

곡선부에서 탈선계수에 영향을 미치는 매개변수들에 대한 연구

A Study on the Parameters Effecting on the Derailment Factor of Running Train on the Curved Track

송봉환* 양신추** 강윤석***

Song, Bong Hwan · Yang, Shin Chu · Kang, Yun Suk

ABSTRACT

In this paper, Analysis of parameters effecting on the derailment factor was conducted in order to deduce technical requisites have to be reflected in design of Track and rolling-stocks because it is important to grasp the risk of derailment quantitatively. And then go far toward becoming practical study with that select two section of sharp curved track of actual train in service, incheon Metro Line 1 and make field research in condition of vehicles and track and analysis

As a result of parameter study, the following conclusions were obtained.

The radius of curve and Cant is in inverse proportion to the derailment factor, but as train operation velocity, standard deviation of alignment irregularity and the ratio lateral force : wheel load of the inside track increase, the derailment factor rise.

In the investigation for the derailment safety of incheon Metro Line 1, the derailment factor was below 0.43 in both section R=200 and R=300, so that it proved safe compare with allowance limits 0.8, but it appeared that risk of the derailment in second transition curve is the highest among the entire curve.

1. 서론

철도 차량의 주행안전성에 영향을 미치는 요인으로서의 차량 측면에서 정지윤증비, 1, 2차 현수 장치의 스프링 경수, 차량의 유효 중심높이 등이 있으며, 궤도측에서는 곡선반경, 캔트(Cant), 궤도 틀림(줄틀림, 면틀림, 평면성틀림) 등이 영향을 줄 수 있다. 그 밖에 주행속도나 차량/레일 사이의 마찰계수도 주행안전성에 크게 영향을 미치는 요인이라 할 수 있다.

철도 수요 증가에 의한 새로운 노선의 건설, 기존선의 속도향상 등이 활발히 추진되고 있는 가운데 가장 중요하고도 기초적 바탕이 될 수 있는 철도 차량의 주행안전성에 대한 연구와 설계기준의 정립, 규격, 기준의 제정 등, 그 필요성이 절실히 요구되고 있다.

따라서 향후 열차의 주행안전성 확보를 위해서 탈선의 위험도를 정량적으로 파악하는 것이 중요하다고 판단하고, 본 연구에서는 주행안전성을 위한 궤도 및 차량의 설계시에 반영되어야 할 기술적 요인들을 도출하기 위하여 탈선에 영향을 미치는 매개변수들에 대한 연구를 수행하였다.

탈선의 위험도가 높은 곡선부에서 주행하는 열차의 탈선계수를 결정함에 있어 윤중, 횡압의 추정식에 관한 연구를 통해서, 그에 영향을 주는 각각의 매개변수들의 상관관계에 대한 연구를 수행하기 위해 실제 운행하고 있는 인천지하철 1호선의 급곡선부 2개구간을 선정하여 차량과 선로조건 등을 현장조사하고 해석해 봄으로써 보다 실제적인 해석이 될 수 있도록 하였다.

* 인천지하철공사 · 서울산업대학교 철도건설대학원 공학석사

** 한국철도기술연구원 · 책임연구원 · 공학박사

*** 한국철도기술연구원 · 선임연구원 · 공학석사

2. 탈선 안전성 평가 기본 이론

2.1 유종의 추정식

2.1.1 원심력에 의한 유종의 증감^{B14)}

곡선부를 주행하는 열차는 곡선반경, 켈트 및 속도에 의한 원심력이 곡선 외측으로 작용하며, 이에 의해 내·외측 레일의 정상적인 유종의 증감이 생긴다. 이와 같은 원심력에 의한 유종증감의 메카니즘을 고려한 내·외측 레일의 유종 정상분의 추정식은 그림 1에서 보는 바와 같이 레일과 차륜의 접촉 지점을 중심으로 한 모멘트값의 합으로부터 구할 수 있다. 이때 차체 경사에 의한 중심이동에 의한 중력성분의 모멘트 팔이 변화하게 되는데, 차체경사량은 초과원심력(켈트부족량 Cd)에 비례하기 때문에 차량중심고 H_G 가 유효중심고 H_G^* 까지 상승한 경우와 동가로 간주된다. 따라서 곡선부에서 유종의 정상분은 다음 식(1), (2)과 같이 산사하게 나타낼 수 있다.

