

# 틸팅열차의 주행안전성 및 체결력 검토

## A Running Safety and Fastening System Investigation of Tilting Train

이주원\*      성대정\*\*      천주현\*\*      엄기영\*\*\*      신현목\*\*\*\*  
Lee, Ju-Won      Seong, Dae-jung      Cheon, Ju-Hyun      Eum, Ki-Young      Shin, Hyun-Mock

---

### ABSTRACT

The high speed tilting train has superior advantages which are effects on reductions of running time to non-tilting in curves. But in order that the tilting train is operated in conventional track, it is performed evaluation on the running safety. This study carried out an analysis of running stability of tilting train in conventional curved track. The results obtained through this study will be applied to improve the conventional curved track and determine the limit velocity.

---

## 1. 서 론

틸팅(Tilting) 열차는 곡선부를 주행할 때 원심력을 줄이기 위해 열차를 곡선부 안쪽으로 약간 기울여 운행하는 열차로, 횡방향 가속도를 틸팅작용에 의해서 감소시킴으로써 곡선부에서 빠르게 주행할 수 있다. 따라서 기존열차에 비하여 승차감과 주행속도를 향상시킬 수 있다. 그러나 틸팅열차는 기존열차와 차량의 성능 뿐 아니라 곡선부의 통과 메커니즘과 주행특성이 다르기 때문에 선로에 미치는 영향도 다르게 된다. 일반적으로 열차 주행으로 인한 궤도부담력은 열차속도의 함수로 표현되므로 주행속도가 증가하는 만큼 궤도가 부담해야할 힘의 크기도 증가하게 된다. 특히, 곡선부의 경우 열차의 주행속도에 따라 레일에 전달되는 윤중과 횡압은 그 크기에 따라 궤도의 변형과 탈선을 유발할 수 있다. 이에대해서 탈선계수, 윤중감소량, 윤중횡압추정식, 추정탈선계수비산정식 등을 통해 주행안전성을 평가 및 검토하도록 하고 있다. 따라서 이 연구에서는 틸팅열차의 도입시 주행안전성을 확보할 수 있도록 곡선부 주행시의 주행안전성과 윤중과 횡압에 의한 체결력을 검토하고자 한다.

## 2. 틸팅열차의 주행안전성 검토

### 2.1 검토 방법

이 연구에서는 틸팅열차의 주행안전성을 검토하기위해 저자 등에 의해 개발된 프로그램[SAPET v.1.2(Safety Performance Evaluation of Track)]을 사용하였다. 이 프로그램의 구성은 크게 궤도부담력 및 주행안전성 평가로 이루어져 있다. 궤도부담력 평가는 레일 휨 응력, 레일압력, 노반압력, 급격한 횡변위의 다섯 부분으로 주행안전성 평가는 탈선계수, 윤중감소량, 윤중횡압 추정식, 추정탈선계수비 산정식의 네부분으로 구성되어 있으며, 윤중과 횡압에 의한 체결력 평가를 새롭게 추가하였다. 따라서 기존선 곡선부 주행안전성과 곡선부 주행시의 윤중과 횡압에 의한 체결력을 기존열차(새마을호)와 비교 검토하였다. 선형 제원과 캔트는 경부선(대전~부산구간)과 호남선에 부설된 캔트를 조사하여 곡선

---

\* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정 E-mail :got2dabest@hanmail.net TEL : (031)209-7543

\*\* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사수료

\*\*\* 철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 인프라기술개발팀장 책임연구원

\*\*\*\* 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

반경 R400, R600, R800, R1000, R1200에 대해 각 곡선반경별 가장 많이 부설된 캔트를 선정하여 장대레일과 이음매레일로 나누어 검토하였고, 틸팅열차는 최대허용속도를 200km/h, 새마을호는 140km/h로 제한하였다.

