

철도 차량과 曲線

2024. 11. 15.

한국철도기술연구원

남 성 원



직선



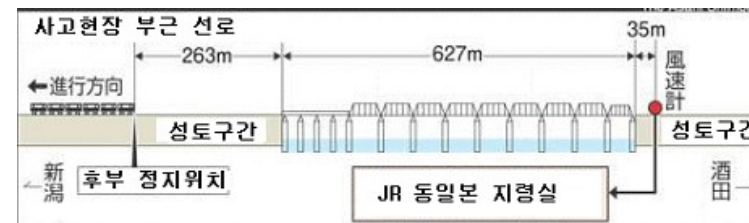
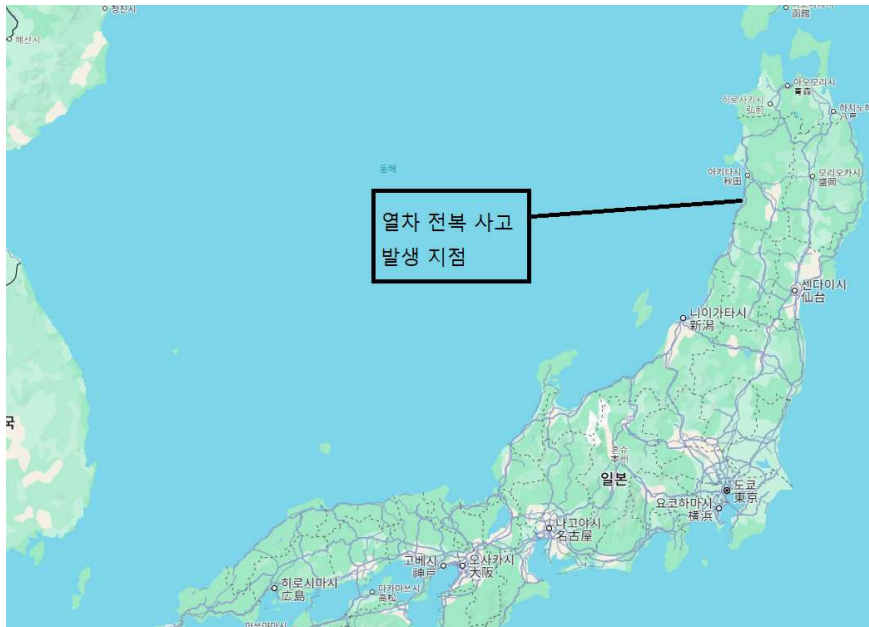
곡선

• 열차 전복 사고 (1)



- 일시 : 2005년4월25일 오전 9시 18분경
- 장소 : JR 西日本 후쿠지야마線 (오사카 고베 부근)
쨌카구치~아마가사키驛 구간
- 피해 : 580명 승객중 107명 사망, 부상 220명
곡선부에서 탈선하여 앞쪽 2량이 선로변의 맨션에 충돌.
- 원인 : 70km/h 제한의 커브($r=304m$)를 116km/h 로 진입
(전날 운전자의 과다음주로 인한 졸음 운전 → 신호무시)

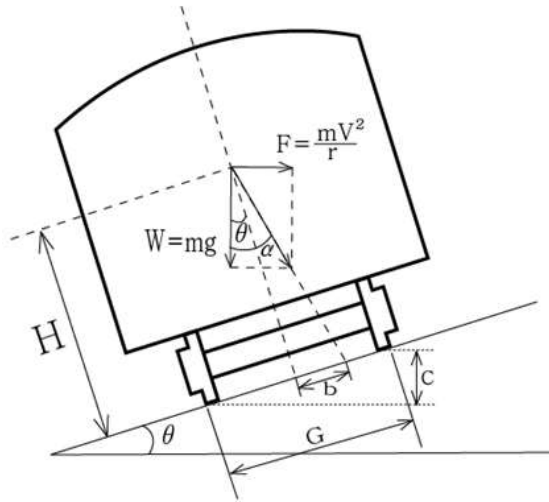
• 열차 전복 사고 (2)



- 일시 : 2005년 12월 25일 오후 7시 14분경
- 장소 : JR 東日本 우에쓰線
기타아마루~사에쓰驛 구간
- 피해 : 45명 승객중 5명 사망, 부상 32명
교량과 성토구간 주행중 열차 전복, 선로변 농가 창고에 충돌.
- 원인 : 당시 25 m/s 바람이 불어서 서행 운전중에 열차 전복
(실제 순간 풍속은 더 클 것으로 예측됨 → 불가항력의 자연재해)

