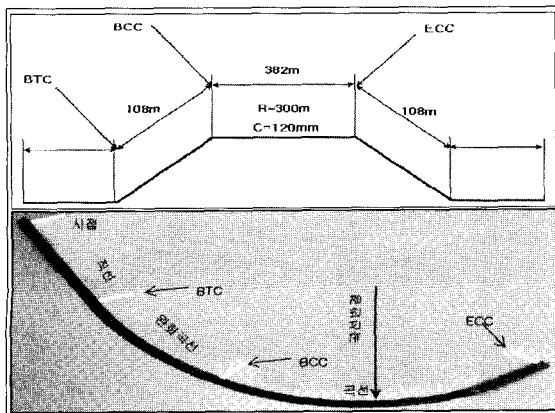


Fig. 2. Input parameters associated with track conditions

(5) 안쪽 레일의 마찰력에 의한 곡선전향 횡압

$$\overline{Q}_i = \kappa P_i$$

(6) 원심력, 공기스프링의 비틀림에 의한 윤축횡압

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

$$= W_o \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{aR}$$

(7) 궤도 뒤틀림 및 이음매부 충격에 의한 횡압변동분

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

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

(8) 외측 레일 횡압의 추정식

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

2.2 차량 조건[2]

차량의 일반 제원은 Table 1과 같다.

2.3 선로선형 조건

안전성 평가의 기본 조건으로 사용한 선로 구간(길동→강동)은 곡선 반경 300m, 캔트 120mm 그리고 곡선 반경에 따른 통과 속도는 최대 65km/h로 제한되어진다.

Table 1. Input parameters and numbers of Rolling Stock model

변수명	수치
차량 중심높이(m)	1.76
정적 축중(kN)	99
정지윤증비	1.0
축간거리(m)	2.3
대차중심간거리(m)	15.9
플랜지각(°)	60°
주행속도(m/s)	25
1차현가장치강성/축상(kN/m)	1020
2차현가장치강성/편측(kN/m)	295
좌우접촉점간격(m)	1.5
1차현가장치간격(m)	1.93
2차현가장치간격(m)	2.0
2차현가장치 전후강성(kN/m)	160
내궤측 횡압윤증비	0.3-0.55

Table 2. Track conditions

곡선 반경	m	300
캔트	mm	120
캔트체감배율	-	900
완화곡선길이	m	108

Table 3. Input parameters associated with track irregularities

대차 평면성틀림	m	5mm마다 측정
표준편차	mm	1.5
이음매 충격유효분	%	20
줄틀림 표준편차	mm	0.64
윤축형압 변동계수	1/mm/(km/h)	0.00015