## 2.2 탈선계수의 의한 검토

탈선이 일어나는, 즉 회전하고 있는 차륜이 레일측면을 올라타기 위해서는 미끄러져 내리려는 힘이 올라타려고 하는 힘과 마찰력의 합력과 평형을 이루어야 한다. 차륜과 레일의 접촉면에 평행인 힘의 성분을 고려하면, 차륜이 레일측면을 미끄러져 내려가려고 하는 힘( $P\sin\theta$ )과 차륜이 레일측면을 미끄러져 내려가려고 하는 힘( $Q\sin\theta$ )을 마찰력( $\mu(Q\sin\theta + P\sin\theta)$ )과의 관계로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$P\sin\theta = Q\sin\theta + \mu(Q\sin\theta + P\sin\theta) \quad (1)$$

이때의 횡압과 윤중의 비는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

식(2)은 나달(Nadal)의 식으로 불리는 것으로, 올라타기 발생하는 최소의  $Q/P$  (한계 탈선계수)값을 구하는 데에 이용되어 왔다. 탈선계수에 대한 기준은 윤중의 값으로서 윤중 측정 파형의 순간 값을 이용하는 제1탈선계수와 윤중의 값으로서 윤중 측정 파형중에서 급격하게 변동하는 성분을 무시하고, 비교적 완만하게 변동하는 성분의 값만 뽑아내어 이용하는 제2탈선계수를 사용하였다.

탈선계수 산정에 있어서 횡압은 정상분과 변동분의 합을 검토횡압으로 하였고, 윤중은 제1 탈선계수에 있어서는 동적 윤중을 제2 탈선계수에 있어서는 정적 윤중을 고려하였다. 또한, 이 연구에서는 한계 탈선계수  $Q/P$ 의 기준 값으로 기준담면차륜( $\alpha=60^\circ$ )의 경우에 0.8을 적용하여 새마을호와 틸팅열차에 대해 비교 검토하였다.

다음 그래프는 곡선반경800에 제1탈선계수와 제2탈선계수에 대한 검토 결과이다.

### 2.2.1 제1탈선계수

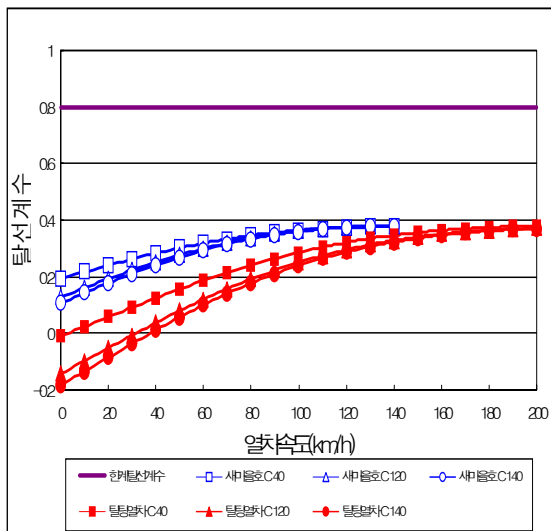


그림 1 제1탈선계수(장대레일)

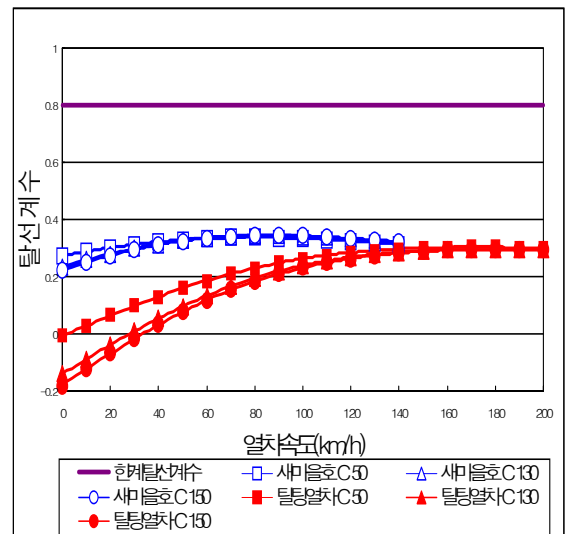


그림 2 제1탈선계수(이음매레일)

