

틸팅차량의 기존선 곡선부 주행안정성 평가

Evaluation of Running Stability of Tilting Trains in Conventional Curved Track

엄기영¹ · 엄주환² · 유영화² · 최정호³

Ki-Young Eum · Ju-Hwan Um · Young-Hwa You · Jung-Ho Choi

Abstract

The investigation of running stability of the train for curved track is necessary in view of preventing the train from derailment caused by unbalanced forces transferred from the wheel and guaranteeing moderate level of running safety in curve sections. This paper carried out an analysis of running stability of tilting trains in conventional line which the test operation of tilting trains under development are scheduled. For this purpose, the wheel load and lateral pressure to the rail are evaluated. The criteria for the calculated wheel load and derailment coefficient are compared to the design criteria for running stability. It is founded that the running stability of tilting trains for curved track is guaranteed to have sufficient safety and the train speed in curve is governed by the geometric lay out of track rather than the criteria for running stability.

Keywords : Running Stability(주행안정성), Wheel Load(윤중), Lateral Pressure(횡압), Derailment Coefficient(탈선계수)

1. 서론

기존선의 속도향상을 위해서 개발되는 틸팅열차는 기존 열차에 비하여 승차감의 저하 없이 곡선부를 더욱 빠르게 주행할 수 있기 때문에 전체 운행시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다[1]. 그러나 틸팅열차는 기존열차와는 다른 특성이 있기 때문에 이로 인한 주행특성이 기존열차와는 다르다.

일반적으로 열차의 주행으로 인하여 궤도에 발생하는 힘은 열차속도의 함수로 표현되므로 주행속도가 증가하는 만큼 궤도가 부담해야할 힘의 크기도 증가하게 된다[2]. 특히 곡선부의 경우, 열차의 주행속도에 따라 레일에 전달되는 윤중과 횡압은 그 크기에 따라 궤도의 변형을 유발하는 원인으로 되고, 또한 열차의 탈선과 같은 대형사고를 유발할 수 있다. 이에 대해서 열차의 주행안전성을 확보할 수 있도록 윤중감소율, 횡압한도 및 탈선계수의 허용한계를

설정해 두어 주행안정성을 정량적으로 평가 또는 검토하도록 하고 있다[3,4].

따라서 본 연구에서도 기존선에 투입예정인 개발 중인 틸팅열차의 제원과 특성을 사용하여 틸팅열차가 기존선의 곡선부를 주행할 때, 각 곡선반경과 캔트량에 따라 발생하는 윤중과 횡압을 정량적으로 평가하였다. 또한, 주행안정성의 평가기준이 되는 정적 및 동적 윤중감소율과 탈선계수를 산정하여 기준치와의 비교 및 검토를 통하여 틸팅열차의 주행안정성을 평가하도록 한다. 또한 주어진 선형조건에 대한 주행안정성을 만족하는 곡선부 제한속도를 검토하고, 이를 선형적합성 검토에 의해 예측한 제한속도와 비교하도록 한다[5].

2. 개발중인 틸팅차량의 특성

철도기술연구원에서 개발 중인 틸팅차량은 곡선부 주행시 발생하는 횡가속도를 틸팅작용에 의해서 상쇄시킴으로써 곡선부를 기존차량에 비해서 빠르게 주행할 수 있도록

1 정회원, 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀, 책임연구원
2 정회원, 한국철도기술연구원, 인프라기술개발팀, 선임연구원
3 비회원, 한경대학교, 토목공학과 조교수

한다는 개념을 갖는 차량이다. 개발중인 틸팅차량의 설계속도와 최고운행속도는 각각 200km/hr 및 180km/hr이다.

Fig. 1은 틸팅차량의 틸팅각도 0°~±8°에 따른 차체 무게중심고의 수평방향 및 수직방향으로의 변화 궤적을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이 틸팅각이 ±3°일 때에는 수평방향으로의 편위는 발생하지 않으며 수직방향의 편위량은 10mm이다. 최대틸팅각 ±8°일 경우에는 수평방향으로 최대 ±5mm, 수직방향으로 최대 22.5mm 정도 무게중심의 편위량이 발생하고 있음을 알 수 있다[1,6].

이와 같은 편위량은 곡선부 주행 시에는 무게중심이 궤간의 중심으로부터 수평 및 수직방향으로 이동하게 되어 내외궤의 윤중에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 틸팅차량의 제원으로부터 차량이 정지되어 있는 상태에서 레일면으로부터 무게중심까지의 거리가 약 1.124m인 것으로 산정하였다. 또한 곡선부 주행시의 윤중과 횡압은 안전측면을 고려하여 최대 틸팅각, ±8°를 기준으로 평가하였다.