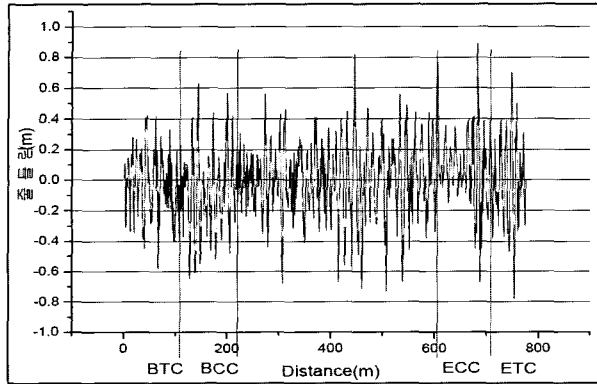


Fig. 3. Alignment irregularity variation for test section

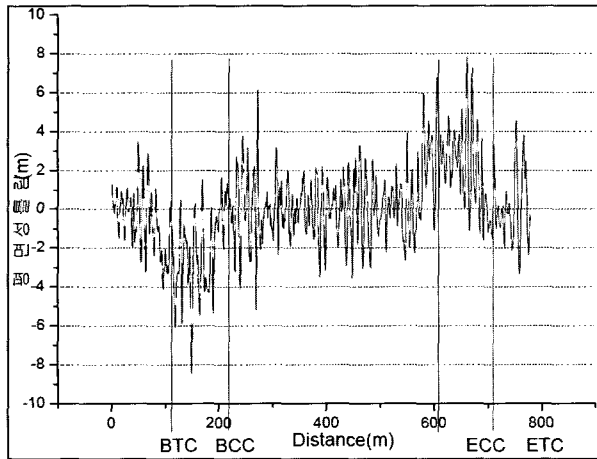


Fig. 4. Twist irregularity variation for test section

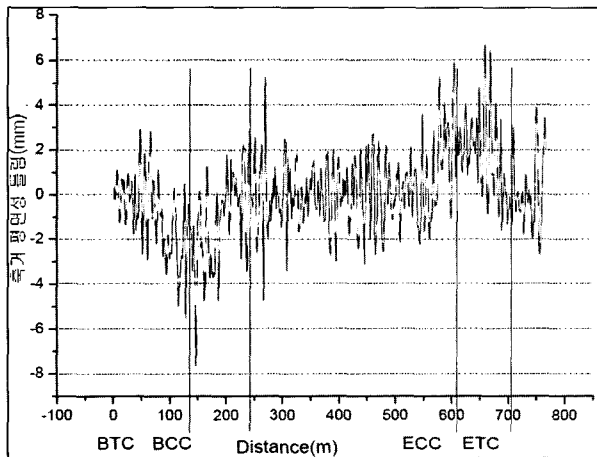


Fig. 5. Track twist variation between wheelbases for test section

2.4 궤도틀림조건

안전성 평가의 기본조건으로 사용한 궤도틀림 조건은 Table 3과 같다.

3. 3차원 민감도 해석

3.1 3차원 민감도 해석

차량 조건과 선로 조건의 변수에 대한 추정탈선계수의 영향을 곡선부 형상과 통과속도에 따른 민감도 해석을 수행하였다.

(1) 통과 속도

Fig. 7은 곡선 반경, 캔트, 궤도 줄틀림 표준편차, 내궤측 횡압윤증비, 외궤측 차륜의 정지윤증비의 변화와 곡선통과속도의 변화(10m/s~60m/s)에 따른 외궤측 추정탈선계수의 민감도 해석을 수행한 결과이다. Fig. 7의 (a)에서와 같이 일정 캔트(120mm)에서 곡선반경의 감소와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있고, 통과속도와 곡선반경에 대한 민감도가 크게 나타났다. Fig. 7의 (b)에서와 같이 일정 곡선반경(R=300m)에서 캔트의 증가와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 7의 (c)에서와 같이 일정 곡선반경(R=300m)과 캔트(120mm)에서 궤도 줄틀림 표준편차와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 7의 (d)에서와 같이 일정 곡선반경(R=300m)과 캔트(120mm)에서 곡선반경에 따른 내궤측 횡압윤증비와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 내궤측 횡압윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다. Fig.

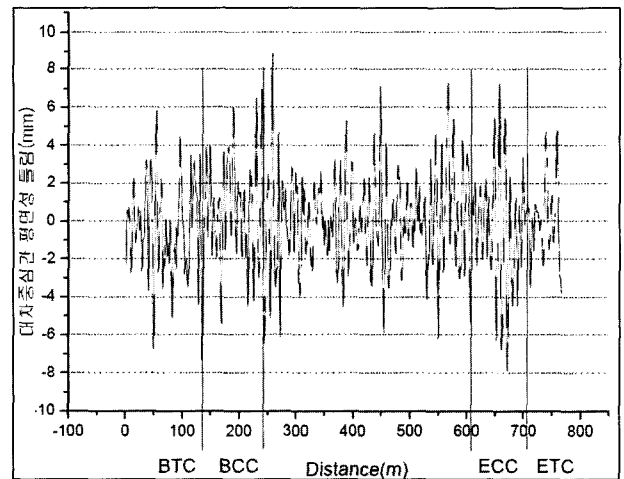
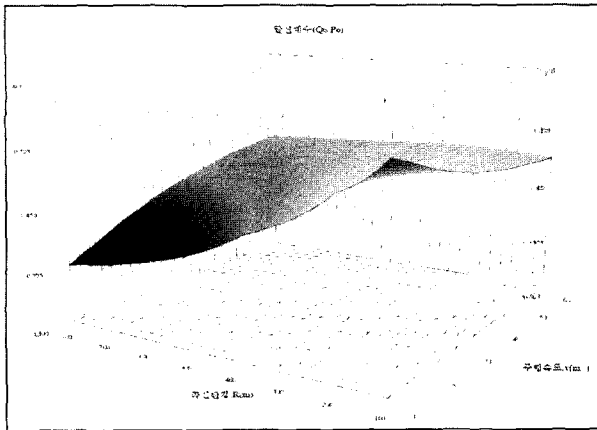
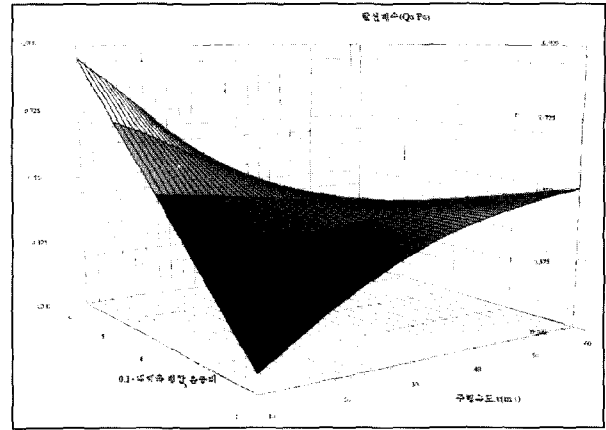


