

## 탈선 안전성능 향상을 위한 매개변수에 관한 연구

## A study on the parameters to ensure safety against derailment

황정택†·이희성\*·목진용\*\*

Jeong Taek Hwang, Hi Sung Lee, Jin Yong Mok

Key Words : derailments, value of Q/P, running safety

## 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,

SMRT train Line No. 5 Bogie is selected to do numerical study considering rolling stock and track condition

## 1. 서 론

현재 국내 선로에서 주어진 규정 속도로 운행하는 열차가 비교적 안전하지만 실제로 얼마나 안전하가에 대하여 탈선 안전도를 정량적으로 평가하기는 매우 어렵다. 이는 차륜과 레일의 상호작용이 단순하지 않으며, 차륜 형상, 현가장치 등의 차량 조건, 곡선 반경, 캔트, 완화 곡선 등의 선로 조건, 운전조건 등의 다양한 영향인자 등이 복합적으로 결합하여 탈선을 유발시키기 때문이다.

운전 규정에 곡선 반경별 속도 제한은 있으나 실제로 탈선 발생 없이 주행 가능한 속도에 관해서는 지금까지 객관적 검증 없이 곡선 반경별 속도 제한을 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 확보를 위하여 탈선 위험도를 정량적으로 파악하기 위한 기술적 요건을 도출하기 위하여 일본 철도종합연구소<sup>(1)</sup>에서 제시

한 윤중횡압추정식을 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<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>

## (1) 원심력에 의한 윤중 증감분

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

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

## (2) 선로면의 비틀림에 의한 윤중의 증감

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

† 책임저자, 서울도시철도공사

E-mail : jeongts20@naver.com

Tel : (02)6311-3134, Fax : (02) 6311-4122

\* 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

\*\* 철도기술연구원 책임 연구원

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

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

### (3) 공기 스프링의 비틀림에 의한 운동의 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 운동의 추정식

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

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

### (5) 안쪽 레일의 마찰력에 의한 곡선전향 횡압

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

### (6) 원심력, 공기스프링의 비틀림에 의한 윤축 횡압

$$\begin{aligned} \Delta Q_{AS} &= W_o \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + F_1 \\ &= W_o \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{aR} \end{aligned}$$

### (7) 궤도 뒤틀림 및 이음매부 충격에 의한 횡압 변동분

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

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

### (8) 외측 레일 횡압의 추정식

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

## 2.2 차량 조건<sup>(5)</sup>

차량의 일반 제원은 표 1과 같다.

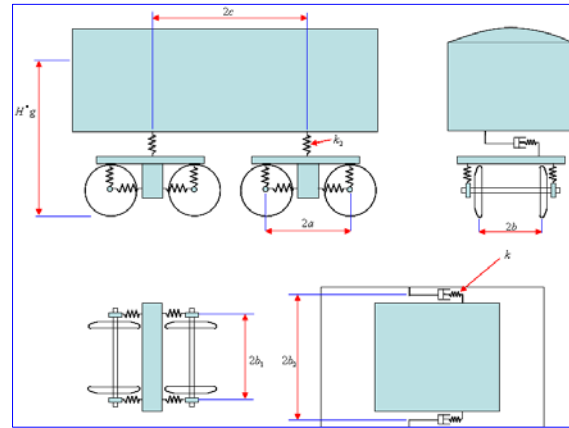


그림 1. 차량 조건

표 1. 차량 입력 변수

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
1차원가장치강성/축상	1020
2차원가장치강성/편측(kN/m)	295
좌우접촉점간격(m)	1.5
1차원가장치간격(m)	1.93
2차원가장치간격(m)	2.0
2차원가장치전후강성(m)	160
내륜측횡압윤증비(m)	0.3-0.55