3. 틸팅열차의 곡선부의 주행안정성

3.1 열차의 주행안정성 평가방법

곡선부의 선형제원을 검토함에 있어서는 차량의 주행안정성 확보가 가장 중요하다.

차량의 주행안정성 평가에 있어서는 탈선계수 Q/P (윤중 횡압비)를 기본적인 변수로 하고, 윤중감소율 $\Delta P/P_0$ 과 레일에 작용하는 윤축의 횡압한도를 보조적인 지표로 하여 주행안전성을 평가하고 있다. 또한 급곡선을 저속으로 주행할 때의 올라탐 탈선을 대상으로 한 주행안전성의 평가에서는 추정 탈선계수비를 그 지표로서 사용하고 있다.

본 연구에서는 기존선의 속도향상을 목적으로 개발중인 틸팅차량의 기존선 곡선부에 대한 주행안정성을 예측평가

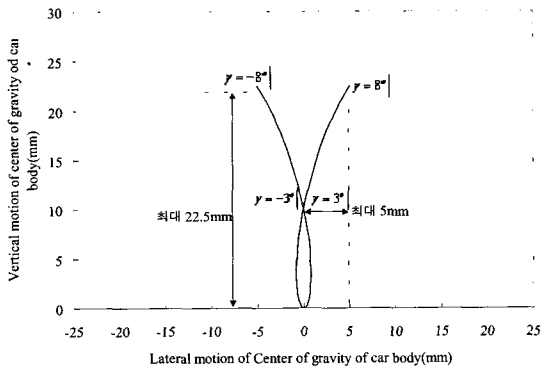


Fig. 1. 틸팅차량의 틸팅각도에 따른 무게중심 궤적

하고자 한다. 이를 위하여 틸팅차량의 제원과 특성 등을 이용하여 주행안정성 평가에 널리 사용되고 있는 탈선계수와 윤중감소율을 산정하여 기준치와 비교하였다.

3.2 탈선계수

탈선이 시작될 때에 차륜은 플랜지부분에서 레일과 한 점에서 접촉하면서 레일을 올라타게 된다. 이 때에 작용하는 차륜과 레일 간의 힘을 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 Q 를 횡압, P 를 윤중이라고 칭하고, T 는 차륜의 롤링접촉(Rolling contact)에 의해 발생하는 접촉력이다. 차륜의 어택(Attack)각이 (+)일 때, 접촉력 T 는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 차륜이 레일을 타고 오르는 방향으로 작용하여, 이 값이 최대가 되더라도 마찰력 μN (μ : 마찰계수)을 초과하는 경우는 없다.

Fig. 2와 같은 상태에 있어서의 횡압과 윤중의 비를 구하면, 공통접평면이 수평면이 되는 각(접촉각)을 α 라고 할 때에 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - (T_y / N)}{1 + (T_y / N) \tan \alpha} \quad (1)$$

식 (1)의 Q/P 값은 윤축의 어택각이 커지고, 접선력 T_y 가 마찰력 μN 에 달했을 때에 가장 작은 값을 취한다. 즉 이러한 극한상태에 있어서, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{Q}{P} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (2)$$

이 식은 나달(Nadal)의 식으로 불리는 것으로, 올라탐이 발생하는 최소의 Q/P (한계 탈선계수) 값을 구하는 데에 이용되어 왔다. 일본의 JR에서는 종래부터 이 식을 토대로 탈선에 대한 안전성 평가를 위한 탈선계수의 기준값을 0.8로 채용하고 있다. 본 연구에서도 탈선계수 Q/P 의 기준값으로 기준단면차륜($\alpha = 60^\circ$)의 경우에 0.8을 적용하였다[7].