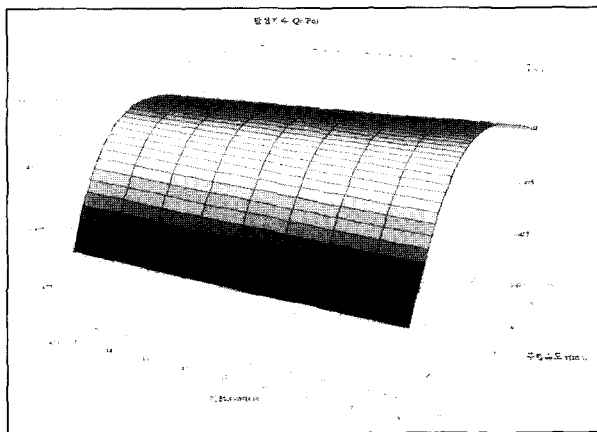
Fig. 6. Track twist variation between bogie centers for the test section



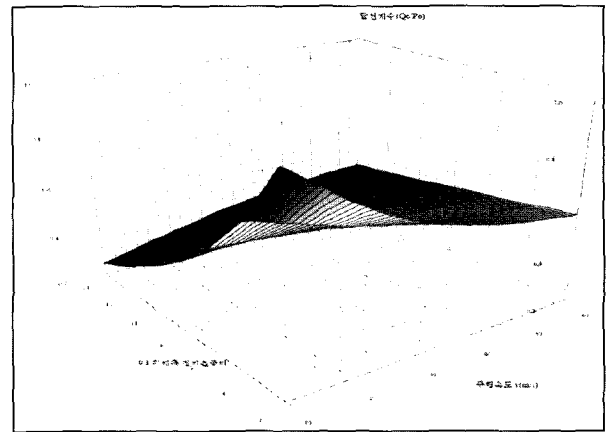
(a) curve passing speed vs. curve radius



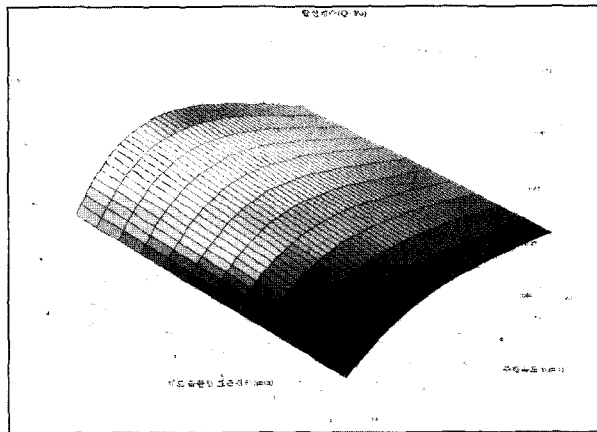
(d) Curve passing speed vs. inside Q/P ratio



(b) Curve passing speed vs. cant



(e) Curving speed vs. static wheel load ratio of outer wheel



(c) Curve passing speed vs. standard deviation of alignment irregularities

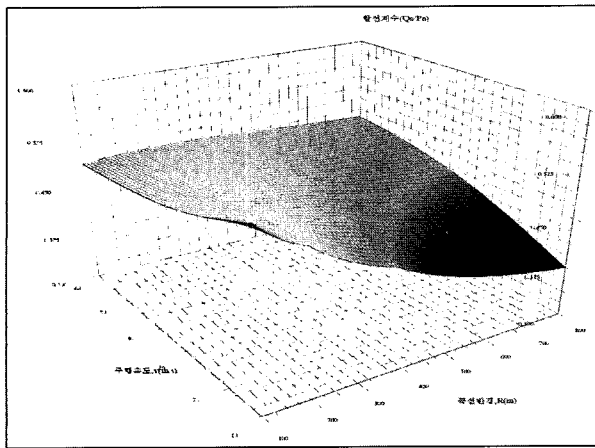
Fig. 7. Sensitivity analysis between curve passing speed and each parameter