· 선로가 곡선으로 인하여 고려하여야 할 주요 사안

1. 곡선 통과 속도 (철도의 건설기준에 관한 규정 제6조 관련)
2. 캔트 (同 규정 제7조)
3. 차량 전복 안전도 (철도 차량 기술 기준)
4. 곡선으로 인한 선로 시공기면폭 증가 (同 규정 제15조)
5. 슬랙 (同 규정 제12조)
6. 곡선에서의 차량 편의량
7. 곡선에서의 건축 한계 증가 (同 규정 제13조)
8. 기타 (완화곡선 등)



$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{b}{H} \dots\dots\dots ①$$

$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{\tan\alpha - \tan\theta}{1 + \tan\alpha \cdot \tan\theta} \approx \tan\alpha - \tan\theta \dots\dots\dots ②$$

$$\tan\alpha = \frac{F}{W} = \frac{V^2}{rg} \dots\dots\dots ③$$

$$\tan\theta = \frac{c}{G} = \frac{V_0^2}{rg} \dots\dots\dots ④$$

$$\frac{b}{H} = \frac{G}{2sH} = \frac{V^2}{rg} - \frac{c}{G} \quad (b = \frac{G}{2} \frac{1}{s}) \quad s : \text{안전율}$$

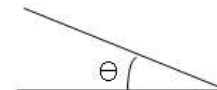
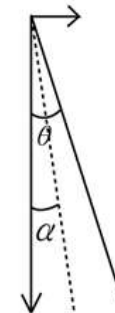
1. 캔트공식 $\therefore V = \sqrt{rg(\frac{G}{2sH} + \frac{c}{G})}$

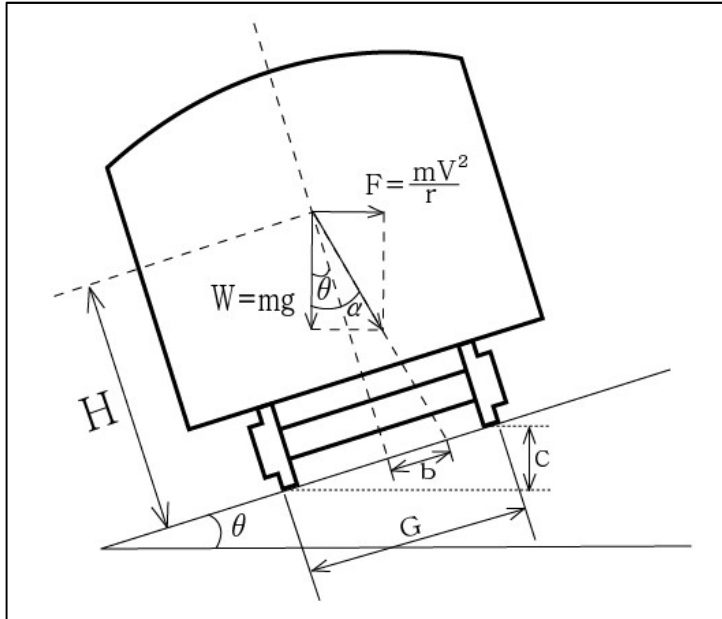
2. 속도 V 가 평형속도 V_0 보다 작을 때, $\tan(\theta - \alpha)$ 이므로

$$\therefore V = \sqrt{rg(\frac{c}{G} - \frac{G}{2sH})}$$

3. 분기구간에서는 $\tan\theta = 0$ 이므로 $\therefore V = \sqrt{\frac{rgG}{2sH}}$

4. 역캔트시 $\therefore V = \sqrt{rg(\frac{G}{2sH} - \frac{c}{G})}$ $\tan\theta = -\frac{c}{G}$





그림에서 곡선통과속도와 마찬가지로 구하면

$$\frac{V^2}{rg} - \frac{c}{G} = \frac{b}{H}$$

합력작용점 b 가 0일 때 “평형속도”, “균형캔트” 라 함.

