

## 틸팅차량 주행에 따른 기존선 곡선부 궤도의 성능 평가

### Performance evaluation of Conventional Curved Track by Tilting Trains

엄주환\* · 엄기영\* · 양신주\* · 신승권\*\*

Ju-Hwan Um · Ki-Yung Eum · Sin-Chu Yamg · Sung-Kyun Sin

#### Abstract

The track performance evaluation in curves of conventional line subjected to loading condition caused by tilting trains was carried out. And the correlations between train speed and track alignment was reviewed. The parameters of track alignment were determined by field investigation of all curves in conventional line. It was founded that the pressure of the rail did exceed the allowable stress when the tilting train speed was over 96km/hr in radius of 300m. As the radius of curvature is smaller, applied force on the track becomes larger in the curved track without regard to laying of the continuous welded rail. On the while, the change of applied force on the track corresponding to the change of the cant is not so large.

**Keywords** : Track performance(궤도성능), Tilting train(틸팅열차), Track alignment(궤도선형)

#### 1. 서론

열차가 궤도를 주행하는 경우, 열차와 궤도의 상호작용에는 작용력이 발생하게 되며, 이 작용력의 크기는 열차의 주행속도, 축중, 선로의 선형 등의 함수로 구성되며 궤도는 적절한 안전율을 확보하고 있어야 한다. 주행하는 열차의 안전성을 확보하기 위해서는 양자간의 상호작용력에 의한 차량과 궤도의 운동 안전성 확보가 필수적이다.

최근에 기존선 속도향상을 위한 새로운 개념의 틸팅 열차 개발이 진행되고 있다[1]. 틸팅열차는 자세제어에 의해서 기존차량의 주행속도가 제한을 받는 곡선부에서 보다 빠르게 주행할 수 있는 장점이 있다. 외국의 경우 이미 상업운행이 실시되어 기존 노선의 운행소요 시간 단축이나 승차감 개선 등의효과를 거두고 있다[1,2].

현재 개발중에 있는 틸팅차량의 설계속도와 최고주행속도는 각각 200km/h 및 180km/h이며, 곡선부 구간에서는 기존차량에 비해서 약 30% 이상 빠르게 주행할 수 있다는 사실이 국내·외의 관련연구에서 발표된 바 있다[1,2].

일반적으로 열차속도가 증가하면 동적효과의 증가로 인하여 궤도에 작용하는 동적하중은 증가한다. 따라서 발생된 충격하중에 의해서 궤도 구조가 부담하게 되는 하중도 비례해서 커지게 된다. 이와 같이 궤도가 받게 되는 부담력은 궤도구조의 성능과 안전성 평가를 위해서는 반드시 검토되어야 하는 부분이다.

따라서 본 연구에서는 개발중인 틸팅차량의 곡선부주행특성을 분석하고, 이를 반영하여 틸팅차량이 기존선 곡선부를 주행할 때 다양한 선로선형조건하에서의 속도별 궤도거동특성을 분석하여 틸팅차량의 속도와 궤도/선형조건과의 상관관계를 검토하였으며, 이를 바탕으로 향후 틸팅차량의 투입을 위한 기존선 곡선부 궤도의 선형적합성을 평가하고자 한다.

#### 2. 틸팅차량 및 궤도조건

개발중인 틸팅차량의 축중과 최고설계속도는 각각 15tonf 및 200km/hr이며, 검토대상 선로조건은 국내 기존선의 현재 부설조건을 고려하여 곡선반경 300m, 600m, 900m에 대해서는 캔트 100mm, 150mm를 곡선반경 1200m는 캔트 50mm, 100mm, 150mm에 대해서 검토를 실시하였다[3]. 레일의 제원은 KS50레일의 제원을 사용하였으며, 장대레일여부에 따라 검토를 수행하였다. 그 외 하중산정을 위한

† 정희원, 한국철도기술연구원, 기존철도기술개발사업단  
E-mail : jhum@krii.re.kr  
TEL : (031)460-5683 FAX : (031)460-5699

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

Table 1. 차량조건

변수	사용된 값
축중 $W_0$ (ton)	15
차량중심고 $H_G$ (m)	1.124
차량유효중심고 $H_G^*$ (m)	1.686
차체 차량요동계수(좌우) $K_z$ ( $m/s^2$ )	0.001
이음부 횡압변동분의 유효분(%)	20
충격계수 $i$	0.3(장대레일)
	0.5(이음매 레일)

Table 2. 침목과 도상 조건

변수	사용된 값
침목 종류	PC침목
침목 1개당 중량(tf)	0.16
침목길이(m)	2.4
침목하부 폭(m)	0.24
침목간격(m)	0.58
침목 단부면상단의 단면1차모멘트( $m^3$ )	0.00344
침목 측면상단의 단면1차모멘트( $m^3$ )	0.0501
도상두께(m)	0.25
도상 수직스프링 계수( $tf/m$ )	20000
도상 단위중량( $tf/m^3$ )	2
침목과 도상간의 마찰계수	0.65
노반의 지반반력계수( $tf/m^3$ )	7.2E3

차량 및 궤도조건은 다음 Table 1~Table 2와 같다.