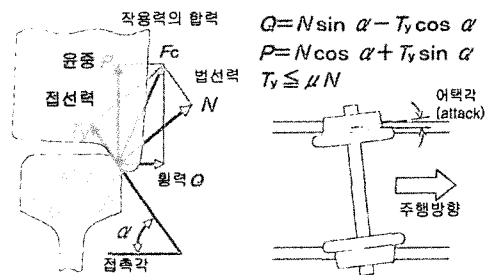


Fig. 2. 차륜-레일간의 작용력

3.3 윤중 정상분 및 변동분

일반 차량의 곡선 통과시 내외레의 윤중 정상분은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 차체의 경사를 고려하여 차륜/레일 접촉점을 중심으로 한 모멘트의 합으로부터 구할 수 있다. 이때 차체 경사에 의한 중심이동에 의한 중력성분의 모멘트 팔이 변화하게 되는데, 차체 경사량은 초과원심력(캔트부족량 C_d)에 비례하기 때문에 차량중심고 H_G 가 유효중심고 H_G^* 까지 상승한 경우와 등가로 간주된다. 따라서 곡선부에서 윤중 정상분은 틸팅차량의 무게중심의 변화를 고려하는 경우, 다음 식 (3) 및 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다[1,7].

이 식에서 무게중심의 유효높이는 차량의 최대틸팅각에 대한 수직방향 편의량을 고려한 값이다.

$$\bar{P}_{o-tilting} = \frac{W_o}{2} \left[\left(1 + \frac{v^2 C}{gR G} - \frac{2\gamma_H}{G} \right) + \frac{H_G^*}{G/2} \left(\frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right] \quad (3)$$

$$\bar{P}_{i-tilting} = \frac{W_o}{2} \left[\left(1 + \frac{v^2 C}{gR G} + \frac{2\gamma_H}{G} \right) - \frac{H_G^*}{G/2} \left(\frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right] \quad (4)$$

- 여기서, \bar{P}_{o_til} : 외궤측 윤중 정상분(tonf)
 \bar{P}_{i_til} : 내궤측 윤중 정상분(tonf)
 W_o : 정적 윤중(tonf)
 v : 열차의 주행속도(m/s)
 G : 궤간(m)
 C : 캔트(m)
 R : 곡선반경(m)
 g : 중력가속도(9.8m/s²)
 H_G^* : 차량의 유효중심 높이(m)
 γ_H : 틸팅차량 무게중심의 최대 편의량(m)

또한 상하방향의 윤중변동분은 다음 식 (5)과 식 (6)으로부터

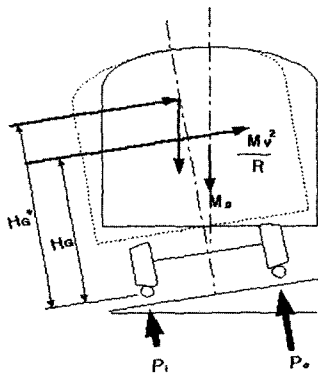


Fig. 3. 곡선부 윤중 변화

터 산정한다[7].

$$\Delta P_o = 3\{0.5\bar{P}_o(i-1)\} \quad (5)$$

$$\Delta P_i = 3\{0.5\bar{P}_i(i-1)\} \quad (6)$$

여기서 i 는 충격계수이다.

따라서 곡선부의 내궤 및 외궤에 작용하는 윤중의 총합은 정상분과 변동분의 합으로서 다음 식 (7) 및 (8)과 같다.

$$P_{wi} = \bar{P}_{i-tilting} + \Delta P \quad (7)$$

$$P_{wo} = \bar{P}_{o-tilting} + \Delta P \quad (8)$$

3.4 횡압 정상분 및 변동분

열차가 곡선부를 주행할 때 발생하는 횡압을 평가하기 위해서, 곡선부 통과 시 초과 원심력에 의한 횡압과 곡선전향 횡압을 정상분으로 하고, 좌우동000요와 차륜충격에 의한 횡압을 변동분으로 하여 다음과 같은 추정식이 제안되고 있다.

$$Q_o = Q_i + \Delta Q \quad (9)$$

$$Q_i = \kappa \cdot P_i \quad (10)$$

$$\Delta Q = (2 \cdot W_o / g) \cdot \alpha_H \cdot K_H + S \quad (11)$$

- 여기서 Q_i : 내측횡압(정상분)
 κ : 내궤측 횡압/윤중비
 a_H : 차체좌우동[궤도면 평행성분](m/sec²)
 (= $\alpha_H + \Delta\alpha_H$)
 a'_H : 차체좌우동[정상분](m/sec²) (= C_d/G)
 Δa : 차체좌우동(변동분, m/sec²) (= $3\sigma a_H$)
 σa_H : 차체좌우동의 표준편차(m/sec²) (= $k_2 \sigma_z V$)
 k_2 : 차체좌우방향의 차량요동계수
 (sec²/mm/(km/h))
 σ_z : 방향틀림의 표준편차(mm)
 K_H : 차체 좌우방향관성력의 대차 전축 부담률
 S : 이음부 부근의 충격적 횡압(tf)