## 3.2 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 제한되어진 다.

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

표 2. 선로선형 조건

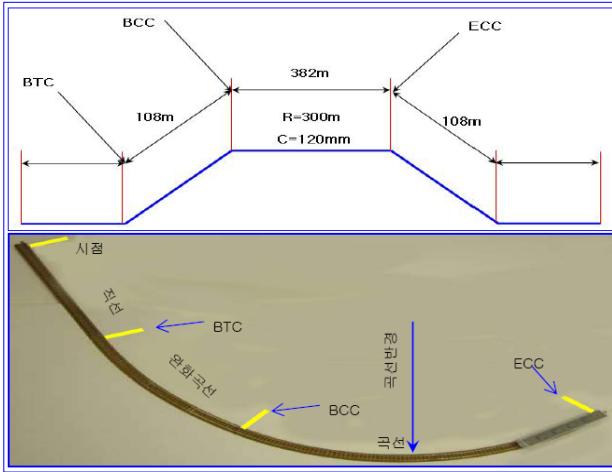


그림 2. 입력변수로 사용된 선로 조건

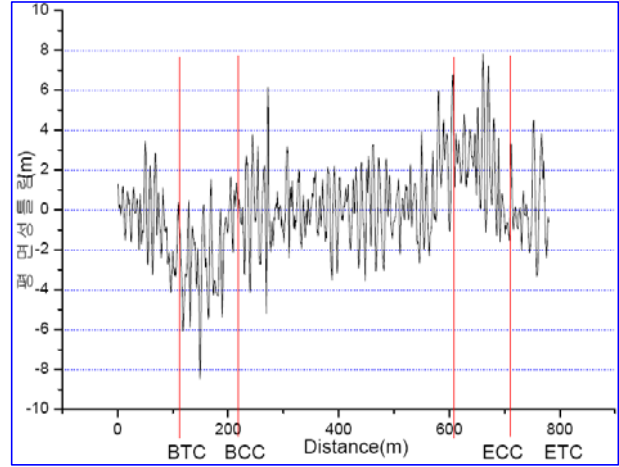


그림 4. 시험 대상 구간의 평면성 틀림 변화

### 3.3 궤도틀림조건

안전성 평가의 기본 조건으로 사용한 궤도 틀림 조건은 표 3과 같다.

표 3. 궤도틀림조건 입력 변수

대차평면성틀림	m	5mm마다 측정
표준편차	mm	1.5
이음매충격유효분	%	20
줄틀림표준편차	mm	0.64
윤축형압변동계수	1/mm/(km/h)	0.00015