### 3. 윤중 및 횡압 추정식

#### 3.1 윤중 추정식

일반 차량의 곡선 통과시 내외궤의 윤중 정상분은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 차체의 경사를 고려하여 차륜/레일 접촉점을 중심으로 한 모멘트의 합으로부터 구할 수 있다. 이

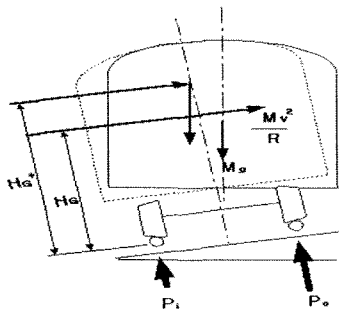


Fig. 1. 곡선부 윤중 변화

때 차체 경사에 의한 중심이동에 의한 중력성분의 모멘트 팔이 변화하게 되는데, 차체 경사량은 초과원심력(캔트부족량 Cd)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 (1) 및 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[4,5,6].

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

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

- 여기서,  $\bar{P}_{o-tilting}$  : 외궤측 윤중 정상분(tonf)  
 $\bar{P}_{i-tilting}$  : 내궤측 윤중 정상분(tonf)  
 $W_o$  : 정적 윤중(tonf),  $v$ : 열차속도(m/s)  
 $G$  : 궤간(m),  $C$  : 캔트(m)  
 $R$  : 곡선반경(m)  
 $g$  : 중력가속도( $9.8m/s^2$ )  
 $H_G^*$  : 차량의 유효중심 높이(m)  
 $\gamma_H$  : 틸팅차량 무게중심의 최대 편의량(m)

또한 상하방향의 윤중변동분은 다음 식 (3)과 식 (4)으로부터 산정한다[7,8].

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

$$\Delta P_i = 3\{0.5\bar{P}_i(i-1)\} \quad (4)$$

여기서  $i$ 는 충격계수이다.

따라서 곡선부의 내궤 및 외궤에 작용하는 윤중의 총합은 정상분과 변동분의 합으로서 다음 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$P_{wi} = \bar{P}_{i-tilting} + \Delta P \quad (5)$$

$$P_{wo} = \bar{P}_{o-tilting} + \Delta P \quad (6)$$

#### 3.2 횡압 정상분 및 변동분

곡선부 횡압은 지금까지의 측정 결과를 기초로 하여 횡압의 정상분으로서는 초과 원심력에 의한 횡압과 곡선전향 횡압을, 변동분으로서는 좌우동요에 의한 횡압과 차륜충격 횡압을 고려한 다음 식과 같은 추정식이 제안되고 있다[3,7,8].

$$Q_{sti} = kP_{sti} \quad (7)$$

$$Q_{sto} = Q_{sti} + W_0 \left[ \frac{(V/3.6)^2}{gR} - \frac{C}{G} \right] \quad (8)$$

Table 3. 곡선반경에 따른 내궤측 횡압/윤증비  $k$

곡선전향성능		
보통	양호	틸팅대차
$R > 500, k = 175/R$	$R > 400, k = 80/R$	$R > 300, k = 35/R$
$R \leq 500, k = 0.35$	$R \leq 400, k = 0.20$	$R \leq 300, k = 0.10$

여기서 식 (7) 내궤측 횡압 정상분(곡선 전향 횡압)  $Q_{sti}$  는 내궤측 윤증의 정상분과 내궤측 횡압/윤증비  $k$ 의 곱으로 표시한다. 차종별 실측 데이터를 기초로 하여  $k$ 값은 곡선반경에 따라 Table 3과 같이 나타낼 수 있다. 외궤측 횡압 정상분은 내궤측 횡압과 초과 원심력에 의한 횡압의 합으로서 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 내궤측 횡압은 동적 횡압이 없다고 고려되고 있으며 따라서  $Q_{dy}$  는  $Q_{sti}$  와 같다고 본다.

횡압의 변동분은 선형 틀림에 의한 차체 좌우 동요에 따른 관성력이 윤축 횡압  $\Delta Q_{sp}$  로서 직선부와 같이 표현된다. 이는 외궤측에만 발생하는 것으로 고려되고 있으며, 발생 확률은  $1\sigma$ 와 같은 것으로 한다.

$$\Delta Q_{sp} = 2W_0 \times \sigma_{oh} = 2W_0 \times k_z \times \sigma_z \times V/g \quad (9)$$

또한 이음매 궤도의 경우 이음부 부근에서의 윤축의 충격을 주체로 하는 횡압 변동분을 가정하는 것으로 하여 그 횡압 변동분  $\Delta Q_{unsp}$  는 이음 부근의 횡압 변동분의 실측 결과를 토대로 하여 얻어진 식 (10)에 의해 산정한다.

$$\Delta Q_{unsp} = \frac{\epsilon}{100} \times \left( \frac{250}{R} + 0.4 \right) \times \frac{V}{100} \quad (10)$$

여기서

$\epsilon$  : 이음부 횡압 변동분의 유효분(%)

또한 이  $\Delta Q_{unsp}$  는 발생 확률은  $3\sigma$ 와 같은 것으로 고려한다. 따라서 외궤측 동적 횡압은 식 (11)와 식 (12)와 같이 나타내어진다.