### 2.2.2 제2탈선계수

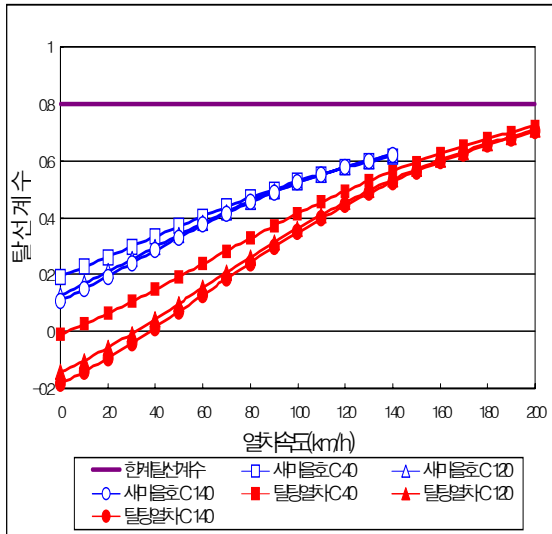


그림 3 제2탈선계수(장대레일)

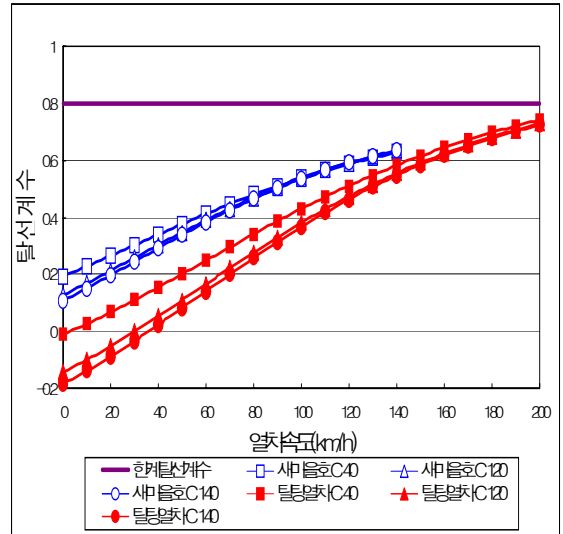


그림 4 제2탈선계수(이음매레일)

### 2.3 윤중 감소량에 의한 평가

윤중 감소율은 탈선계수와 더불어 탈선에 대한 안전성을 판정하기 위한 기본적인 목표로 하고 있고 탈선계수와 윤중 감소율이 모두가 목표치를 초과하지 않는지를 검토할 필요가 있다. 윤중감소는 다음과 같이 정적 윤중 감소와 동적 윤중감소 두가지에 의해 발생한다.

#### 2.3.1 정적 윤중감소

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.

#### 2.3.2 동적 윤중감소

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 감소율이 모두가 목표치를 초과하지 않는지를 검토할 필요가 있다.

이 연구에서는 캔트 체감에 의한 정적 윤중 감소율의 기준값으로서 0.6을, 차체진동을 고려한 차량전복에 대한 동적 윤중 감소율의 기준값으로서 0.8을 적용하였다. 식(3)과 식(4)는 이러한 감소 한계치를 나타낸다.

다음 그래프는 곡선반경800에 대한 정적 윤중 감소량과 동적 윤중감소량의 검토 결과 이다.