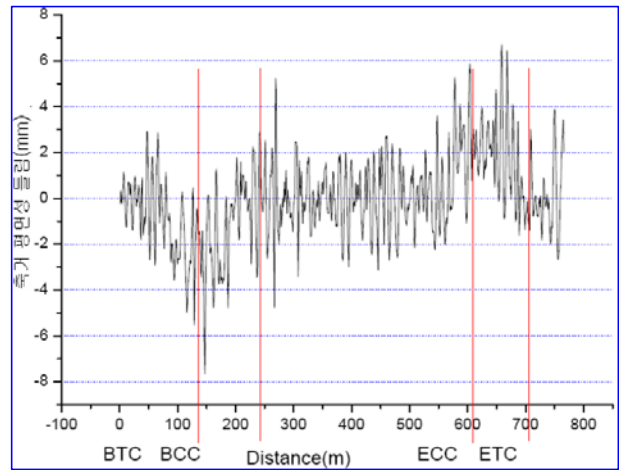


그림 5. 시험 대상 구간의 축거평면성 틀림 변화

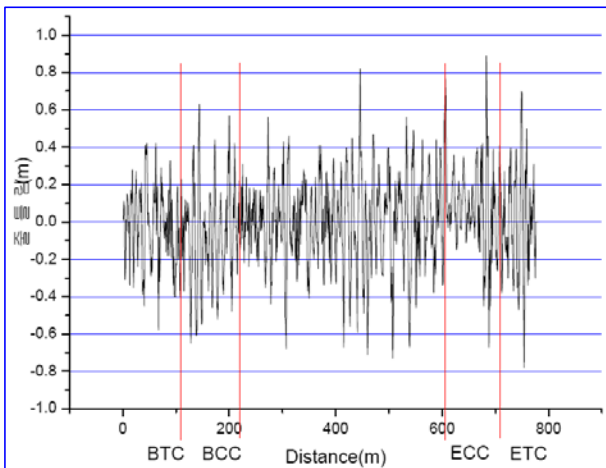


그림 3. 시험대상 구간의 줄틀림 변화

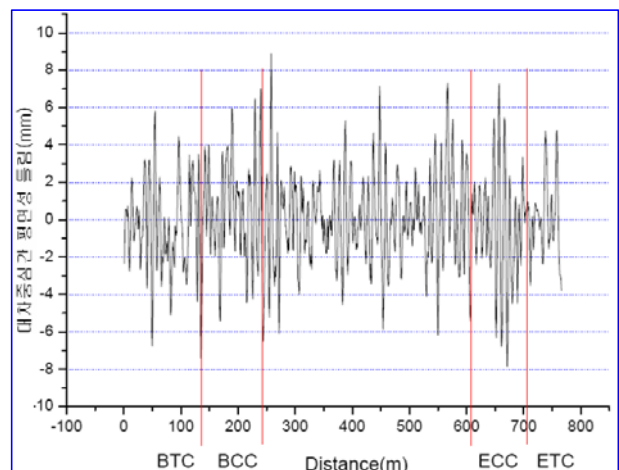


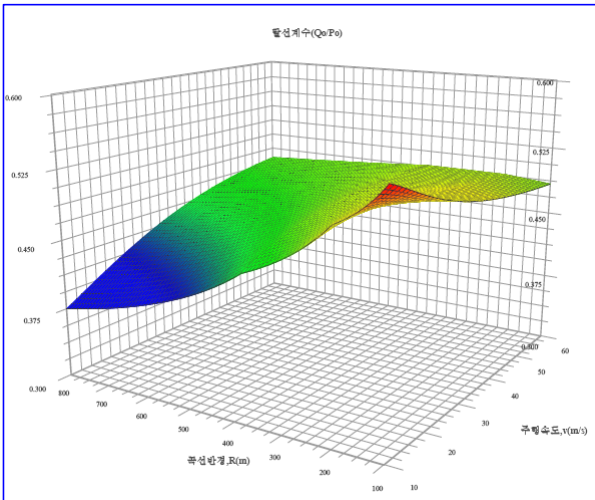
그림 6. 시험 대상 구간의 대차중심간 평면성 틀림 변화

### 3.1 3차원 민감도 해석

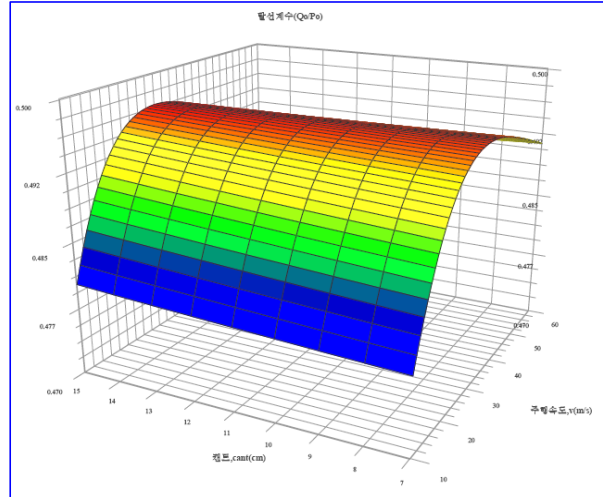
차량 조건과 선로 조건의 변수에 대한 추정탈선계수의 영향을 곡선부 형상과 통과 속도에 따른 민감도 해석을 수행하였다.