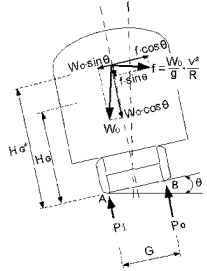


그림 1 곡선부에서 유종의 변화

$$\therefore \overline{P}_o = \frac{W_0}{2} \left[\left\{ \gamma + \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \frac{C}{G} \right\} + \frac{H_G^*}{G/2} \left\{ \frac{v^2}{g \cdot R} - \frac{C}{G} \right\} \right] \quad (1)$$

$$\therefore \overline{P}_i = \frac{W_0}{2} \left[\left\{ (2-\gamma) + \frac{v^2}{g \cdot R} \cdot \frac{C}{G} \right\} - \frac{H_G^*}{G/2} \left\{ \frac{v^2}{g \cdot R} - \frac{C}{G} \right\} \right] \quad (2)$$

\overline{P}_o : 외측 레일 유종정상분(kN)

\overline{P}_i : 내측 레일 유종정상분(kN)

v : 외측 레일 차륜의 정지유종비

W_0 : 정적중량(kN)

v : 주행속도(m/s)

G : 궤간(m)

C : 켈트(m)

R : 곡선반경(m)

g : 중력가속도(9.8m/s²)

H_G^* : 차량유효중심높이(m)(미진자차량의 경우, 실제차량 중심 높이의 1.25배로 한다)

2.1.2 선로면의 비틀어짐(평면성 틀림)에 의한 유종의 증감⁶⁾

완화곡선부에서는 켈트제감에 따른 선로면의 비틀어짐에 의해, 1차 현수장치 스프링 및 2차 현수장치 스프링의 신축에 의한 유종증감이 생긴다. 특히 출구측 완화곡선에서는 1차 현수장치 스프링의 신축에 의해 대차전축의 외측 레일 유종이 감소하며, 2차 현수장치 스프링의 신축에 의해 앞쪽 대차의 외측 레일 유종이 감소하게 된다. 동시에, 곡부적인 선로의 평면성 틀림에 의한 스프링의 신축에 의해서도 유종의 증감이 생긴다. 이 선로면의 굴절(평면성틀림)에 의한 유종 증감의 메카니즘을 고려한 정적 유종 증감분의 추정식은 다음식과 같다.

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{8b^2} \left\{ \frac{\Delta t_c}{2} \cdot K_{\phi} + \Delta t_a \cdot k'_{41} \right\} \quad (3)$$

$$K_{\phi} = \frac{1}{\frac{1}{4k_1 b_1^2} + \frac{1}{2k_2 b_2^2}}, \quad k'_{41} = 2k_1 b_1^2 \quad (4)$$

$$\Delta t_c = \frac{2c_{TC}}{a_{TC}} + t_c, \quad \Delta t_a = \frac{2a_a}{a_{TC}} + t_a \quad (5)$$

$\overline{\Delta P}$: 평면성 굴절에 의한 정적 유종 감소분(kN)

K_{ϕ} : 종합회전스프링경수(kN · m/rad)

k'_{41} : 대차의 종합회전스프링 경수(kN · m/rad)

$2b$: 좌우의 레일·차륜 접촉점간 간격(m)

$2b_1$: 좌우 1차 현수장치 스프링 간격(m)

$2b_2$: 좌우 2차 현수장치 스프링 간격(m)

k_1 : 상하 1차 현수장치 스프링 경수/1축당(kN/m)

Δt_c : 대차중심간 평면성 틀림(m)

k_2 : 상하 2차 현수장치 스프링경수/대차편축당(kN/m)

Δt_a : 축거 평면성 틀림(m)

a_{TC} : 켈트제감배율

$2a$: 축간거리

t_c : 켈트제감분율 제외된 대차중심간 평면성 틀림(m)

$2c$: 대차중심간 거리(m)

t_a : 켈트제감분율 제외된 축거 평면성 틀림(m)

2.1.3 공기 스프링의 비틀림(수평방향 변형)에 의한 유종의 증가¹⁴⁾¹⁰⁾

열차가 곡선부를 통과 할 때에 하부의 대차는 그림 2에서 보는 바와 같이 선로의 곡선부를 따라 돌아가지만 상부의 차체는 직선방향으로 향하고 있어 차체와 대차간의 연결 역할을 하는 2차 현수장치인 공기스프링의 비틀림이 생기고 그 만큼의 수평 방향으로의 상대회전변위가 Δx 만큼 발생하게 되어 그 반력 F_1 이 유축 횡압으로서 선로에 작용하게 된다.