$$\text{장대레일 : } Q_{dyo} = Q_{sto} + 3 \times \Delta Q_{sp} \quad (11)$$

$$\text{이음매레일 : } Q_{dyo} = Q_{sto} + 3 \times \Delta Q_{sp} + \Delta Q_{unsp} \quad (12)$$

### 4. 곡선제원별 궤도부담력 산정

#### 4.1 레일 힘 능력

어떤 재료가 하중을 반복적으로 받게 되면, 하중의 반복 작용으로 인한 재료의 피로강도(fatigue strength)는 정적인

하중조건에서의 재료강도보다 일반적으로 작아진다. 즉, 하중의 반복횟수가 증가할수록 재료의 피로강도는 저하된다. 레일의 경우에도 마찬가지로, 열차주행으로 인한 동적하중이 반복적으로 레일에 작용하기 때문에 레일의 피로강도는 정적 하중을 받는 경우에 비해 저하되며 레일의 강도는 피

#### 1) 장대 레일

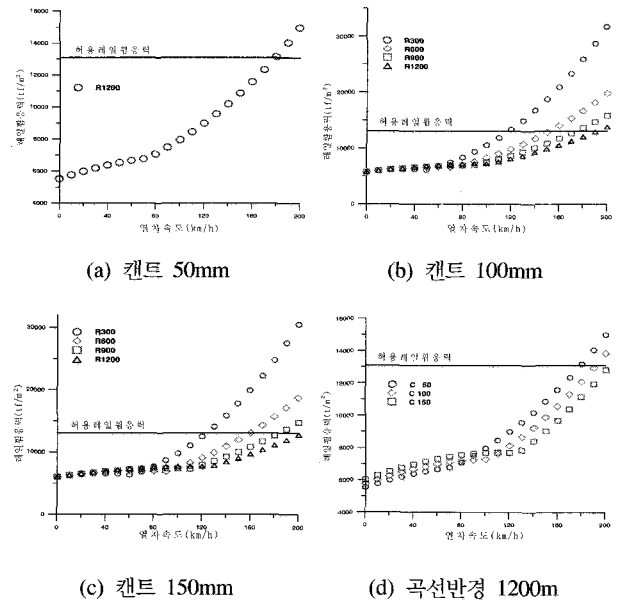


Fig. 2. 선형조건별 레일휨거동(장대)

#### 2) 이음매 레일

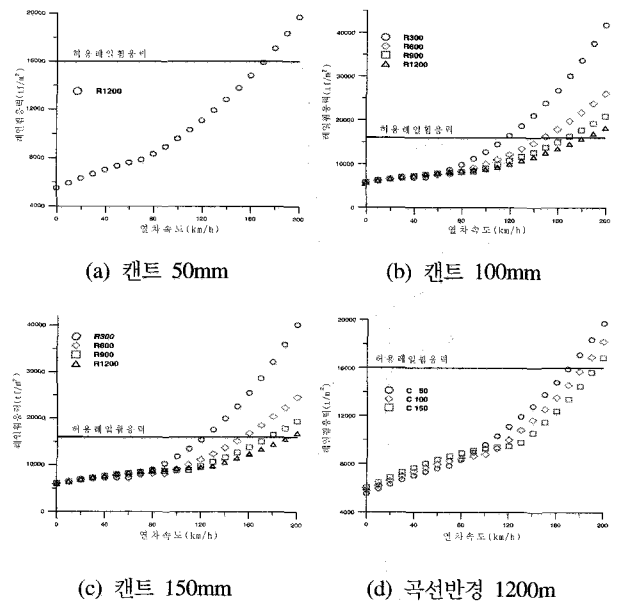


Fig. 3. 선형조건별 레일휨거동(이음매)

Table 4. 레일휨응력별 틸팅열차 허용속도(km/h)

C	R	레일 종류	R300		R600		R900		R1200	
			틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을
캔트 50mm	장대	-	-	-	-	-	-	178	116	
		-	-	-	-	-	-	170	114	
캔트 100mm	장대	118	82	152	106	174	120	190	132	
		116	86	148	106	166	120	182	130	
캔트 150mm	장대	122	90	158	116	184	134	200	146	
		122	92	154	116	176	130	192	142	

로강도에 지배된다. 따라서 이점을 고려하여 레일의 허용응력은 레일강의 피로강도와 반복횟수(S-N)와의 관계 곡선으로부터 산정된 피로응력을 사용하여 산정하였으며, 그 결과 장대레일의 허용응력은 13.1kgf/mm<sup>2</sup>, 이음매레일의 허용응력은 16.0 kgf/mm<sup>2</sup>인 것으로 산정되었다[2,3].

Fig 2~Fig 3과 Table 4에서 그 결과를 보여주고 있다.

검토결과, 같은 열차속도대에서 장대레일여부에 상관없이 곡선반경이 증가할수록 레일휨응력이 낮게 나타났다. 그리고 같은 곡선반경하에서 캔트에 따른 레일의 휨거동 특성은 약 100km/h이하에서는 큰 변화가 없었으며 그 이상의 속도에서는 캔트량이 낮을수록 레일의 휨응력이 다소 크게 나타났다. 레일종류에 따라서는 장대레일일 경우가 이음매 레일보다 열차속도가 다소 높게 나타났다.