(2) 곡선 반경

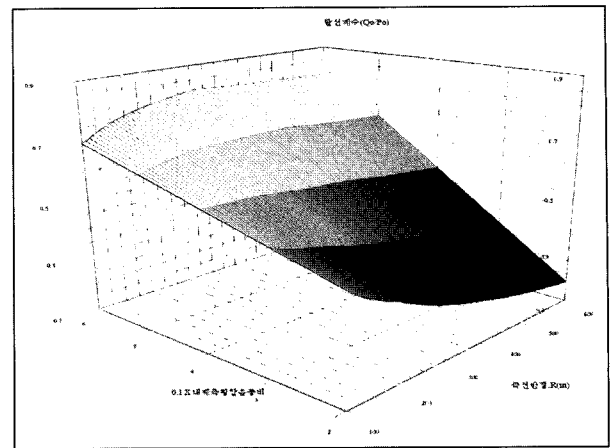
Fig. 8은 통과속도, 캔트, 궤도 줄틀림 표준편차, 내궤측 횡압윤증비, 외궤측 차륜의 정지윤증비의 변화와 곡선 반경의 변화($R=100m \sim 800m$)에 따른 외궤측 추정탈선계수의 민감도 해석을 수행한 결과이다. Fig. 8의 (a)에서와 같이 일정 캔트(120mm)에서 통과속도와 곡선반경이 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었다. Fig. 8의 (b)에서와 같이 일정 통과속도($v=14m/s$)에서 캔트의 증가와 곡선반경의 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었다. Fig. 8의 (c)에서와 같이 일정 통과속도($v=14m/s$)과 캔트(120mm)에서 궤도 줄틀림 표준편차의 증가와 곡선반경의 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 8의 (d)에서와 같이 일정 통과속도($v=14m/s$)과 캔트(120mm)에서 곡선반경에 따른 내궤측 횡압윤증비와 곡선반경이 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 내궤측 횡압윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다. Fig. 8의 (e)

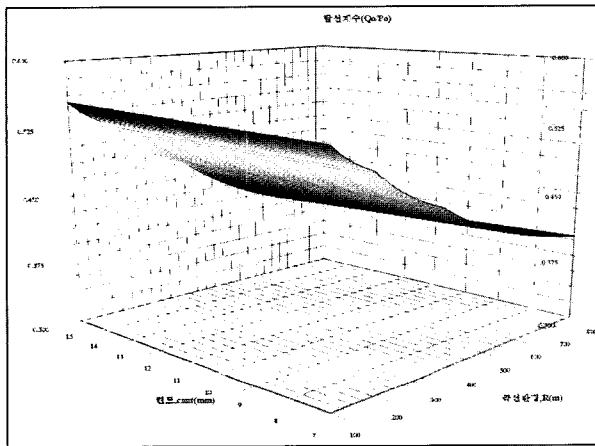
7의 (e)에서와 같이 일정 곡선 반경($R=300m$)과 캔트(120mm)에서 외궤측 차륜의 정지윤증비의 감소와 통과속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 외궤측 차륜의 정지윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다.