먼저 곡선부에서 공기스프링의 수평 방향 변형에 의하여 발생하는 수평하중 F' 는 2차 현수장치 스프링 전후강성 k (kN/m)와 변위 Δx 의 곱으로서 구할 수 있으며, 다음으로 대차에 발생하는 모멘트를 구하여, 그 모멘트 관계식으로부터 외측 레일에 작용하는 횡압 F_1 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F' = k \times b_1 \tan \phi - kb_2 \frac{C}{R}$$

$$M = 2 \times F' \times b_2 = \frac{2k b_2^2 C}{R} = a(F_1 + F_2)$$

$$F_1 = \beta \times \frac{2k b_2^2 C}{aR} \quad (6)$$

여기서 β 는 유축횡압 F_1 의 보정계수로서, 많은 차량동역학적 시뮬레이션에 의하여만 주로 곡선 반경 및 내측 레일의 횡압유종비에 의존하며, 두 조건에 따라 표1과 같이 주어진다.

표 1 유축횡압 F_1 의 보정계수 β

·내측측 횡압유종비 $x \leq 0.50$ 의 경우	·내측측횡압유종비 $x > 0.50$ 의 경우
$\beta = 0.7 \quad (R \leq 200)$	$\beta = 0.7 \quad (R \leq 160)$
$\beta = 0.7 \times \frac{(380 - R)}{180}$ $(200 \leq R \leq 1000)$	$\beta = 0.7 \times \frac{(310 - R)}{150}$ $(160 \leq R \leq 1000)$
$\beta = -2.4 \quad (1000 \leq R)$	$\beta = -3.2 \quad (1000 \leq R)$

곡선부에서 F_1 과 같은 공기 스프링의 비틀어짐(수평방향 변형)에 의한 횡압이 발생하면 상하방향에는 그림3과 같은 유종 성분의 반력이 발생한다.

2.1.4 내측·외측 레일 유종의 추정식

원심력, 선로면의 비틀어짐(평면성 틀림) 및 공기 스프링의 비틀림(수평방향 변형)의 세가지 요소를 조합하여 다음과 같은 내측 및 외측 레일의 유종의 추정식을 구할 수 있다.

$$P_i = \left\{ \overline{P_i} + \overline{\Delta P} - F_1 \times \frac{\eta}{\tan 60^\circ} \right\} \quad (7)$$

$$P_o = \left\{ \overline{P_o} - \overline{\Delta P} + F_1 \times \frac{\eta}{\tan 60^\circ} \right\} \quad (8)$$

$\overline{P_o}$: 외측 레일의 유종(kN)

$\overline{P_i}$: 내측 레일의 유종(kN)

$\overline{\Delta P}$: 외측 레일의 유종정상분(kN)

$\overline{\Delta P}$: 내측 레일의 유종정상분(kN)

$\overline{\Delta P}$: 평면성 틀림에 의한 정적 유종감소(kN)

F_1 : 공기스프링의 비틀림에 의한 유축횡압(kN)

η : F_1 의 유종성분의 보정계수로서, β 에 따라 다음과 같이 결정된다

$$\eta = 1 \quad (\beta > 0), \quad \eta = 0 \quad (\beta \leq 0)$$

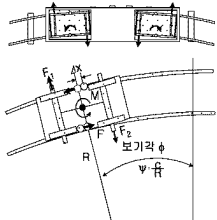


그림 2 곡선부 공기스프링의 비틀어짐에 의한 횡압의 메카니즘

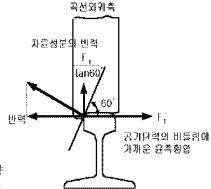


그림 3 공기스프링의 비틀어짐에 의한 유종 증가의 메카니즘

2.2 횡압의 추정식

2.2.1 안쪽 레일의 마찰력에 의한 곡선전향횡압^[9]

곡선통과시에 대차전축의 외측 레일의 차륜은 그림 4와 같이 플랜지가 레일에 접촉함에 따라 안쪽 차륜은 레일 상면을 미끄러지면서 내측으로 이동하면서 수평하게 되고, 따라서 내측 레일쪽에 마찰력(윤증×마찰계수)이 작용한다. 이에 대한 반력으로서 외측 레일쪽에는 횡압 즉 곡선전향횡압이 작용한다.