이러한 결과는 다음 Table 4에서 보듯이 곡선반경 및 캔트량이 증가할수록 열차속도도 증가함을 보여준다. 또한, 표에서 보는 바와 같이 캔트와 곡선 반경에 따라 틸팅열차 투입 시 30~60km/h의 속도 향상이 기대 된다.

#### 4.2 레일 압력

PC침목에서 발생하는 균열은 궤도의 수명에 영향을 미치기 때문에 설계 레일압력에 대한 검토를 수행한다. PC침목의 설계 레일압력은 일본 기준을 바탕으로 안전측의 값인 7.2 tonf을 기준으로 하였다.

윤중 P<sub>dyn</sub>이 작용할 때 침목에 작용하는 최대레일압력은 다음 식 (13), 식 (14)로 주어진다.

(i) 윤중이 침목 직상에 작용할 때

$$P_{\max}^r = P_{\text{dyn}} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\beta a}{2}\right)} \cos\left(\frac{\beta a}{2}\right) \right\} \quad (13)$$

(ii) 윤중이 침목과 침목사이 중앙에 작용할 때

$$P_{\max}^r = \frac{P_{\text{dyn}}}{2} \left\{ 1 - e^{-\beta a} \cos(\beta a) \right\} \quad (14)$$

여기서,  $\beta = \sqrt[4]{k_r/E_r I_r}$

PC침목의 허용레일압력 검토도 레일의 허용응력검토와 동일한 선로조건으로 검토하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 열차속

#### 1) 장대 레일

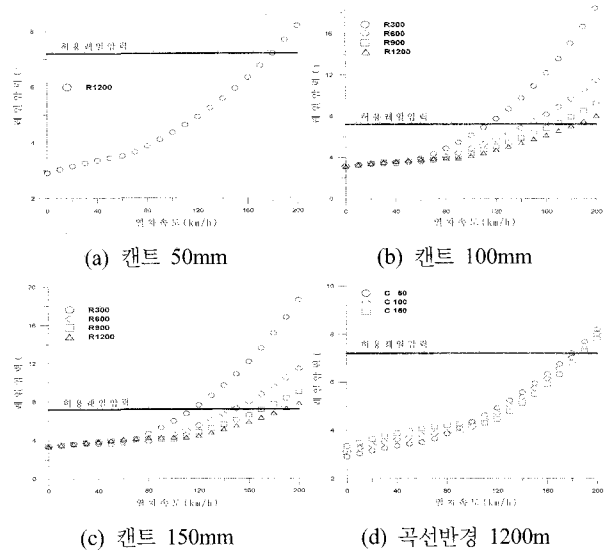


Fig. 4. 선형조건별 레일압력(장대)

#### 2) 이음매 레일

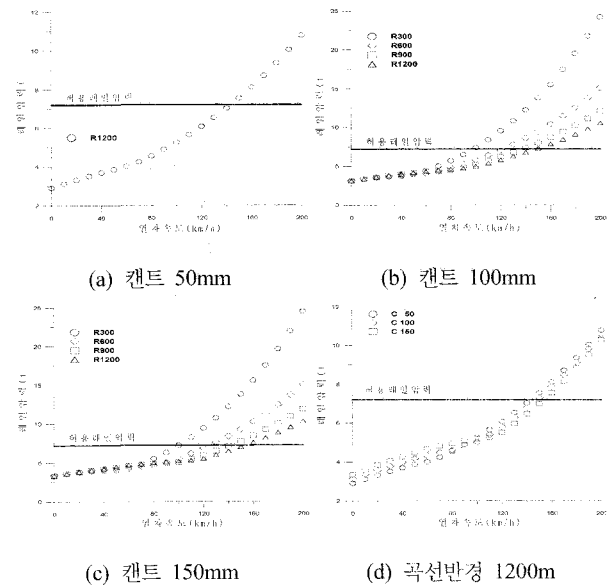


Fig. 5. 선형조건별 레일압력(장대)

Table 5. 레일압력별 틸팅열차 허용속도(km/h)

C	R 레일 종류	R 300		R 600		R 900		R 1200	
		틸팅	새마 을	틸팅	새마 을	틸팅	새마 을	틸팅	새마 을
캔트 50mm	장대	-	-	-	-	-	-	178	116
	이음매	-	-	-	-	-	-	142	88
캔트 100mm	장대	112	78	144	100	166	114	182	124
	이음매	96	66	120	82	136	90	148	96
캔트 150mm	장대	114	82	148	106	170	120	188	132
	이음매	100	70	124	88	140	84	154	70

도에 따른 PC침목의 허용레일압력과 레일압력을 나타낸 것이다. 검토결과, 레일휨응력과 마찬가지로 곡선반경이 낮을수록 레일압력이 크게 나타났다. 캔트에 따라서는 속도별로 그다지 큰 변화는 나타나지 않았으나 100km/h 전후에서 다소 변화가 있음을 알 수 있다. 레일종류에 따라서는 장대레일일 경우가 이음매 레일의 경우보다 20%정도의 높은 속도를 나타내었다. Table 5에서 레일압력에 따른 열차속도를 보여주고 있다.