식 (12)에서 κ 는 차종별 실측데이터를 기초로 하여 제안된 값으로서 대차의 전향성능을 나타내는 계수이다. 틸팅차량의 경우에는 조향대차로서 전향성능이 우수한 것으로 판단하여 다음 식을 적용하였다[7].

$$\begin{aligned} \kappa &= 30 \times (1/R) & (R > 300\text{m}) \\ \kappa &= 0.1 & (R \leq 300\text{m}) \end{aligned} \quad (12)$$

4. 정적 윤중 및 동적 윤중 감소량

탈선계수가 커지면 탈선하기 시작하지만, 실제 탈선사례에서는 횡압이 클 때보다 윤중 감소가 클 때에 탈선된 경우가 많다. 그래서 윤중의 감소하는 정도를 나타내는 지표로서 윤중 감소율을 정하고, 이것을 안전율을 평가하는 방법으로서 채용하고 있다.

정적 윤중감소는 완화곡선에서의 궤도의 평면성틀림, 차량재하의 편재, 곡선에서의 캔트의 과잉 등에 의해 차륜에 비교적 장시간에 걸쳐 발생하는 윤중감소를 말하며 차체의 동요에 의해 발생하는 동적 윤중감소와는 구별하여 안전성을 판정할 필요가 있다.

또한 동적 윤중감소는 차량의 동요 등에 의해 발생하는 비교적 단시간의 윤중감소를 말하고 이음매충격 등에 의해 발생하는 극히 단시간의 윤중감소도 여기에 포함된다. 윤중 감소율은 탈선계수와 더불어 탈선에 대한 안전성을 판정하기 위한 기본적인 목표로 하고 있고 탈선계수와 윤중 감소율 모두가 목표치를 초과하지 않는지를 검토할 필요가 있다.

윤중 감소율은 좌우양륜을 가지는 한 윤축의 힘의 균형으로 정의할 수 있다. 윤축중심에 탈선을 조장하는 방향으로 횡 하중 F_y 가 작용하고, 정지윤중을 $P_0=W/2$ (W :윤중), 윤중의 정지윤중으로부터의 감소치를 $\Delta P_L = P_0 - P_L$ 이라고 할 때에, 탈선하는 축 차륜의 윤중 감소율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta P_L}{P_0} = \frac{\lambda_L - \lambda_R}{\lambda_L + \lambda_R} \cdot \frac{F_y}{P_0} \times \frac{2}{\lambda_L + \lambda_R} \tag{13}$$

$$\lambda_L = \frac{\tan \alpha_L - \mu_L}{1 + \mu_L \tan \alpha_L} \quad \lambda_R = \frac{\tan \alpha_R + \mu_R}{1 - \mu_R \tan \alpha_R}$$

λ_L, λ_R 의 한계치는 다음과 같이 나달(Nadal)의 식 (2)에서 주어진다.

윤중 감소율 $\Delta P_L/P_0$ 은, 횡 하중이 없는 경우($F_y=0$)의 JR 기본답면을 가정하여 $\alpha_L=60^\circ, \tan \alpha_R=1/20$ 이라고 하면, 차륜/레일 간 마찰계수 $\mu=0.2$ 일 때에 $\Delta P_L/P_0$ 의 한계치가 약 0.64가 된다는 점에서, 0.6(60%)을 정적인 경우의 목표치로 하고 있다. 마찰계수의 가정이나 횡 하중이 없다고 가정한 경우에도 반드시 여유가 있는 값은 아니지만, 안전성 확보 면에서 탈선계수와 함께 병용되어 오고 있다. 또한 일반적인 주행시험에서 관측되는 동적인 윤중 감소에 대해서는 실제 현상을 감안하여 종래부터의 실적이 있는 0.8(80%)이 이용되고 있다.

위와 같은 점에서, 본 연구에서는 캔트 체감에 의한 정적

윤중 감소율의 기준값으로서 0.6을, 차체진동을 고려한 차량전복에 대한 동적 윤중 감소율의 기준값으로서 0.8을 적용하였다. 따라서 틸팅차량의 정적윤중이 $W_0/2$ 즉, 7.5tonf이므로 정적 윤중감소량의 한계치는 4.5tonf이며, 동적 윤중 감소량의 한계치는 6tonf이다.