내측 레일쪽 차륜/레일간의 마찰계수(μ 내측 레일쪽 횡압윤증비)가 같수록 외측 레일쪽의 곡선전향횡압은 커진다. 이 마찰력(곡선전향횡압)에 상당하는 내측레일쪽 횡압정상분은 다음 식(9)과 같다.

$$\overline{Q}_i = xP_i \quad (9)$$

내측 레일쪽 횡압윤증비 x 는 시뮬레이션에 의한 계산결과 및 실측데이터를 기초로 하여 차륜당 변형상별(기본과 원호 또는 수정원호)에 따라 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.^[13]

- ① 곡선전향성능 : 보통
 $x=175 \times (1/R)$ ($R > 500m$)
 $x=0.35$ ($R \leq 500m$)
- ② 곡선전향성능 : 양호
 $x=80 \times (1/R)$ ($R > 400m$)
 $x=0.20$ ($R \leq 400m$)
- ③ 조타대차
 $x=30 \times (1/R)$ ($R > 300m$)
 $x=0.10$ ($R \leq 300m$)

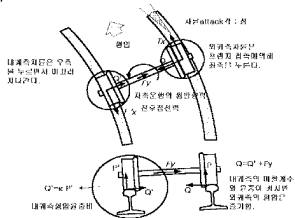


그림 4 곡선전향횡압의 발생 메카니즘

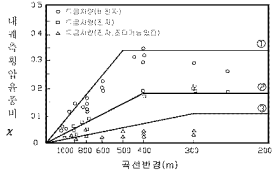


그림 5 내측레일쪽 횡압/윤증비 x 와 곡선반경의 관계

2.2.2 원심력, 공기스프링의 비틀림에 의한 윤축횡압^[10]

곡선통과시의 차량에는 곡선반경, 켈트 및 속도에 의존한 원심력이 작용하여, 이것에 의해 정상적인 윤축횡압이 발생하는데, 이는 2.1.1절에서 설명한 바와 같이 경사진 차체에 대한 수평방향 성분인 $\left(\frac{W_0}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos \theta - W_0 \cdot \sin \theta \right)$ 으로 나타난다. 주행속도가 균형속도 이하(켈트초과)의 경우에는 외측 레일쪽에 대해서는 마이너스 횡압이 되어 내측 레일쪽으로 횡압이 작용하며, 균형속도 이상(켈트 부족)의 경우에는 플러스의 횡압이 된다. 또한 앞서 2.1.3절에서 언급한 바와 같이 곡선 통과시의 차체/대차간의 상대회전변위(수평방향)에 의해 2차 현수장치인 공기 스프링에 비틀림이 생기면, 그 반력 F_1 이 윤축횡압으로 발생한다.

따라서 원심력, 공기스프링의 비틀림을 고려한 횡압정상분은 다음 식(10)으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta Q_{AS} = & W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + F_1 \\ & - W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{aR} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 ΔQ_{AS} 는 윤축횡압정상분이다.

2.2.3 캐드 뒤틀림·이음부충격에 의한 횡압변동분

캐드틀림, 특히 줄틀림이 있는 경우에는 차량동요에 의한 관성력에 의하여 윤축횡압의 변동분이 발생한다. 또 레일이음부에서는 충격적인 횡압의 변동분이 발생되며, 이것은 속도가 높을수록 커진다. 이상에 따른 윤축횡압변동분 성분들은 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.^[10]

ΔQ_{AD} : 궤도틀림에 의한 유속횡압변동분(kN)

σ_Z : 궤도줄뜸률 표준편차(mm)

k_Q : 유속횡압변동계수 (1/mm/(km/h))

ΔQ_{umpr} : 이음부의 횡압변동분 (kN)

ε : 이음부의 횡압변동분의 유효분 (%)

$$\Delta Q_{AD} = 3W_0 k_Q \sigma_Z V \quad (11)$$

$$\Delta Q_{umpr} = \left(\frac{\varepsilon}{100} \right) \times \left\{ \frac{2500}{R} + 4 \right\} \frac{V}{100} \quad (12)$$