$$c_0 = \frac{V^2}{rg} G$$

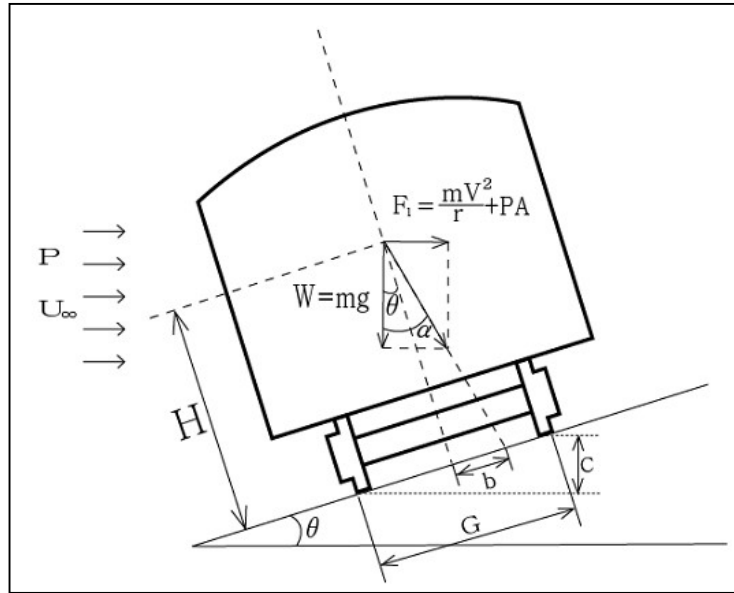
속도를 km/h, 곡선반경을 m, 궤간을 대략 1500mm 라고 하면

$$c_0 = \frac{\left(\frac{1000}{3600} V\right)^2}{9.8r} \cdot 1500 = 11.8 \frac{V^2}{r}$$

기존선에서는 여객열차, 화물열차, 전동차가 혼용되므로 캔트부족을 도입

$c' = 0 \sim 100\text{mm}$ (국제철도연맹 UIC) 선로등급에 따라 다름

$$\therefore c = 11.8 \frac{V^2}{r} - c'$$



$$\tan(\alpha - \theta) = \frac{b}{H} \quad \text{----} \quad b = \frac{G}{2s} \quad (1)$$

$$\tan(\alpha - \theta) \approx \tan \alpha - \tan \theta \quad (2)$$

$$\tan \alpha = \frac{F_1}{W} = \frac{\frac{mV^2}{r} + PA}{mg} \quad P = (P_{\text{교행풍압}} + P_{\text{강풍}}) \quad (3)$$

$$\tan \theta = \frac{c}{G} \quad (4)$$

(1)(2)(3)(4)에서

$$\frac{b}{H} = \frac{\frac{mV^2}{r} + PA}{mg} - \frac{c}{G}$$

① 곡선 통과중 외측 열차가 강풍과 열차 교행풍을 받는 경우

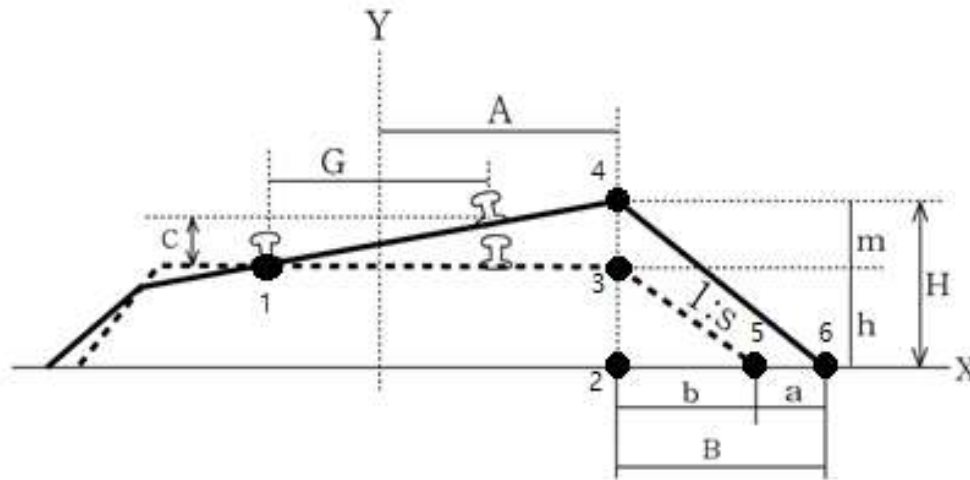
$$b = H \left(\frac{\frac{mV^2}{r} + PA}{mg} - \frac{c}{G} \right) \leq \frac{G}{2s}$$