**(1) 통과 속도**

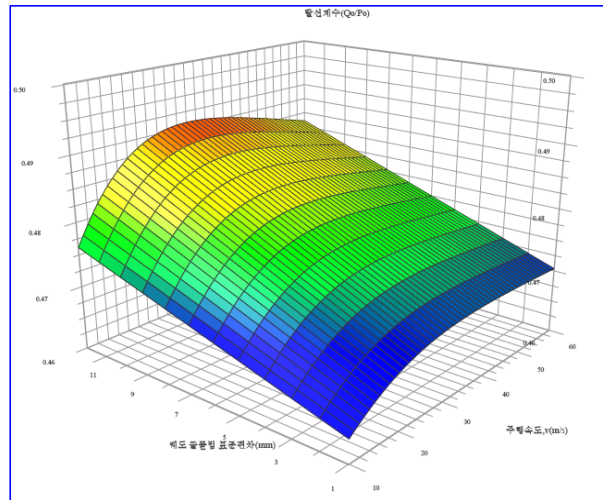
그림 7은 곡선 반경, 캔트, 궤도 줄틀림 표준편차, 내궤측 횡압윤증비, 외궤측 차륜의 정지윤증비의 변화와 곡선 통과 속도의 변화(10 m/s ~ 60 m/s)에 따른 외궤측 추정탈선계수의 민감도 해석을 수행한 결과이다. 그림 7의 (a)에서와 같이 일정 캔트(120mm)에서 곡선 반경의 감소와 통과 속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 통과 속도와 곡선 반경에 대한 민감도가 크게 나타났다. 그림 7의 (b)에서와 같이 일정 곡선 반경(R=300m)에서 캔트의 증가와 통과 속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다. 그림 7의 (c)에서와 같이 일정 곡선 반경(R=300m)과 캔트(120mm)에서 궤도 줄틀림 표준편차와 통과 속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다.