$$\frac{W_0}{2} - P_{st} \geq \frac{W_0}{2} \times 0.6 \quad (3)$$

$$\frac{W_0}{2} - P_{dy} \geq \frac{W_0}{2} \times 0.8 \quad (4)$$

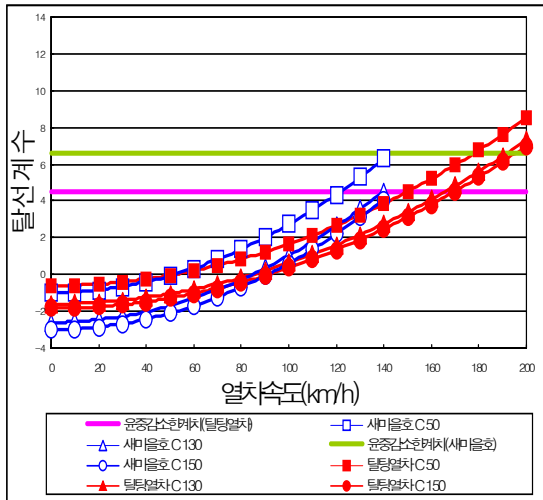


그림 5 정적 윤중감소량

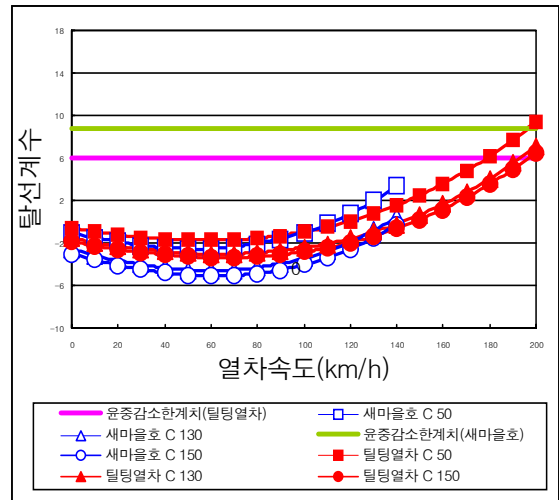


그림 6 동적 윤중감소량

## 2.4 윤중 횡압 추정식

윤중 횡압 추정식 곡선부의 선형제원에 관한 검토를 실시할 때에는 주행안전성의 평가기법으로서 다음과 같이 방법 윤중과 횡압을 추정하여 검토하였다.

### 2.4.1 윤중추정식

곡선 통과 시에 차량에 작용하는 원심력과 궤도면 비틀림, 공기스프링 비틀림의 세가지 요소를 고려하여 외궤측 윤중( $P_o$ ) 및 내궤측( $P_i$ ) 윤중을 식(5), 식(6)과 같이 산출하였다.

$$P_o = \overline{P}_o - \Delta P_1 + F_1 \times \frac{n}{\tan 60} \quad (5)$$

$$P_i = \overline{P}_i + \Delta P_1 - F_1 \times \frac{n}{\tan 60} \quad (6)$$

### 2.4.2 횡압 추정식

곡선 전향 횡압과 원심력 및 곡률에 의존하는 일정한 힘과 궤도 뒤틀림에 따른 윤측 횡압 변동분을 고려한 외궤측 횡압은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_o = Q_i + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} \quad (7)$$

여기서,

$$\text{안쪽레일의 마찰력에 의한 곡선 전향 횡압} : Q_i = kP_i \quad (8)$$

$$\text{원심력 및 곡률에 의한 윤측 횡압 변동분} : \Delta Q_{AS} = W_0 \left( \frac{(V/3.6)^2}{gR} - \frac{C}{G} + \frac{a_Q}{R} \right) \quad (9)$$

$$\text{궤도의 뒤틀림에 의한 횡압 변동분} : \Delta Q_{AD} = 3W_0 k \phi_Z V \quad (10)$$

## 2.5 추정탈선계수비 산정식

동일한 위치에 있어서의 한계 탈선계수 ( $QP_{crit}$ )와 외궤측 탈선계수 ( $QP_o$ )의 비를 추정 탈선계수비라고 하며, 그 값의 대소에 따라 올라탐 탈선에 대한 여유도를 평가한다. 추정 탈선계수비가 1.0이상이면 올라탐 탈선에 대한 일정수준의 여유가 확보되어 있는 것으로 판단되지만, 탈선 방지 가드에 대한 필요성의 판단에 있어서는 여러 가지 불확정 요소를 고려하여 1.2이상을 판단기준으로 한다. 다음 그래프는 곡선반경600과 800에 대해 검토한 결과이다.