4.3 노반 압력

노반의 허용지지력은 노반에 활동면이 발생하여 붕괴하는 경우를 가정한 것이다. 활동면을 검토할 경우에는 노반 표면에 작용하는 평균압력이 검토의 대상이지만, 입선 검사에서는 실제로 측정이 가능한 노반면의 최대압력을 구하여 전술한 노반 허용지지력을 보정하여 최대 도상압력과 비교하여야 한다. 이때 최대 도상압력으로 입선의 가부검토를 할 경우에는 평균압력에 대응한 노반의 허용지지력을 2.88 kgf/cm<sup>2</sup>(1.2×2.4 kgf/cm<sup>2</sup>)로 사용한다. 최대도상압력은 다음 실험식 (15)를 이용하였다[9].

$$p_{tmax} = p_t \cdot \frac{58}{10+h^{1.35}} = \frac{2P_R}{b \cdot l} \cdot \frac{58}{10+h^{1.35}} \quad (15)$$

여기서,  $p_{tmax}$  : 최대도상압력(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $P_t$  : 침목저면평균압력(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $h$  : 도상두께(cm)

Fig. 6과 Fig. 7은 열차속도에 따른 노반의 최대노반압력을 나타낸 결과이다.

검토결과 곡선반경이 작을수록 노반압력이 크게 나타났으며, 캔트에 따른 변화는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 열차속도는 곡선반경 및 캔트별로 상당히 높은 속도로 나타나 노반압력이 열차속도에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다.

1) 장대 레일

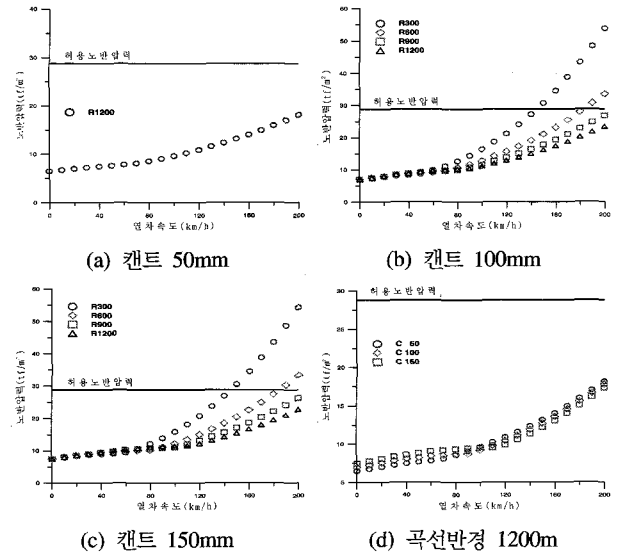


Fig. 6. 선형조건별 노반압력(장대)

2) 이음매 레일

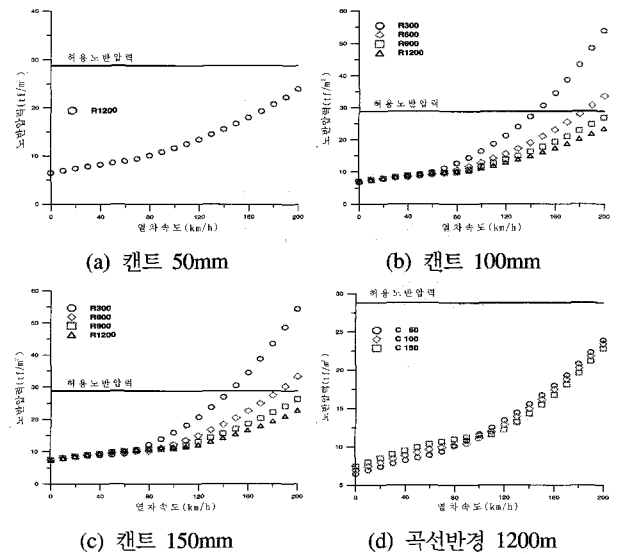


Fig. 7. 선형조건별 노반압력(이음매)

4.4 급격한 횡변위

횡방향의 급격한 변위발생은 횡방향으로 작용하는 하중보다 이에 대한 저항력이 부족할 경우 발생한다.

침목에 작용하는 횡하중은 내외궤의 레일휨압력의 차이로 다음 식 (16)과 같다.

$$Q_r = Q_{r1} - Q_{r2} \quad (16)$$

Table 6. 노반압력별 틸팅열차 허용속도(km/h)

C	R 레일 종류	R 300		R 600		R 900		R 1200	
		틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을
캐트 50mm	장대	-	-	-	-	-	-	200	200
	이음매	-	-	-	-	-	-	200	168
캐트 100mm	장대	164	126	200	164	200	188	200	200
	이음매	142	110	182	138	200	158	200	172
캐트 150mm	장대	164	128	200	166	200	192	200	200
	이음매	144	112	184	142	200	162	200	176