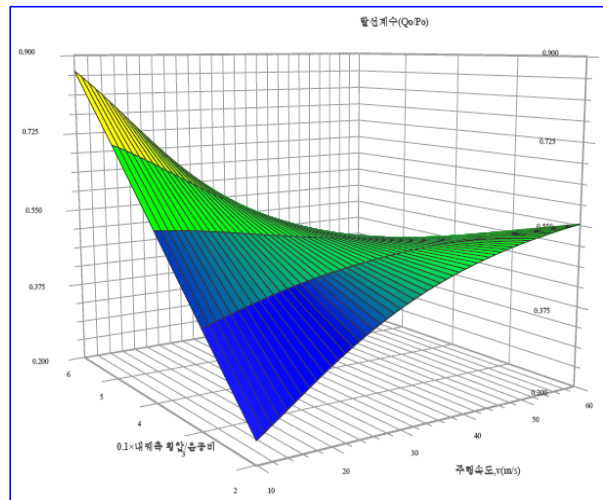
(a) 곡선 통과 속도와 곡선 반경



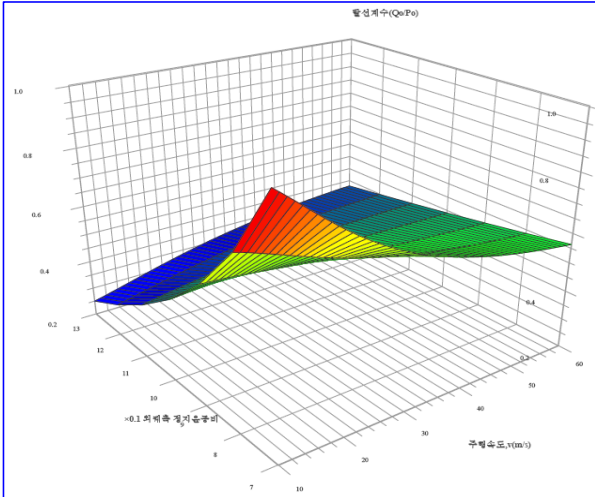
(b) 곡선 통과 속도와 캔트



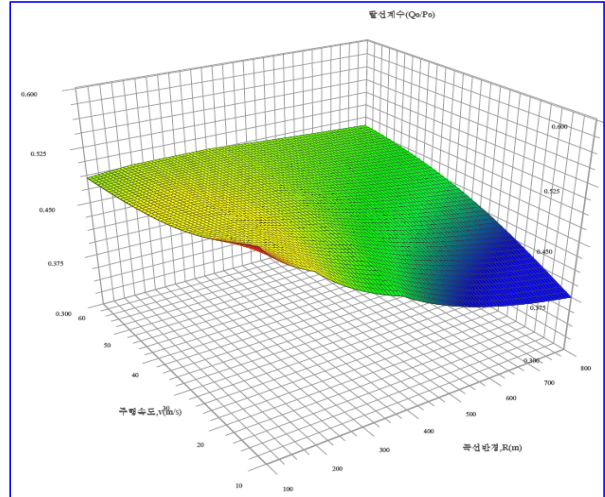
(c) 곡선 통과 속도와 궤도 줄틀림 표준편차



(d) 곡선 통과 속도와 내궤측 횡압윤증비



(e) 곡선 통과 속도 외측차륜 정지윤증비



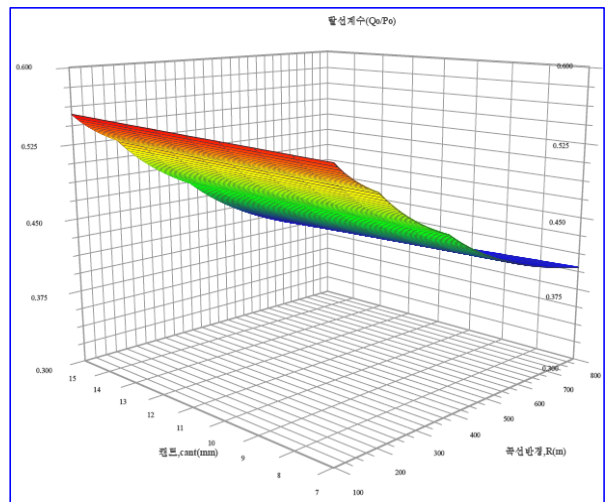
(a) 곡선 반경과 통과 속도

그림 7. 곡선 통과 속도와 각 변수간의 민감도 해석

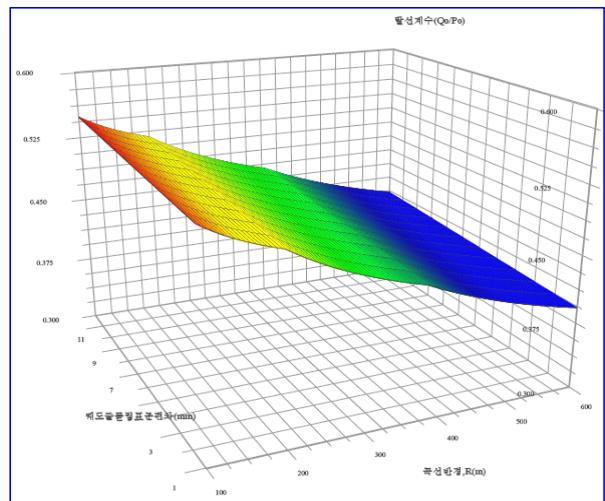
그림 7의 (d)에서와 같이 일정 곡선 반경( $R=300\text{m}$ )과 캔트( $120\text{mm}$ )에서 곡선 반경에 따른 내측 횡압윤증비와 통과 속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 내측 횡압윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다. 그림 7의 (e)에서와 같이 일정 곡선 반경( $R=300\text{m}$ )과 캔트( $120\text{mm}$ )에서 외측차륜의 정지윤증비의 감소와 통과 속도가 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 외측차륜의 정지윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다.