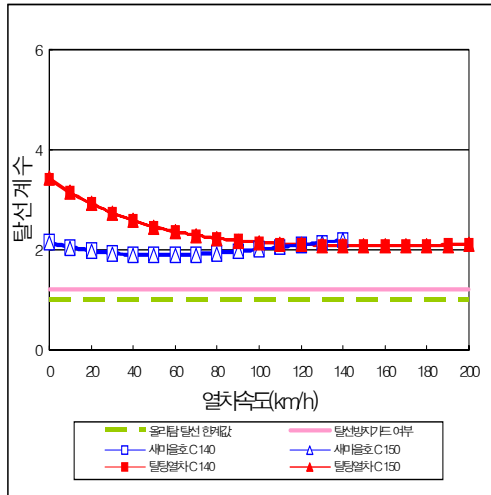


그림 7 추정탈선계수비(R600)

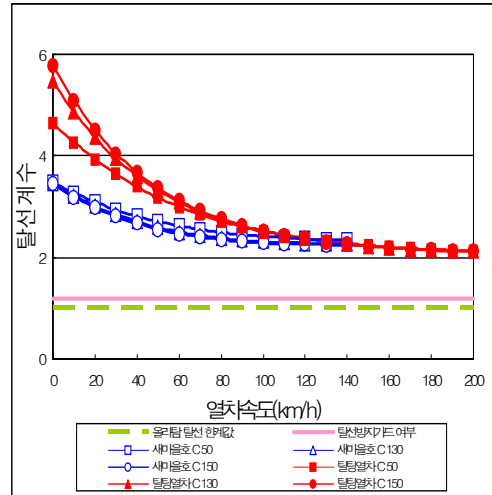


그림 8 추정탈선계수비(R800)

### 3. 레일압력과 횡압에 의한 체결력 검토

그림 9에 나타내지는 체결구 시스템에 대하여 레일이 하중을 받지 않는 상태의 초기 체결력을  $P_0$ 이라고 하면 레일압력과 횡압에 의한 체결력은 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$P' = P_0 - \left[ \frac{W_1}{k_p + 2k_c} \pm \frac{b_2 \Phi}{2} \right] \times k_c \quad (11)$$

여기서, 각각의 계수들은 표 1에 있다.

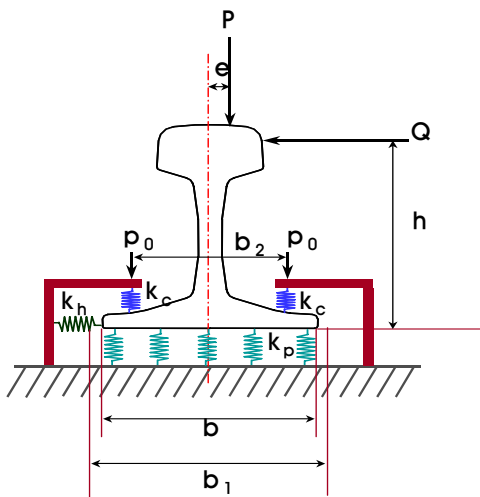


그림9 체결구시스템의 역학적 개요도

표 1 체결구 역학 해석에 사용된 기호의 정의

구 분	기 호	구 분	기 호
레일패드 수직스프링상수	$k_p$	초기체결력	$P_0$
레일패드폭(m)	$b_1$	침목간 거리(m)	$a$
체결구시스템 횡방향 지지스프링계수	$k_h$	레일 경좌에 대한 체결구 저항모멘트계수	$K_R$
체결구시스템 수직방향 지지스프링계수	$k_v$	편심거리(m)	$e$
클립의수직방향 지지스프링계수	$k_c$	레일저부와 레일패드와의 접촉면적( $m^2$ )	$A$
크립의 체결점간 거리(m)	$b_2$	레일의 비틀림강성	$C$