② 평탄선로에서 강풍과 열차 교행풍을 받는 경우 ($c = 0$)

$$b = H \left(\frac{PA}{mg} \right) \leq \frac{G}{2s}$$

③ 곡선에 내측열차가 정차한 상태에서 강풍과 열차 교행풍을 받는 경우

$$b = H \left(\frac{c}{G} + \frac{PA}{mg} \right) \leq \frac{G}{2s} \quad (V=0) \quad (P\text{방향 반대})$$



s : 기울기 (발라스트 궤도의 경우)

G : 궤간

c : 캔트

h : 도상+ 침목두께

$$\triangle 235 \text{에서} \quad 1 : s = h : b \quad \text{---} \rightarrow \quad b = hs$$

$$\triangle 246 \text{에서} \quad 1 : s = H : B \quad \text{---} \rightarrow \quad B = Hs$$

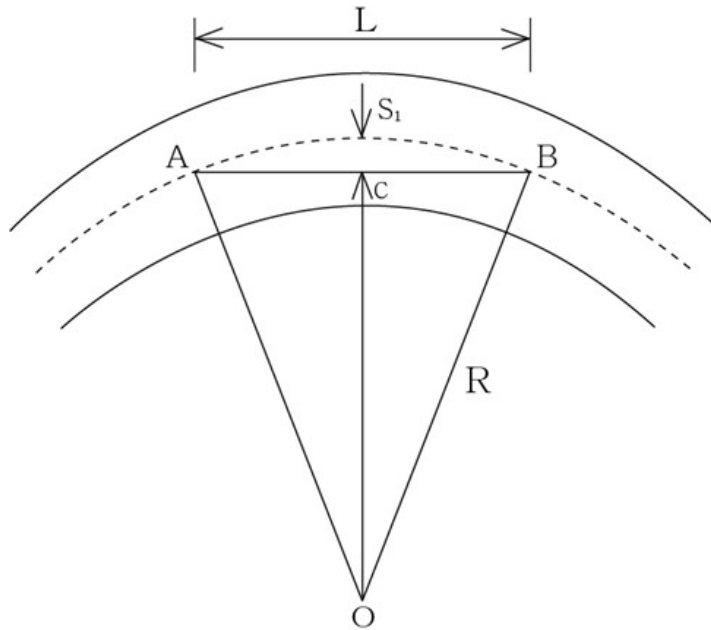
$$\triangle 134 \text{에서} \quad \left(\frac{G}{2} + A\right) : m = G : c \quad \text{---} \rightarrow \quad m = \left(\frac{G}{2} + A\right) \times \frac{c}{G}$$

$$H = h + m = h + \left(\frac{G}{2} + A\right) \times \frac{c}{G}$$

$$\therefore a = B - b = Hs - hs = \left(\frac{G}{2} + A\right) \frac{cs}{G}$$

+ 추가적으로 유지보수원 통로확보 및 안전거리 유지

슬랙(곡선 통과를 원활하게 확대)



$\overline{AB}$: 고정축거 중심점

L : 고정축거

R : 곡선반경

S_1 : 편의량

곡선에서 최대 편의량(S_1)은 A, B 중앙인 C 점에서 발생

$$\overline{AC}^2 = \overline{AO}^2 - \overline{CO}^2 \quad \left(\overline{AC} = \frac{L}{2}, \overline{AO} = R, \overline{CO} = R - S_1 \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{L^2}{4} &= R^2 - (R - S_1)^2 \\ &= R^2 - R^2 + 2RS_1 - S_1^2 \end{aligned} \quad S_1^2 \ll 2RS_1 \text{ 이므로}$$