본 연구에서는 Table 1과 같은 조건에 대해서 일반레일(이음매) 구간의 곡선반경에 따른 정적 및 동적 윤중을 Fig. 4~Fig. 7에, 그리고 장대레일 구간의 정적 및 동적 윤중을 Fig. 8~Fig. 11에 각각 나타내었다.

Table 1. 곡선부 윤중 계산을 위한 변수

변수	윤중 계산에 사용된 값
축중 W_0 (tonf)	15.0
캔트 C (m)	0.10, 0.15
차량중심고 H_G (m)	1.124
상하진동의 차량요동계수 K_v (m/sec ² /mm/(km/h))	0.0001
고저틀림의 표준편차 σ_z (mm)	0.42
차체좌우방향의 차량요동계수 k_z (sec ² /mm/(km/h))	0.001
방향틀림의 표준편차(mm) σ_x	2.5
윤중변동율	일반레일(이음매부): 0.5 장대레일: 0.3

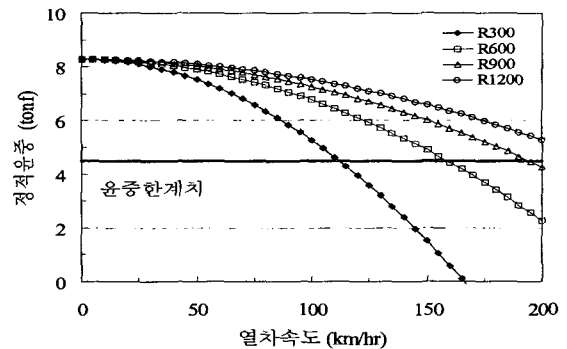


Fig. 4. 내측레일의 정적윤중(일반레일, C=100mm)

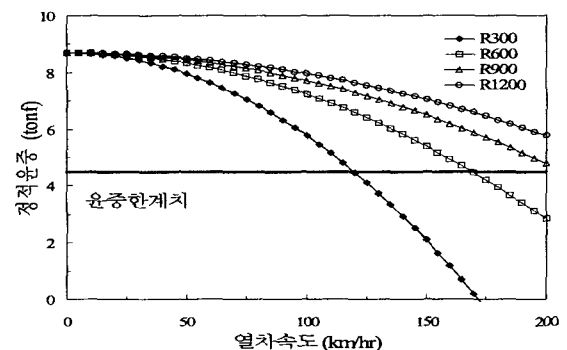


Fig. 5. 내측레일의 정적윤중(일반레일, C=150mm)

Fig. 12에 나타난 바와 같이 곡선부에서 윤중 한계치에 대한 최고제한속도는 레일종류와 무관하게 캔트량과 곡선반경이 클수록 제한속도는 증가하는 것으로 나타났다.

5. 탈선계수 산정에 의한 주행안정성

현재까지 널리 사용되고 있는 탈선계수에 대한 기준은 다음과 같은 두 가지 기준을 병용하고 있다.

- ① 제1 탈선계수 : 윤중의 값으로서 윤중 측정 파형의 순간 값을 이용하는 탈선계수
- ② 제2 탈선계수 : 윤중의 값으로서 윤중 측정 파형중에서 급격하게 변동하는 성분을 무시하고, 비교적 완만하게 변동하는 성분의 값만 뽑아내어 이용하는 탈선계수

탈선계수의 목표치는 어떠한 정의에 의한 경우에도 원칙으로서 0.8을 사용하고 있다. 그러나 식 (14)으로 시험차량

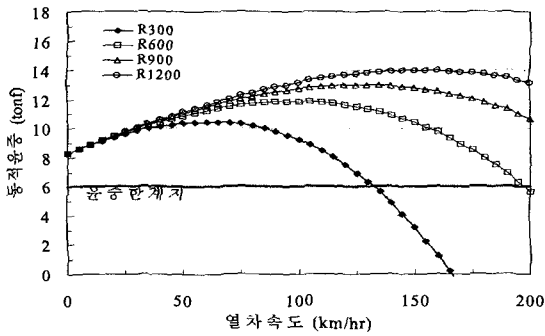


Fig. 6. 내측레일의 동적윤중(일반레일, C=100mm)