여기서  $Q_{r1}$ 은 외궤측 레일횡압력이고,  $Q_{r2}$ 는 내궤측 레일 횡압력으로서 등탄성연속지지모델을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{r1} = 0.5(Q_{dyo} - Q_{dym}) \left\{ 1 - e^{-\psi_2 \cos(\psi_2)} \right\} + (Q_{dyo} - Q_{dym}) \left\{ 1 - e^{-\psi_1 \cos(\psi_1)} \right\} \quad (17)$$

$$Q_{r2} = 0.5(Q_{dyo} - Q_{dym}) \left\{ 1 - e^{-\psi_2 \cos(\psi_2)} \right\} - (Q_{dyo} - Q_{dym}) \left\{ 1 - e^{-\psi_1 \cos(\psi_1)} \right\} \quad (18)$$

여기서,

$$\psi_1 = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{k_1}{4EI_y}}, \quad \psi_2 = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{k_1 k_2}{4EI_y (k_1 + k_2)}}$$

$k_1$  : 단위 길이당 체결구 횡스프링 계수(tf/m<sup>2</sup>)  
 $k_2$  : 도상 단위지지 스프링 계수(tf/m<sup>2</sup>)  
 $EI_y$  : 레일의 횡 방향 휨강성(tfm<sup>2</sup>)

침목의 횡방향 저항력은 도상저항력에 수직하중에 따른 마찰력의 합으로 다음 식 (19)로 주어진다.

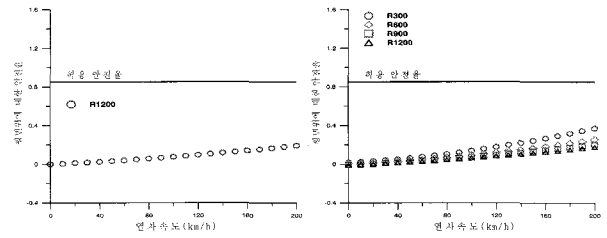
$$R_r = g_o + \mu P_{r12} \quad (19)$$

여기서,

- $\mu$  : 침목과 자갈도상간의 마찰계수
- $P_{r12}$  : 내/외궤의 정상레일압력의 합(tf)
- $g_o$  : 하중 비재하시 도상 횡저항력(tf)

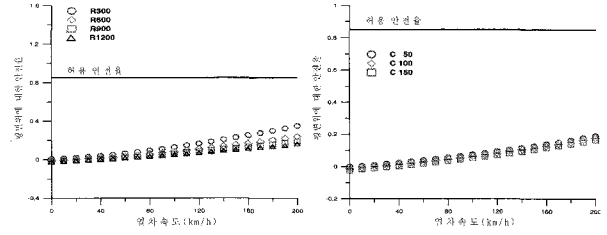
따라서 소정의 안전율을 고려한 검토식은 다음 식 (20)과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 8과 Fig. 9 및 Table 7에서 침목 및 궤도의 급격한 횡변위에 대한 안정성 검토결과를 보여주고 있다.

1) 장대 레일



(a) 캔트 50mm

(b) 캔트 100mm

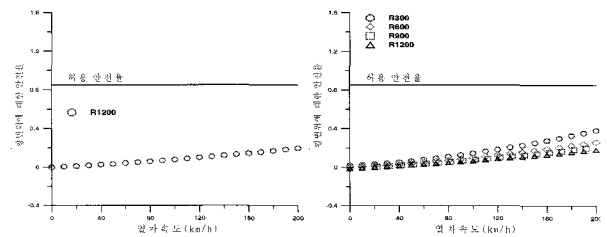


(c) 캔트 150mm

(d) 곡선반경 1200m

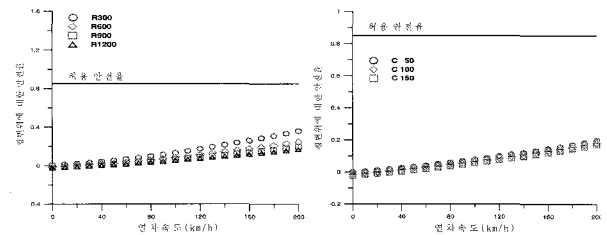
Fig. 8. 선형조건별 급격한 횡변위(장대)

2) 이음매 레일



(a) 캔트 50mm

(b) 캔트 100mm



(c) 캔트 150mm

(d) 곡선반경 1200m

Fig. 9. 선형조건별 급격한 횡변위(이음매)

$$\frac{Q_r}{R_r} = \frac{Q_{r1} - Q_{r2}}{g_o + \mu P_{r12}} < 0.85 \quad (20)$$

Table 7. 급격한횡변위별 틸팅열차 허용속도(km/h)

C	R	레일 종류	R 300		R 600		R 900		R 1200	
			틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을
캔트	50mm	장대	-	-	-	-	-	-	200	200
		이음매	-	-	-	-	-	-	200	200
캔트	100mm	장대	200	200	200	200	200	200	200	200
		이음매	200	200	200	200	200	200	200	200
캔트	150mm	장대	200	200	200	200	200	200	200	200
		이음매	200	200	200	200	200	200	200	200

검토결과 곡선반경이 작을수록 횡변위가 크게 나타났으며, 캔트에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 열차속도는 곡선반경 및 캔트별로 상당히 높은 속도로 나타나 노반압력과 마찬가지로 급격한 횡변위 또한 열차속도에 미치는 영향은 아주 작은 것으로 나타났다.