2.2.4 외측 레일 횡압의 추정식^[3,4]

내측 레일쪽의 마찰력에 의한 곡선전향횡압, 원심력 및 공기 스프링의 뒤뜰림에 의한 유속횡압, 궤도틀림(줄뜸률) 및 이음부충격에 의한 유속횡압변동분 등을 고려하여 외측 레일의 횡압은 다음식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_o = \overline{Q}_i + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + \Delta Q_{umpr} \quad (13)$$

Q_o : 외측추횡압(kN)

ΔQ_{AS} : 유속횡압정상분 (kN)

ΔQ_{umpr} : 레일이음부 횡압변동분(kN)

\overline{Q}_i : 내측추횡압정상분 (kN)

ΔQ_{AD} : 궤도틀림에 의한 유속횡압변동분(kN)

3. 탈선안전기준^[6,7,11]

철도차량의 주행안전성 평가와 관련된 국내 규격은 한국철도기술연구원에서 제시한 평가방법을 비롯하여 철도청 및 철도운영기관에서 자체적으로 제정하여 적용하고 있으며 권고부령으로 정한 도시철도차량 안전기준에 관한 규격에서 그 기준을 제시하고 있지만 대부분의 내용은 한국철도기술연구원에서 제시한 방법과 같다.

관련된 국외의 규격으로는 유럽 철도차량 통독성시험방법에 대하여 언급하고 있는 UIC Code 518이 있으며 안전한도, 궤도의 비로, 승차감의 한도에 대해서 기준을 정해놓고 있으며, 안전성 관련 부분에서 횡압/윤증비율 Y/Q ratio 0.8로 규정하고 있다. 본 연구에서는 탈선계수의 한계 허용치로서 비교적 엄격한 기준인 0.8을 적용하였다.

4. 탈선계수에 영향을 미치는 매개변수 연구

탈선계수를 추정하는 매커니즘을 간단하게 정리해 보면 위의 그림 6과 같이 곡선부류 주행하는 열차의 자중이 열차속도에 의한 원심력과 합력으로 2차 현수장치 스프링을 통해서 대차로 전달되고, 다시 1차 현수장치 스프링을 통해서 4개의 차축, 8개의 차륜으로 레일 위에 전달이 되면 이를 지지하는 궤도의 조건, 즉 곡선부 통과속도에 대한 캔트와 곡선반경등의 조건과 레일 면의 상태, 궤도틀림과 차량의 통독성 영향 등을 고려하여 열차의 탈선에 대한 안전성을 판단하게 된다.

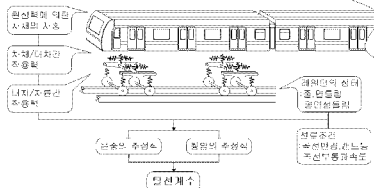


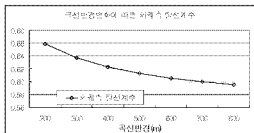
그림 6 탈선계수 추정 매커니즘 매개변수^[6]

인원차하철에서 운영되고 있는 도시철도 차량을 기본으로 하여 해석에 사용되는데, 차량축 및 궤도축의 매개변수(parameter)의 기본 제원은 다음 표 3과 같으며 다음의 매개변수 연구(parameter study)를 위하여 특정 매개변수를 변화시키면서 탈선의 영향을 검토하는 경우 타 매개변수는 표 3의 기본 제원값과 동일한 값으로 변화가 없는 것으로 가정하였다.

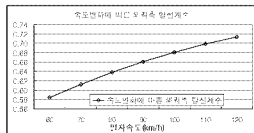
표 3 탈선계수 추정을 위한 기본 제원

차량축 기본조건 매개변수	단위	수치	궤도축 기본조건 매개변수	단위	수치
정적축중	kN	85	축거 평면상틀림	mm	5m마다 측정
의측레일의 정지윤증비	-	1.0	대차중심간 평면상틀림	mm	
차량윤증심심높이	m	1.76	곡선반경	m	300
축거	m	2.1	궤트	mm	140
대차간중심거리	m	12.4	궤트체감배율	-	650
좌우 1차원수장치 스프링 간격	m	1.97	궤간	m	1.435
좌우 2차원수장치 스프링 간격	m	1.95	출몰림의 표준편차	mm	1.5
좌우 집중침 간격	m	1.5	윤속회양변동계수	1/mv/(km/h)	0.00015
상하 1차원수장치 스프링정수 /1축당	kN/m	1060	주행속도	m/s	12.5
상하 2차원수장치 스프링정수 /대차편축당	kN/m	284			
2차 원수장치의 진폭강성 /대차편축당	kN/m	71			
차륜롤오프각	°	60			
차륜답면형상	-	기본			