## (2) 곡선 반경

그림 8은 통과 속도, 캔트, 궤도 줄틀림 표준편차, 내측 횡압윤증비, 외측차륜의 정지윤증비의 변화와 곡선 반경의 변화( $R=100\text{m} \sim 800\text{m}$ )에 따른 외측차륜 추정탈선계수의 민감도 해석을 수행한 결과이다. 그림 8의 (a)에서와 같이 일정 캔트( $120\text{mm}$ )에서 통과 속도와 곡선 반경이 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었다. 그림 8의 (b)에서와 같이 일정 통과 속도( $v=14\text{m/s}$ )에서 캔트의 증가와 곡선 반경의 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었다. 그림 8의 (c)에서와 같이 일정 통과 속도( $v=14\text{m/s}$ )과 캔트( $120\text{mm}$ )에서 궤도 줄틀림 표준편차의 증가와 곡선 반경의 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있다.

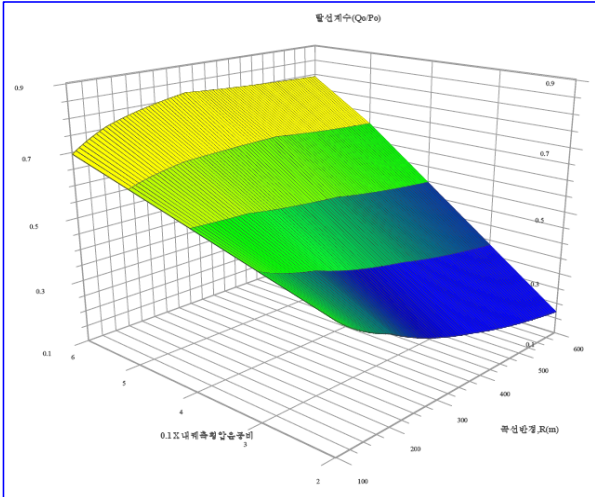


(b) 곡선 반경과 캔트

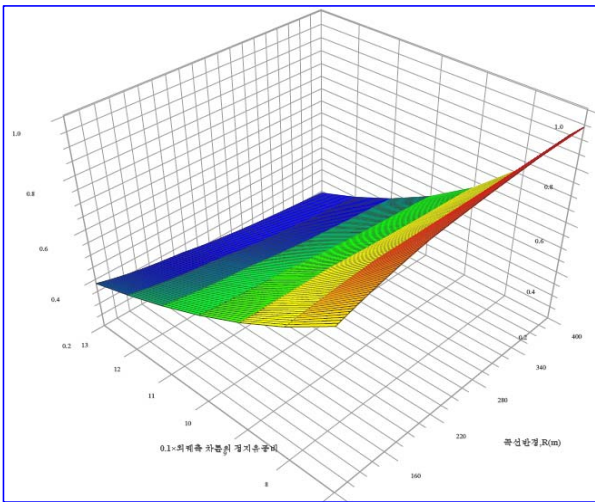


(c) 곡선 반경과 궤도줄틀림 표준편차





(d) 곡선 반경과 내측횡압윤증비



(e) 곡선 반경과 외측차륜 정지윤증비

그림 8. 곡선 반경과 각 변수들의 민감도 해석

그림 8의 (d)에서와 같이 일정 통과 속도( $v=14\text{m/s}$ )과 캔트( $120\text{mm}$ )에서 곡선 반경에 따른 내측 횡압윤증비와 곡선 반경이 감소함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 내측 횡압윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다. 그림 8의 (e)에서와 같이 일정 통과 속도( $v=14\text{m/s}$ )와 캔트( $120\text{mm}$ )에서 외측 차륜의 정지윤증비의 감소와 곡선 반경이 증가함에 따라 추정탈선계수도 증가함을 확인할 수 있었고, 외측 차륜의 정지윤증비에 대한 민감도가 크게 나타났다.