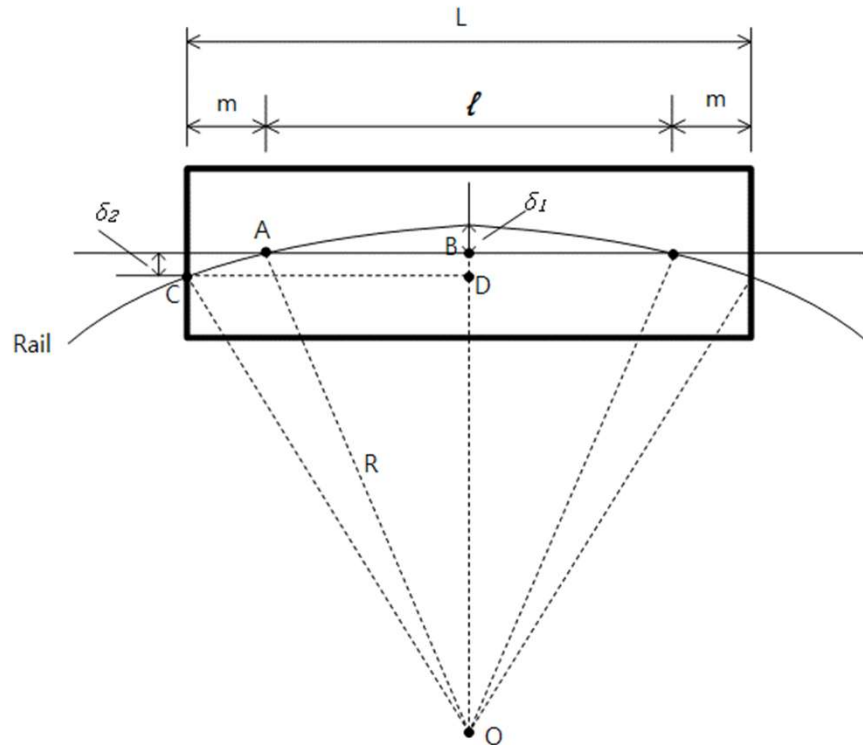
$$\therefore S_1 = \frac{L^2}{8R}$$

선로유지보수 현장실정과 슬랙이 너무크면 탈선우려가 있으므로

$$S_1 = \frac{1000 \cdot L^2}{8R} - S' \quad S' : \text{조정값 (0~15mm)}$$

기존선 디젤기관차 고정축거 4.35m $S = \frac{2400}{R} - S'$

메트로 $S = \frac{2250}{R} - S'$



L : 차량길이

 l : 대차중심간 길이

m : 대차중심에서 차량 단부까지 길이

R : 곡선반경

① 차량 중앙부에서의 편의량 δ_1 은 $\triangle ABO$ 에서

$$\overline{AO^2} = \overline{AB^2} + \overline{BO^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{AC} = \frac{l}{2}, \\ \overline{AO} = R, \\ \overline{BO} = R - \delta_1 \end{array} \right. \quad \text{이므로,} \quad \begin{aligned} R^2 &= \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (R - \delta_1)^2 \\ &= \frac{l^2}{4} + R^2 - 2R\delta_1 + \delta_1^2 \end{aligned}$$

$\delta_1^2 \ll 2R\delta_1$ 이므로 δ_1^2 은 미소항으로 무시할 수 있다.