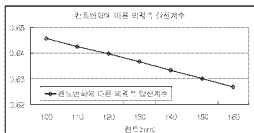
4.2 매개변수 연구



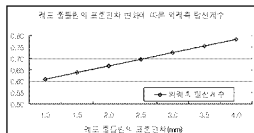
(a)곡선반경변화에 따른 탈선계수



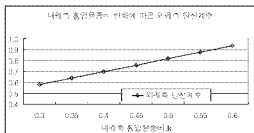
(b)속도변화에 따른 탈선계수



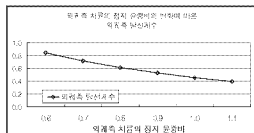
(c)궤트변화에 따른 탈선계수



(d)궤도출몰림의 표준편차 변화에 따른 탈선계수



(e)내궤측 횡양윤증비 변화에 따른 탈선계수



(f)정지윤증비의 변화에 따른 탈선계수

그림 7 각 매개변수의 변화에 따른 탈선계수의 영향

앞에서 소개된 탈선 안전성 평가기본이론을 토대로 하여 매개변수에 따른 해석을 수행하였다. 그 결과

곡선반경의 변화에 따른 탈선계수의 영향에서는 곡선반경을 R 200m 에서부터 R 800m까지 변화시켜 본 결과 그림 7(a)에서와 같이 곡선반경이 커지면서 탈선계수는 감소하는 것으로 나타났다. 곡선반경이 작은 R 200m에서 R 500m까지의 변화에서 탈선계수는 R 600m이후보다 급격하게 감소하였다. R 200m에서 R 400m까지 5.5%가 감소하였으며 R 400m에서 R 600m은 2.8%정도 감소, R 600m에서 R 800m는 1.6%정도 감소하여 곡선반경이 큰 구간(R 600m~R 800m)보다 작은 구간(R 200m~R 400m)에서 탈선계수의 변화가 더 컸음을 확인하였다. 전체적으로 R 800m에 비해 R 200m는 탈선계수가 약 9.9%증가하는 것으로 나타났다.

속도 변화에 대해서는 그림 7(b)에서 보이는 바와 같이 열차속도를 60km/h에서 120km/h까지 변화 시켰을 때 탈선계수는 0.58에서 0.71까지 22.4% 증가하여 곡선반경의 변화에 의한 영향보다 열차속도에 의한 탈선계수의 영향이 더 큰 것을 알 수 있었다. 처음 60km/h에서 70km/h로 열차속도를 증가시켰을 때 탈선계수는 4.7% 증가 했으며 점차 증가폭이 작아져 110km/h에서 120km/h로 증가시켰을 때는 2.2%로 비교적 증가율이 적었다.

캠트의 영향으로는 그림 7(c)에서 보이는 바와 같이 캠트를 100mm에서 160mm까지 변화 시켜 보았을 때 탈선계수는 약 0.65에서 0.62까지 4.6% 감소하였다. 이는 캠트가 증가하면서 곡선외측의 율pond과 횡압이 함께 감소하여 비교적 탈선계수의 감소가 작았다고 판단된다.

케도 줄틀림의 표준편차 변화에 대한 탈선계수의 영향은 곡선 외측측 운동에 대한 변화는 없고 케도 줄틀림에 의한 횡압의 변동분에 의해서 탈선계수가 증가하였다. 그림 7(d)에서 줄틀림 표준편차가 1.0mm에서 4.0mm까지 변화 할 때 탈선계수는 0.6에서 탈선 한계 허용치인 0.8까지 근접했으며, 줄틀림 표준편차를 0.5mm씩 증가시킬 때마다 탈선계수는 약 5.0%씩 비교적 일정한 비율로 증가하여 선형비례하여 증가하는 것을 관찰 할 수 있었다. 따라서 탈선계수에 미치는 케도 줄틀림의 영향이 매우 중요함을 알 수 있다.