#### 4. 결론

탈선 안전 성능의 향상을 위한 매개변수에 관한 연구를

위해 추정탈선계수에 의한 수치해석을 Visual Fortran을 이용한 수치해석으로 도식화 하였으며, 탈선계수와 관련된 변수들을 차례로 변환시켜 가면서 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과로서, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

#### 4.1 윤증횡압 추정식에 의한 수치해석

(1) 곡선부에서는 통과 속도( $v$ )를 증가시키면 외측 윤증정상분( $\overline{P}_o$ )이 증가하여 곡선부 전향횡압( $\overline{Q}_i$ )은 감소하지만, 원심력 및 공기스프링( $\Delta Q_{AS}$ )과 궤도틀림( $\Delta Q_{AD}$ ) 그리고 이음부충격에 의한 횡압 성분( $\Delta Q_{uspr}$ )이 증가하여 추정탈선계수는 증가한다.

(2) 급곡선부( $R=229\text{m}$ 까지)에서는 통과 속도( $v$ )를 증가시켜도 초기 외측 측의 윤증정상분( $\overline{P}_o$ )의 증가량이 커 추정 탈선계수는 감소한다.

(3) 곡선 반경( $R$ )을 증가시키면 원심력 및 공기스프링에 의한 횡압( $\Delta Q_{AS}$ )이 크게 감소하고 이음부 횡압변동분( $\Delta Q_{uspr}$ )이 감소하여 추정탈선계수는 감소한다.

(4) 캔트(cant) 초과량이 증가하면 원심력 및 공기스프링에 의한 횡압( $\Delta Q_{AS}$ )은 감소하고 외측 윤증정상분( $\overline{P}_o$ )도 감소하지만 윤증정상분( $\overline{P}_o$ )이 상대적으로 크게 감소하여 결과적으로 탈선계수는 증가한다.

(5) 궤도 줄틀림 표준편차( $\sigma_z$ )의 변화에서 줄틀림 표준 편차를 증가시킬 경우 줄틀림에 의한 횡압( $\Delta Q_{AD}$ )의 증가로 추정탈선계수는 증가한다.

(6) 내측 횡압윤증비( $\kappa$ )를 증가시킬 경우 곡선부 전향횡압( $\overline{Q}_i$ )이 급격히 증가하여 추정탈선계수는 급격히 증가한다.

(7) 외측 차륜의 정지윤증비( $\gamma$ )를 증가시키면 외측 윤증정상분( $\overline{P}_o$ )의 급격한 증가로 추정탈선계수는 감소하였으며, 민감도가 크게 나타났다.

#### 4.2 추정 탈선계수에 의한 실제노선 평가

실제 선로 조건(길동→강동, 곡선 반경, 캔트, 완화 곡선) 및 열차 운행 조건(곡선 반경에 대한 제한속도)을 입

력 변수로 하여도 최대 추정탈선계수가 0.49로서, 한계탈선 계수 0.8을 크게 밑돌아 안전한 것으로 평가되었다.

### 참 고 문 헌

- (1) 鐵道總研報告, Vol.9, No.3, 1995. 8, “탈선에 대한 안전성평가지표의 연구”pp. 1~9.
- (2) 鐵道總研報告, Vol.10, No.3, 1996. 3, “차량의 탈선 메커니즘” pp. 2~10.
- (3) 鐵道總研報告, Vol.15, No.4, 2001. 4. 2004. 8, "윤중, 횡압추정식에 의한 탈선에 대한 안전성평가", pp. 2~7.
- (4) 鐵道總研報告, Vol.18, No.8. 2004. 8, "급곡선 저속주행시의 타고오름 탈선에 대한 안전성평가수법“ , pp. 1~9.
- (5) 서울도시철도공사, 1995, “서울특별시지하철5호선 전차 정비 지침서”