차량 중앙부에서의 편의량 $\delta_1 = \frac{l^2}{8R}$

② 차량 단부에서의 편의량 δ_2 는 $\triangle CDO$ 에서,

$$\overline{CO^2} = \overline{CD^2} + \overline{DO^2}$$

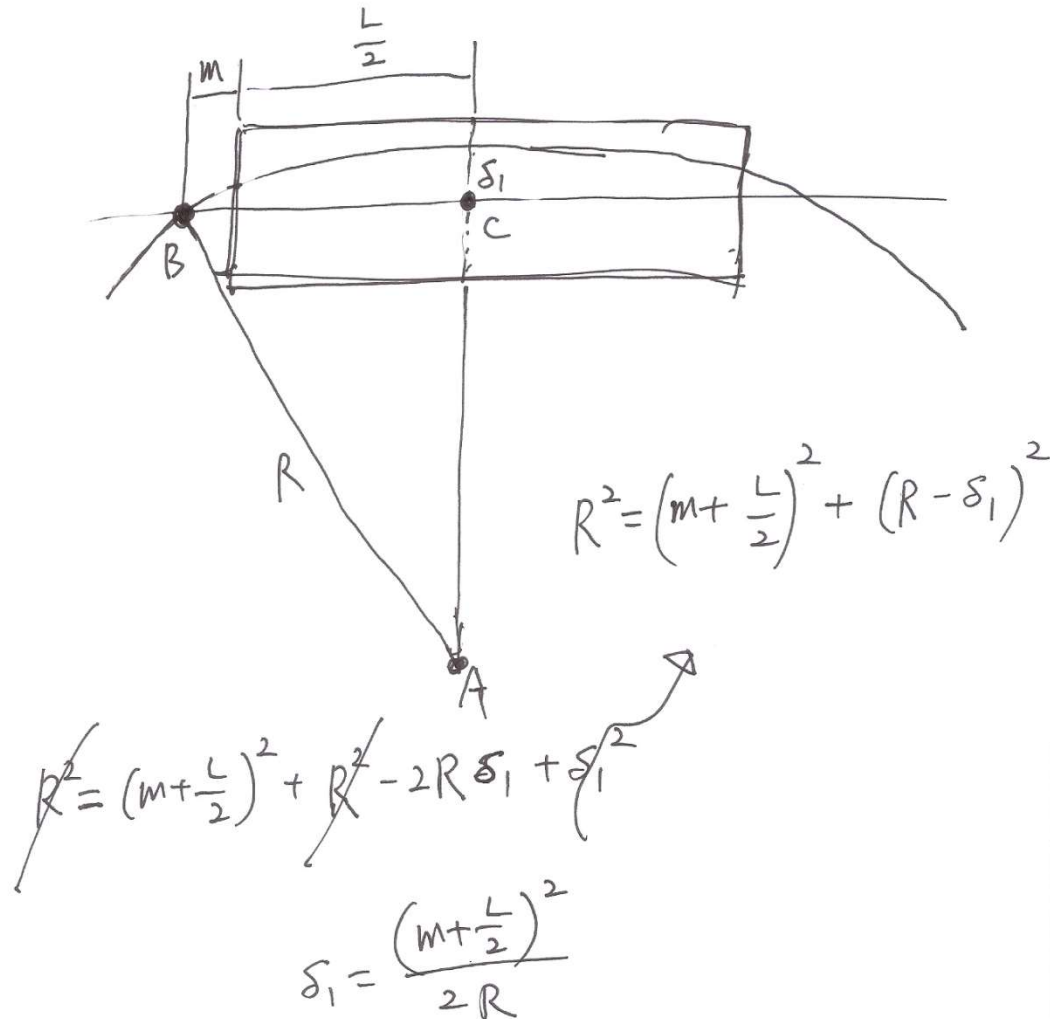
$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{CD} = \frac{l}{2} + m, \\ \overline{CO} = R, \\ \overline{DO} = R - (\delta_1 + \delta_2) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} R^2 = (\frac{l}{2} + m)^2 + [R - (\delta_1 + \delta_2)]^2 \\ = \frac{l^2}{4} + lm + m^2 + R^2 - 2R(\delta_1 + \delta_2) + (\delta_1 + \delta_2)^2 \end{array}$$

$(\delta_1 + \delta_2)^2 \ll 2R(\delta_1 + \delta_2)$ 이므로 $(\delta_1 + \delta_2)^4$ 은 미소항으로 무시할 수 있다.

차량 중앙부에서의 편의량 $\delta_1 = \frac{l^2}{8R}$ 을 대입하여 정리하면,

차량 단부에서의 편의량 $\delta_2 = \frac{m(l+m)}{2R}$

연접 대차 차량의 경우



곡선에서의 건축한계 증가

①차량 편의량 : - 차량 중앙 편의량 $\delta_1 = \frac{l^2}{8R}$

- 차량 단부 편의량 $\delta_2 = \frac{m(l+m)}{2R}$

특수 장물차 ($l=18m$, $m=4.0m$) 이므로

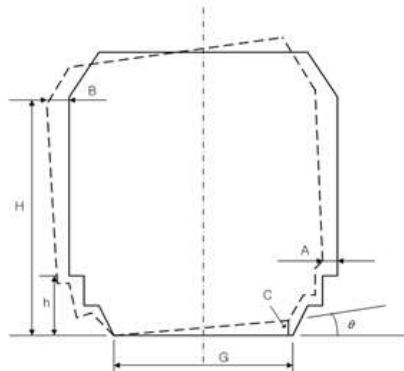
$$\delta_1 = \frac{l^2}{8R} * 1000(mm) = 40500/R,$$

$$\delta_2 = \frac{m(l+m)}{2R} * 1000(mm) = 44000/R$$

각각에 여유를 두어 $\frac{50000}{R}$ mm

②슬랙 : $S = \frac{1000 \cdot L^2}{8R} - S'$ S' : 조정값 (0~15mm)

③캔트 경사량 :