위의 4개 매개변수 연구에서 표3의 기본제원을 고정하여 각각의 매개변수씩 변화시켜 해석하였다. 그 결과곡선반경의 변화나 캠트변화에 의한 탈선계수보다는 오히려 속도변화에 따른 탈선계수와 케도줄틀림의 표준편차 변화에 따른 탈선계수에 더 민감한 것으로 나타나 케도 줄틀림의 표준편차 관리가 매우 중요한 것으로 생각된다.

탈선계수에 영향을 미치는 내계측 횡압윤증비는 2.21점에서 설명한 바와 같이 그림 5의 값으로 곡선반경, 차량의 종류 등과 관련하여 결정하는데, 그림 7(e)에서 보이는 것 처럼 내계측 횡압윤증비의 영향으로 인한 탈선계수의 증가가 큰 것으로 나타나 횡압윤증비가 0.5일 때 탈선계수는 한계 허용치인 0.8을 넘는 것을 볼 수 있다. 외계측 차륜 정지윤증비는 차량측과 관련된 매개변수로서 대개 1.0을 기준으로 사용하며, 그림 7(f)에서와 같이 외측 차륜의 정지윤증비를 0.6에서 1.1까지 변화시켰을 때 탈선계수는 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 실제노선에서의 탈선안전성평가

5.1 검토 노선의 현황^[3]

본 연구에서의 실제 평가를 위한 검토대상은 현재 운행중인 노선으로 인천 지하철 1호선을 선정하였다. 검토대상 구간은 도심하부를 통과하는 도시철도이기 때문에 급곡선 구간이 많으며, 궤도구조는 60(kg/m) 중량과 레일을 분기부를 제외한 전구간 장대화로 시공하여 이음부에 의한 충격율이 거의 없다고 할 수 있다. 또한 도상구조는 L.V.T 콘크리트 궤도로서 차량 중량에 비해 비교적 강한 강성구조를 선택하였기 때문에 궤도틀림의 영향이 작았다.

5.2 검토 대상 구간의 기본 조건

탈선 안전성 분석의 대상 구간은 인천지하철 1호선의 노선중 최급곡선부인 R 200구간과, R 300구간을 선정하였으며, 대상구간의 궤도측 기본 조건은 표 4와 같다.

	195.565	300.721
곡선반경(m)	195.565	300.721
곡선연장(m)	330.935	583.838
캠트(mm)	152	120
완화곡선연장(m)	97	96
완화곡선제감배율	638	800
궤도줄틀림의표준편차(mm)	1.6	2.0
열차 통과속도(km/h)	50	55

5.3 탈선 안전성 평가

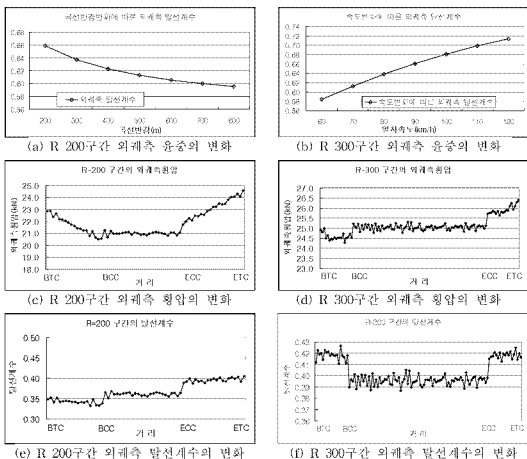


그림 8 궤도대상구간의 탈선안전성 평가

실제 노선의 검토에서 외측축 윤증은 그림 8(a), (b)에서 나타난 바와 같이 원곡선의 시작점 완화곡선구간(BTC~BCC)에서 원곡선구간보다 R 200구간에서 6.0%, R 300구간에서는 3.9%정도 큰 값을 보였다. 원곡선이 끝나는 완화곡선구간(ECC~ETC)에서는 원곡선구간보다 R 200구간에서 3.4%, R 300구간에서는 3.2%정도 작은 값을 보였는데, 이는 구조적인 평면성틀림의 영향으로 전부의 완화곡선구간에서는 외측레일의 캔트 증가에 의해서 외측 윤증이 증가하고, 후부의 완화곡선구간에서는 다시 캔트가 점차 감소하여 외측 윤증이 감소하였기 때문으로 판단된다. 그림 8(c), (d)에서는 외측축 횡압이 이와 반대의 변화를 나타내고 있는데, 외측축 윤증과 반비례하는 내측축 윤증의 마찰력에 의한 곡선전향횡압의 영향임을 알 수 있다.