4.5 레일두부 횡변위

체결구시스템에 대하여 윤중 P, 횡압 Q가 작용할 때 레일 경좌각은 다음 식 (21)로 계산된다.

$$\phi = \frac{(Q \cdot h - P \cdot e)}{2} \sqrt{\frac{a}{K_R \cdot C}} \quad (21)$$

여기서 각각의 기호는 Table 8에서 정의한 바와 같으며,  $K_R$ 는 레일 경좌에 대한 체결구 저항모멘트계수로서 다음 식 (22)로 주어진다.

$$K_R = \frac{1}{12} k_p b_1^2 + \frac{1}{2} k_c b_2^2 \quad (22)$$

여기서

$k_p$  : 레일패드 수직 스프링계수(tf/m)

$k_c$  : 클립 수직 스프링계수(tf/m)

$b_1$  : 레일패드 폭(m)

$b_2$  : 클립의 체결점간 거리(m)

레일두부의 횡방향 총변위는 식 (23)과 같으며, 여기서  $\delta 1$  은 경좌각이 주어진 경우 레일두부횡변위이고,  $\delta 2$  는 레일횡압력에 의한 레일저부의 횡변위이다.

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (23)$$

Fig. 10과 Fig. 11에서 틸팅열차 속도에 따른 레일두부 횡변위 검토결과를 보여주고 있다.

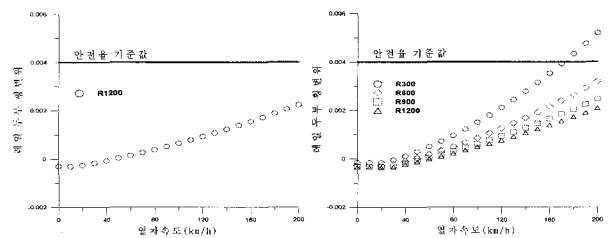
레일두부 횡변위 또한 곡선반경이 작을수록 변위가 크게 나타났으며, 캔트에 따른 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 8. 체결구 역학 해석에 사용된 기호의 정의

구 분	기호	구 분	기호
레일패드 수직 스프링계수 (tf/m)	$k_p$	초기 체결력(tf)	$p_0$
레일패드 폭(m)	$b_1$	침목간 거리(m)	$a$
체결구 시스템 횡방향 지지 스프링계수(tf/m)	$k_h$	레일 경좌에 대한 체결구 저항모멘트계수(tf · m/rad)	$K_R$
체결구 시스템 수직방향 지지스프링계수(tf/m)	$k_v$	편심거리(m)	$e$
클립 수직 스프링계수 (tf/m)	$k_c$	레일저부와 레일패드와의 접촉면적(m <sup>2</sup> )	$A$
클립의 체결점간 거리(m)	$b_2$	레일의 비틀림강성(tf·m <sup>2</sup> )	$C$

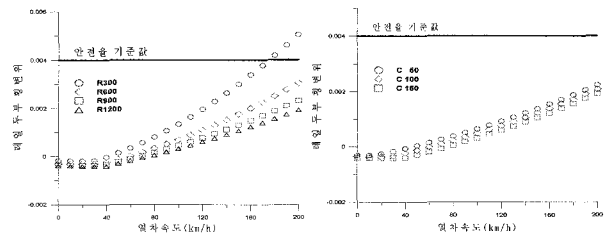
열차속도도 곡선반경 600m이상에서는 대부분 180km/h 이상의 속도로 나타나 열차속도에 미치는 영향이 아주 작은 것으로 나타났다.

1) 장대 레일



(a) 캔트 50mm

(b) 캔트 100mm

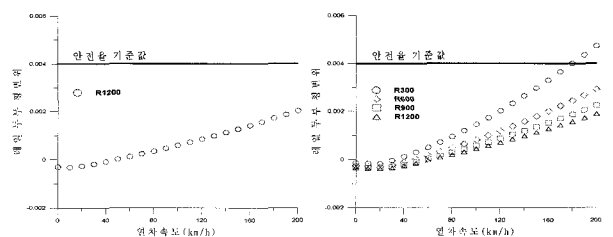


(c) 캔트 150mm

(d) 곡선반경 1200m

Fig. 10. 선형조건별 급격한 횡변위(장대)

2) 이음매 레일



(a) 캔트 50mm

(b) 캔트 100mm

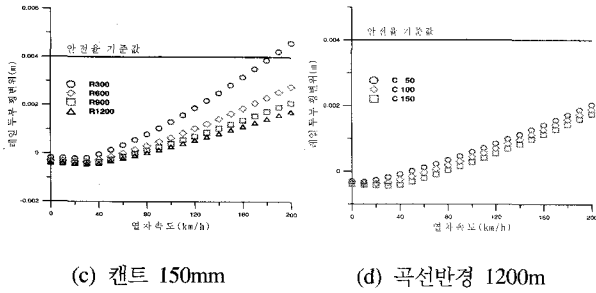


Fig. 11. 선형조건별 급격한 횡변위(이음매)

Table 9. 레일두부 횡변위별 틸팅열차 허용속도(km/h)