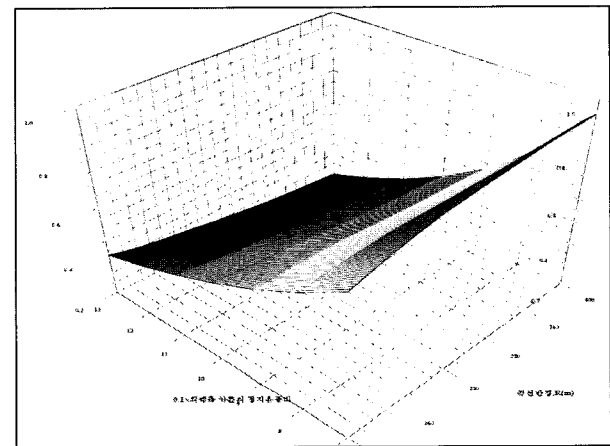
(a) Curve radius vs. passing speed



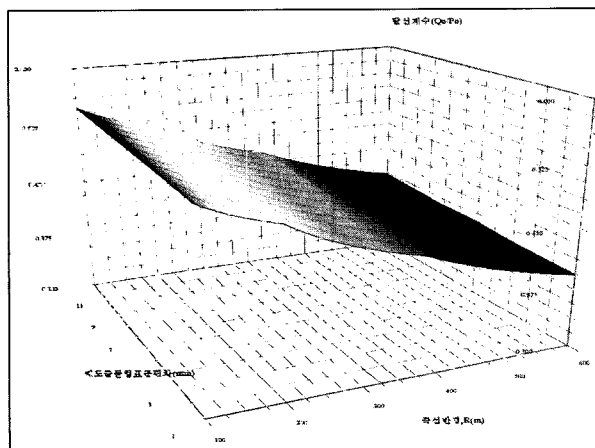
(d) curve radius vs. inside Q/P ratio



(b) curve radius vs. cant



(e) curve radius vs. static wheel load ratio of outer wheel



(c) curve radius vs. standard deviation of alignment irregularities

Fig. 8. sensitivity analysis between curve radius and each parameter

4. 결론

탈선안전성능향상을 위한 탈선계수와 관련된 매개변수들을 차례로 변환시켜 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 곡선부에서는 통과속도(v)를 증가시키면 외궤측 윤증정상분(\bar{P}_o)이 증가하여 곡선부 전향횡압(\bar{Q}_i)은 감소하지만, 원심력 및 공기스프링(ΔQ_{AS})과 궤도틀림(ΔQ_{AD}) 그리고 이음부 충격에 의한 횡압 성분(ΔQ_{uspr})이 증가하여 추정탈선계수는 증가한다. 급곡선부(R=229m까지)에서는 통과속도(v)를 증가시켜도 초기 외궤측 윤증정상분(\bar{P}_o)의 증가량이 커 추정 탈선계수는 감소한다. 곡선반경(R)을 증가시키면 원심력 및 공기스프링에 의한 횡압(ΔQ_{AS})이 크게 감소하고 이음부 횡압변동분(ΔQ_{uspr})이 감소하

에서와 같이 일정 통과속도(v=14m/s)와 캔트(120mm)에서 외궤측 차륜의 정지윤증비의 감소와 곡선 반경이 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 외궤측 차륜의 정지윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다.

여 추정탈선계수는 감소한다. 캔트(cant) 초과량이 증가하면 원심력 및 공기스프링에 의한 횡압(ΔQ_{AS})은 감소하고 외궤측 윤증정상분(\bar{P}_o)도 감소하지만 윤증정상분(\bar{P}_o)이 상대적으로 크게 감소하여 결과적으로 탈선계수는 증가한다. 궤도 줄틀림 표준편차(σ_z)의 변화에서 줄틀림 표준편차를 증가시킬 경우 줄틀림에 의한 횡압(ΔQ_{AD})의 증가로 추정탈선계수는 증가한다. 내궤측 횡압윤증비(κ)를 증가시킬 경우 곡선부 전향횡압(\bar{Q}_r)이 급격히 증가하여 추정탈선계수는 급격히 증가한다. 외궤측 차륜의 정지윤증비(γ)를 증가시키면 외궤측 윤증정상분(\bar{P}_o)의 급격한 증가로 추정탈선계수는 감소하여 민감도가 크게 나타났다.

(2) 실제 선로조건(길동→강동, 곡선 반경, 캔트, 완화곡선)

및 열차운행조건(곡선 반경에 대한 제한속도)을 입력변수로 하여 실제노선을 평가하면 최대 추정탈선계수가 0.49로서, 한계탈선계수 0.8을 크게 밑돌아 안전한 것으로 평가되었다.

참고 문헌

1. 철도총연보고(2001.4), “윤증, 횡압추정식에 의한 탈선에 대한 안전성평가”, Vol.15, No.4, pp.2~7.
2. 철도총연보고(2004.8), “급곡선 저속주행시의 타고오름 탈선에 대한 안전성평가수법”, Vol.18, No.8. pp.1~9.
3. 서울도시철도공사(1995), “서울특별시지하철5호선 전차 정비 지침서”

(2007년 9월 10일 논문접수, 2007년 10월 22일 심사완료)