또한 원곡선구간(BCC~ECC)에서는 궤도틀림(중틀림, 평면성틀림)에 의한 변화를 제외하고, 다른 매개변수의 변화가 크지 않아 윤증, 횡압 모두 비교적 변화의 폭이 작았다.

탈선 안전성을 검토한 결과, R 200구간, R 300구간 모두 탈선계수가 허용치 한계 0.8보다 작은 0.43이하의 값으로 매우 안전한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 곡선 전체구간중 원곡선 다음에 시작되는 완화곡선구간(ECC~ETC)에서는 R 200구간에서 원곡선구간의 평균 탈선계수가 0.36인데 비해 0.43까지 나와서 19.5%정도, R 300구간에서는 7.6%정도 탈선위험성이 높게 나타나 이 부분의 궤도틀림 관리등의 주의가 필요하다고 판단된다.

6. 결론

곡선부를 수행하는 철도 차량의 주행안전성 평가를 위하여 탈선계수와 관련된 각각의 매개변수들을 차례로 변화시켜 봄으로서 다음과 같은 결론은 얻었다.

곡선반경이 작아 질수록 탈선계수는 증가하였으며, 열차속도가 증가하면 탈선계수 역시 증가함을 보였다. 이는 열차속도가 증가 하면서 휨성력에 의한 횡압의 증가 때문으로 판단된다. 또한 켈트가 증가하면 탈선계수는 감소하였다. 그리고 줄불림의 표준편차가 증가 함에 따라 탈선계수도 증가하는 것을 알 수 있었다. 내궤측 횡압윤증비의 증가에 따라서도 탈선계수 역시 증가하였는데, 내궤측 횡압윤증비가 0.5를 넘으면 탈선계수는 허용치0.8을 초과하는 것을 알 수 있었다.

실제 노선에서의 탈선 안전성 평가결과에서는 R 200, R 300구간 모두 탈선계수가 0.43을 넘지 않아 모두 안전한 것으로 나타났다.

켈트제감에 의한 구조적 평면성 굴절에 의해서 곡선 시작부 완화곡선(BTC~BCC)에서는 외궤측 윤증은 증가, 외궤측 횡압은 감소하였으며 반대로 곡선 종점부 완화곡선(ECC~ETC)에서는 외궤측 레일의 윤증이 감소하고, 외궤측 횡압은 증가하여 곡선 전체구간 중 탈선의 위험이 가장 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 최성규외(1999) 표준전동차 주행안전성 평가연구보고서, 한국철도기술연구원.
- [2] 서사범(2001), 선로공학, 열거안, pp313-317, pp319-322
- [3] 양신추(2002). "장대레일 화차의 분기부 및 곡선구간 통과시 추가횡압발생 관한 연구" 한국철도학회 논문발표집, 한국철도기술연구원
- [4] 오지택외(2000), 열차주행안전성 향상을 위한 탈선계수평가에 대한 연구, 한국철도학회 2000년 춘계 학술대회 논문집, pp.210-217
- [5] 권석진(2002), 허비아선 탈선사고의 원인과 대책, 한국철도기술지, Vol.35
- [6] 철도차량의 주행안전성 평가방법(1999. 07.-2000. 01), 산업기술시험원.
- [7] 도서철도 차량 안전 기준에 관한 규칙(2000), 건설교통부.
- [8] 임철시, 지하철1호선 궤도설시보고서(1995).
- [9] 鐵道總研報告(2001), 輪重, 橫壓推定式에 의한 탈선에 대한 안전성평가, Vol.15, No.4.
- [10] 社團法人 日本鐵道施設協會(1997), 新しい線路, 軌道の構造と管理篇.
- [11] 鐵道總研報告(1996), 車輛の脱線メカニズム, Vol.10, No.3.
- [12] 스기야마다케시의(1996), 철도차량과 설계기술, 機電研究社, pp.67-69
- [13] 久保田伸(1999), 철도차량레드북, 機電研究社, pp.9-10, 367-369
- [14] C. Esveld(2001), Modern Railway Track, MRT-productions, zaltbommel, pp76-79