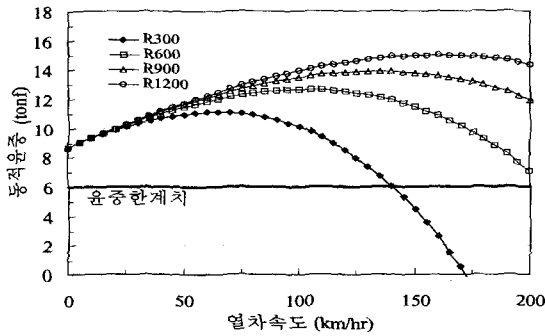


Fig. 7. 내측레일의 동적윤중(일반레일, C=150mm)

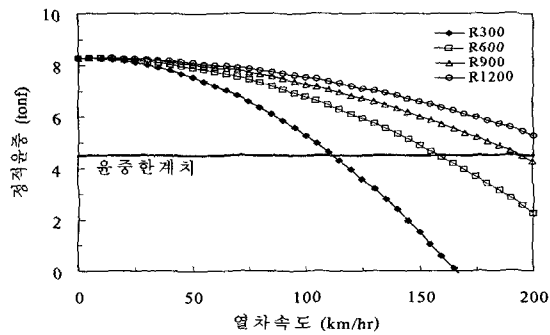


Fig. 8. 내측레일의 정적윤중(장대레일, C=100mm)

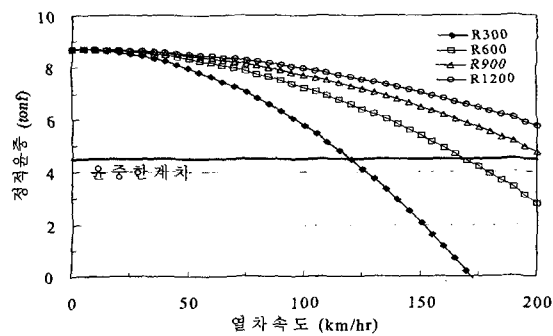


Fig. 9. 내측레일의 정적윤중(장대레일, C=150mm)

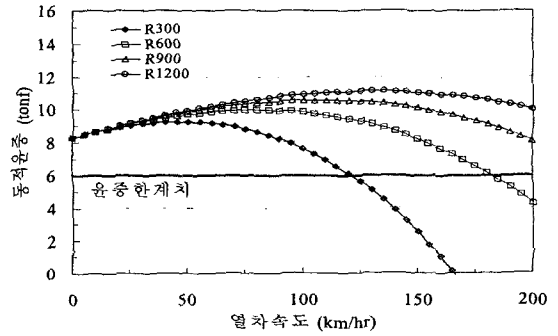


Fig. 10. 내측레일의 동적윤중(장대레일, C=100mm)

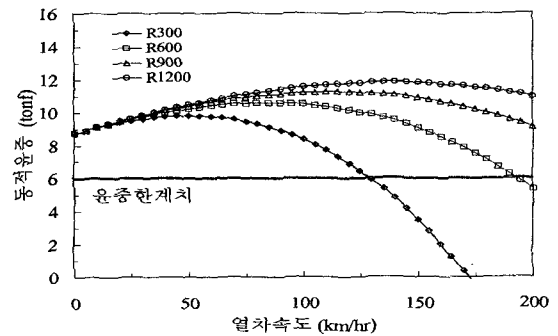


Fig. 11. 내측레일의 동적윤중(장대레일, C=150mm)

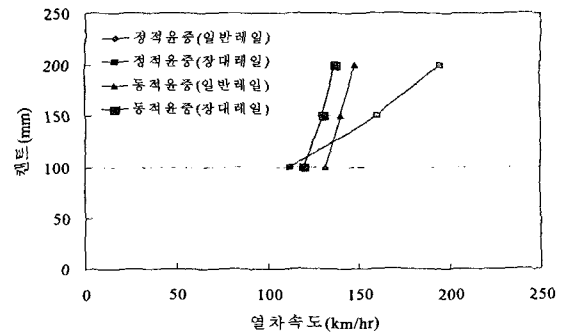


Fig. 12. 캔트량에 따른 열차속도(R=300m)