또한, 계산된 체결력은 식(12)의 범위기준 내에 있도록 제한하여 검토하였다.

$$\left[ 1 + \frac{2k_c}{k_p} \right] \times p_0 > P' > 0 \quad (12)$$

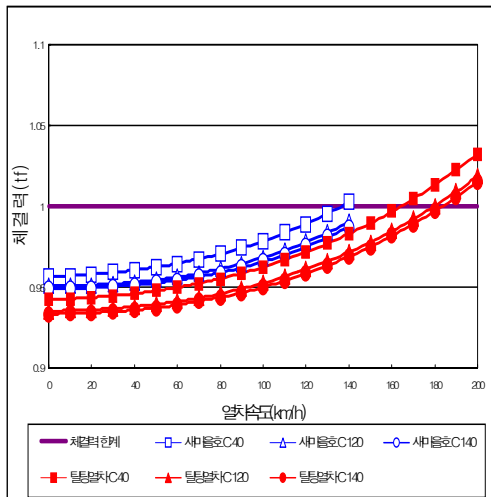


그림 10 체결력(장대레일)

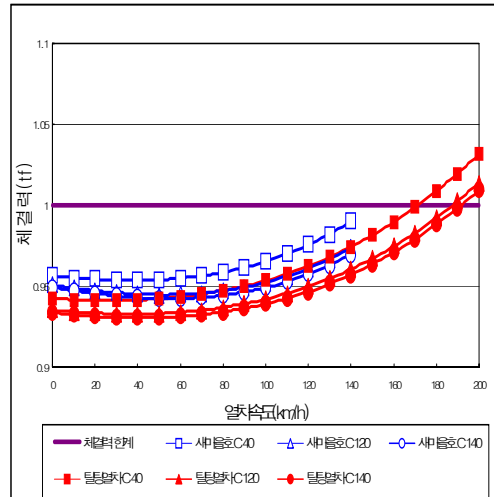


그림 11 체결력(이음매레일)

#### 4. 결론

이 연구에서는 틸팅열차가 기존선로의 곡선부를 주행할 때의 주행안전성에 대해 탈선계수, 윤증감소량, 윤증횡압 추정식, 추정탈선계수비 산정식과 윤증과 횡압에 의한 체결력을 기존열차(새마을호)와 비교 검토하였다.

이 연구의 수행 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- i) 틸팅열차의 주행안전성은 윤증횡압추정식 및 추정탈선계수비산정식보다는 윤증감소량과 윤증과 횡압에 의한 체결력에 의하여 결정된다.
- ii) 주행안전성 검토에 의한 틸팅열차의 제한속도는 기존열차의 제한속도에 비하여 25~35km/h 정도 크게 나타났다.
- iii) 이 연구에서 개발한 프로그램[SAPET v.1.2(Safety Performance Evaluation of Track)]을 활용함으로써 틸팅열차에 대한 궤도부담력과 주행안정성을 보다 간편하고 편리하게 평가할 수 있다.
- iv) 이 연구에서 제안한 평가방법은 기존선로에 도입되는 틸팅차량의 제한속도를 결정하고 기존선로의 개선 방안을 제시하는데 활용할 수 있다.

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부의 국가연구개발사업의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 鐵道總合技術研究所(1997), “鐵道構造物等設計標準・同解設 軌道構造「有道 床軌道」(案)”
2. 土木關係技術基準調查研究會(2002), “鐵도에 관한 技術基準(土木編)”
3. 國鐵도시설공단(2004), “철도설계편람(토공Ⅱ)”, pp. 101~125
4. 한국철도기술연구원(2006), “기존선 속도 향상을 위한 선로 시스템 개선 기술 개발(5차년도 최종보고서)”, 건설교통부
5. 철도청(2000), “국유철도건설규칙”