C	R	레일 종류	R 300		R 600		R 900		R 1200	
			틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을	틸팅	새마을
50mm	장대	-	-	-	-	-	-	200	200	
	이음매	-	-	-	-	-	-	200	200	
100mm	장대	170	144	200	182	200	200	200	200	
	이음매	178	158	200	200	200	200	200	200	
150mm	장대	174	146	200	188	200	200	200	200	
	이음매	182	160	200	200	200	200	200	200	

### 5. 궤도부담력 검토결과와 고찰

틸팅차량의 주행에 따른 기존선 곡선부 궤도성능을 평가하기 위해 주요 선로선형조건인 캔트 및 곡선반경, 그리고 궤도조건으로는 장대레일여부 등을 고려하여 레일 휨응력, 레일 압력 및 노반압력, 급격한 횡변위, 레일두부 횡변위 등을 검토하여 상관관계를 분석하였다. 검토결과 장대레일여부에 상관없이 대부분 곡선반경이 작을수록 궤도부담력이 크게 나타났으며, 같은 곡선반경 하에서 캔트량의 변화에 따라서는 대부분 캔트량이 낮을수록 궤도부담력이 다소 크게 나타났으며, 특히 레일 휨응력 검토에서는 캔트량의 변화에 따라 궤도부담력이 다소 큰 차이가 발생함을 알 수 있었다.

그리고 레일휨응력 및 레일압력 검토에서 그래프가 일정하게 증가하지 않고, 곡선반경 및 캔트의 증가에 따라라도 다소 상반된 결과를 나타내는데, 이러한 현상은 검토 시 내/외 궤 중 최대값을 도출하는 과정에서 나타난 현상이다.

열차의 허용속도 산정결과를 보면 급곡선부인 R300, 캔트150mm 구간에서 장대레일일 경우 레일휨응력, 이음매레일일 경우 레일압력에 의하여 각각 90km/h, 70km/h로 허용

속도가 좌우되는 것으로 나타났다. 그러나 이는 기존 새마을 열차일 경우이며 틸팅차량일 경우는 이보다 약30km/h 이상의 속도향상효과를 나타낼 수 있었다. 따라서 현재 기존선에 틸팅차량을 투입할 경우 궤도부담력 측면에서 약 30%이상의 속도향상을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다.

단, 여기에서 수행한 궤도부담력 평가결과는 선로제원 중 일부조건에 대해서만 검토를 수행한 것이며, 추후에는 현장 계측결과 및 추가 변수를 고려하여 궤도시스템의 성능평가를 종합적으로 수행할 계획이다.

### 6. 결론

본 연구에서는 기존선의 속도향상을 목적으로 틸팅차량의 투입을 계획하고 있는 기존노선을 대상으로 틸팅차량의 특성을 고려하여 곡선부 열차속도에 따른 궤도 부담력과 선로선형과의 상관관계를 검토하였다. 검토대상 선로는 국내 기존선의 현재 부설조건을 고려하여 곡선반경 300m, 600m, 900m에 대해서는 캔트 100mm/150mm를 그리고 곡선반경 1200m에 대해서는 캔트 50mm/100mm/150mm에 대해서 검토를 실시하였다.

본 연구의 수행결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 레일휨응력은 장대레일여부에 상관없이 곡선반경이 증가할수록 레일휨응력이 낮게 나타났으며, 같은 곡선반경하에서 캔트량이 낮을수록 레일의 휨응력이 크게 나타났다.
- (2) 레일압력 및 노반압력은 곡선반경이 작을수록 궤도부담력이 크게 나타났으며, 캔트에 따른 변화는 크지 않음을 알 수 있었다.
- (3) 급격한 횡변위 및 레일두부횡변위 발생에 대한 검토에서도 곡선반경이 작을수록 궤도부담력이 크게 나타났으며, 캔트에 따른 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 열차허용속도는 레일압력에서 곡선반경300m/캔트100mm일 때 틸팅차량의 허용속도가 약 96km/h로 가장 낮은 것으로 나타났다.

이상의 결론으로부터 곡선반경이 작을수록 궤도부담력이 크며, 캔트에 따라서는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 또한 장대레일일 경우가 이음매 레일보다 열차속도가 높음을 알 수 있었다. 그리고 틸팅차량 투입에 따른 속도향상 효과는 기존 새마을열차에 비해 약 30%이상의 속도향상을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다.



## 참고문헌

1. 틸팅시스템 실용기술개발, 한국철도기술연구원, 3차년도 보고서, 2004
2. 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 한국철도기술연구원, 3차년도 보고서, 2004
3. 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 한국철도기술연구원, 4차년도 보고서, 2005
4. 엄기영 외 3인, “틸팅차량의 기존선 곡선부 주행안전성 평가”, 한국철도학회 논문집, Vol.7, No.4, 2004.12
5. 임주환 외 3인, “기존선 원화곡선부의 승차감을 고려한 틸팅차량의 곡선부 제한속도 평가”, 한국철도학회 논문집, Vol.7, No.4, 2004.12
6. 유영화 외 2인, “기존선의 선형조건을 고려한 틸팅차량의 허용속도 평가”, 한국철도학회 논문집, Vol.6, No.4, 2003.12
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. 鐵道構造物等設計標準・同解説[軌道構造(有道床軌道)](案) 鐵道總合技術研究所, 1997
9. 新軌道力學, 平成 9年(1997年)