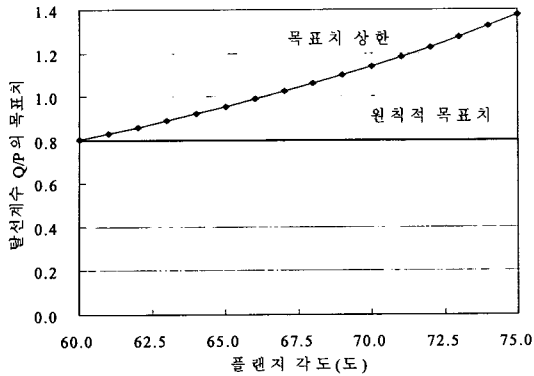


Fig. 13. 탈선계수의 목표치

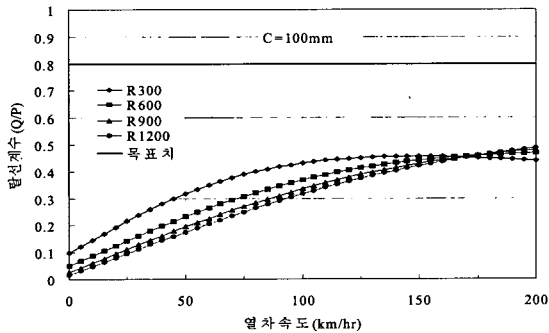


Fig. 14. 열차속도 vs 탈선계수(이음매레일)

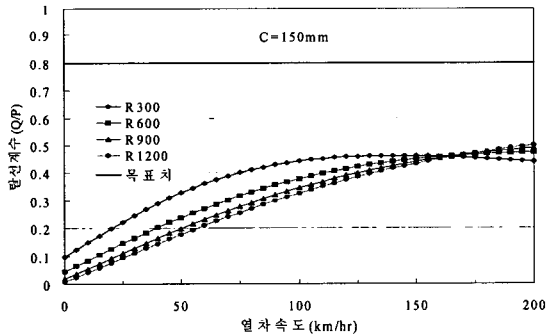


Fig. 15. 열차속도 vs 탈선계수(이음매레일)

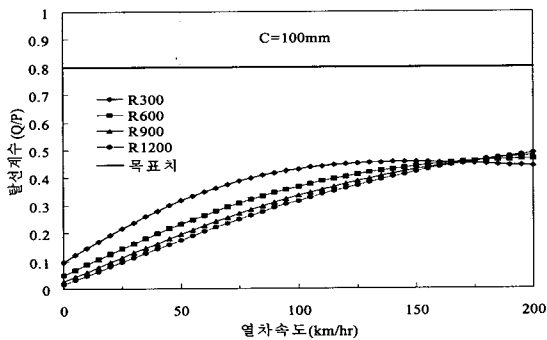


Fig. 16. 열차속도 vs 탈선계수(장대레일)

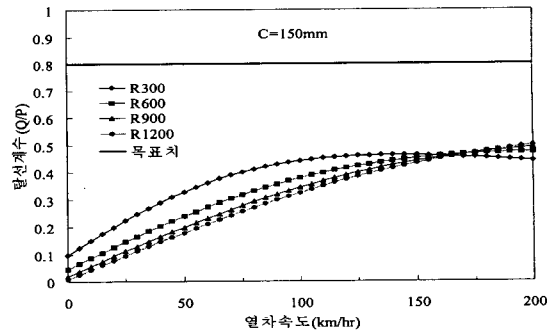


Fig. 17. 열차속도 vs 탈선계수(장대레일)

의 차륜 플랜지 각을 대입하여 얻어지는 값으로 0.8과 다른 값을 목표치로 사용할 수 있다[7].

$$\lambda_{\max} = K \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (14)$$

여기서 λ_{\max} : 탈선계수

α : 차륜 플랜지각

μ : 레일/차륜간 마찰계수($\mu=0.3$)

K : 안전율에 상당하는 계수 ($K=0.85$)

상기의 방법에서 채용한 탈선계수의 목표치를 λ 로 할 때, 제2 탈선계수에 대하여는 횡압의 작용 시간을 고려하여 다음의 값을 목표치로 할 수가 있다.

$$\begin{aligned} \text{목표치} &= \lambda & (t \geq 0.05 \text{ 초}) \\ &= 0.05\lambda t & (t < 0.05 \text{ 초}) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, t 는 횡압의 작용 시간(초)이다.

어떤 경우에라도 제1 탈선계수 또는 제2 탈선계수의 한쪽이 목표치를 초과해서는 안 된다(Fig. 13).

곡선주행 시 곡률 반경 및 열차속도별 탈선을 검토하기 위하여 이미 계산된 윤중 및 횡압을 사용하여 탈선계수를 구하였다. 탈선계수 산정에 있어서 횡압은 정상분과 변동분의 합을 검토횡압으로 하였고, 윤중은 정상분만을 고려하였다.

Fig. 14~Fig. 17은 안전율을 고려하여 정상 윤중만을 고려한 경우에 대한 일반레일(이음매) 구간과 장대레일구간에서의 탈선계수를 곡선반경별로 각각 나타낸 것이다. 이들 결과로부터, 곡선부에서 윤중 정상분만을 고려한 탈선을 검토하는 경우 모든 속도대역에서 기준치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

6. 곡선부 주행안정성 검토결과와 고찰

틸팅열차가 곡선부를 주행하는 경우, 주행안정성에 관한 검토를 위하여 궤도에 작용하는 윤중 및 횡압을 정량적으로

Table 2. 선형적합성 분석에 의한 틸팅열차 제한속도

R(m)	캔트 C (mm)	제한속도대역 (km/hr)	평균제한속도 (km/hr)
300	100~130	98~102	100
400	70~120	109~116	113
500	70~100	122~127	124
600	50~100	129~139	134
700	70~80	144~146	145
800	60~100	152~160	156
900	40~60	156~161	158
1000	60~70	152~172	162

Table 3. 주행안정성 검토에 의한 틸팅열차 제한속도

곡선 반경 검토 내용	캔트 C (mm)	곡선반경별 열차속도(km/hr)			
		300m	600m	900m	1200m
정적윤증 감소한계	100	112	160	190	>200
	150	120	170	>200	>200
동적윤증 감소한계	100	120	180	>200	>200
	150	130	195	>200	>200

분석하고, 탈선계수를 기준치와 비교하였다.

그 결과, 곡선부의 정적 윤증 한계치에 대한 최고 통과속도는 캔트량과 곡선반경이 클수록 통과속도가 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 동적 윤증 감소 한계치보다는 정적 윤증 한계치에 의하여 제한속도가 결정됨을 알 수 있다.

또한 틸팅열차의 탈선계수 검토결과로부터 제1 및 제2 탈선계수의 기준치 이내에서 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 실측 조사결과를 바탕으로 궤도의 선형 적합성 분석에 의한 곡선반경별 제한속도를 나타낸다[5,8]. 또한 Table 3은 본 연구의 주행안정성 분석에 의한 제한속도를 정리한 것이다. 이 두 결과로부터 틸팅열차가 기존선을 주행하는 경우, 열차의 제한속도는 궤도의 선형조건에 의해서 지배됨을 알 수 있으며, 따라서 선형적합성 분석에 의한 제한속도로 곡선부를 주행하여도 열차의 안정성에는 문제가 없음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 틸팅차량 투입 예정 노선인 기존선의궤도에 대해서 철도기술연구원에서 개발 중인 틸팅차량의 제원과 특성을 사용하여 곡선부 주행시에 대한 틸팅열차의 주행안정성을 검토하였고, 이에 따른 곡선부 제한속도를 평가하였다. 또한 이를 선형적합성 분석결과에 의한 곡선부 제한속도와의 비교검토를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 틸팅열차가 기존선의 곡선부를 주행하는 경우 주행안정성 평가의 기준이 되는 윤증감소율과 탈선계수는 기준치 이하로 평가되었고 열차의 주행안정성은 확보되어 있는 것으로 나타났다.
- (2) 주행안정성 검토에 의한 곡선부 제한속도는 궤도의 선형적합성 검토에 의한 제한속도보다 비교적 크게 나타났기 때문에, 틸팅열차의 곡선부 제한속도는 주행안정성보다는 선형적합성 측면에서 검토된 제한속도에 의해 좌우되는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 틸팅시스템 실용기술개발, 한국철도기술연구원, 3차년도 보고서, 2004.
2. 시운전시 궤도·노반 시설물의 성능 검증, 한국철도기술연구원, 2000.
3. 宮本昌幸, “車輛の脱線めカニズアムスム”, 鐵道總研報告, Vol.10 No.3, 1996.3.
4. 石田弘明 外 2人, “脱線に對する安全性評價指標の研究, 鐵道總研報告” Vol.9, No.8, 1995. 8.
5. 임기영 외 3인, “틸팅특성과 승차감을 고려한 틸팅열차의 곡선부 제한속도 평가”, 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회, 2004. 6.
6. 시스템 통합 및 연계기술개발, 한국철도기술연구원, 3차년도 보고서, 2004.
7. 鐵道に關する技術基準(土木編)解説, 土木關係技術基準調査研究會, 2002. 3.
8. 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 한국철도기술연구원, 3차년도 보고서, 2004.