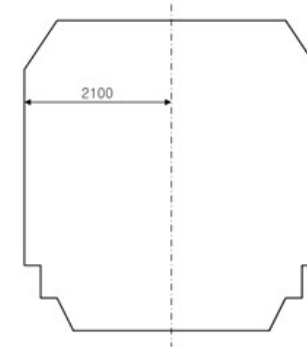


$$\tan \theta = \frac{c}{G} = \frac{B}{H} = \frac{A}{h}$$

- 내측편의량 $B = C \frac{H}{G} = C \frac{3600}{1500} = 2.4C$

- 외측편의량 $A = C \frac{h}{G} = C \frac{1250}{1500} = 0.8C$

④평탄선의 건축한계 :



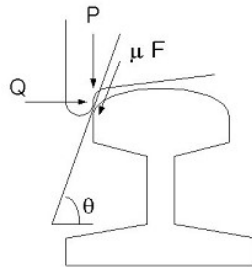
곡선에서의 건축한계 :

①차량 편의량 + ②슬랙 + ③캔트 경사량 + ④평탄선의 건축한계

- 내궤에서는 $W = \frac{50000}{R} + S + 2.4C + 2100$

- 외궤에서는 $W = \frac{50000}{R} - 0.8C + 2100$

가. 차륜 답면이 레일로부터 미끄러지는 미끄럼 탈선의 경우,



여기서, P : 윤중
Q : 횡압
 θ : 차륜 플랜지 각도
 μ : 차륜-레일간 마찰 계수

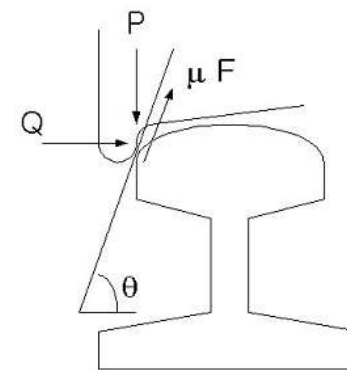
그림에서, 차륜 플랜지가 이루는 각도선상의 힘의 역학관계에서,
아래 방향으로 작용하는 힘 $P \sin \theta + \mu(Q \sin \theta + P \cos \theta)$ 가
윗 방향으로 작용하는 힘 $Q \cos \theta$ 보다 크면 되므로,

$$Q \cos \theta < P \sin \theta + \mu(Q \sin \theta + P \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

탈선 계수의 정의인 횡압-윤중比 로 표현하면, 다음과 같다.

$$\frac{Q}{P} < \frac{\tan \theta + \mu}{1 - \mu \tan \theta} \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

나. 차륜 답면이 떠서 레일로 올라타는 탈선의 경우,

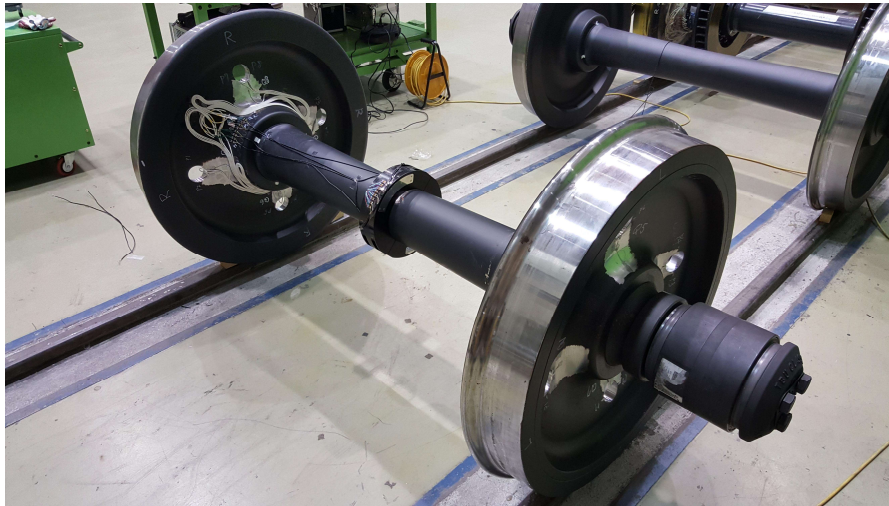


아래 방향으로 작용하는 힘 $P \sin \theta$ 가
윗 방향으로 작용하는 힘 $Q \cos \theta + \mu(P \cos \theta + Q \sin \theta)$ 보다 크면 되므로,

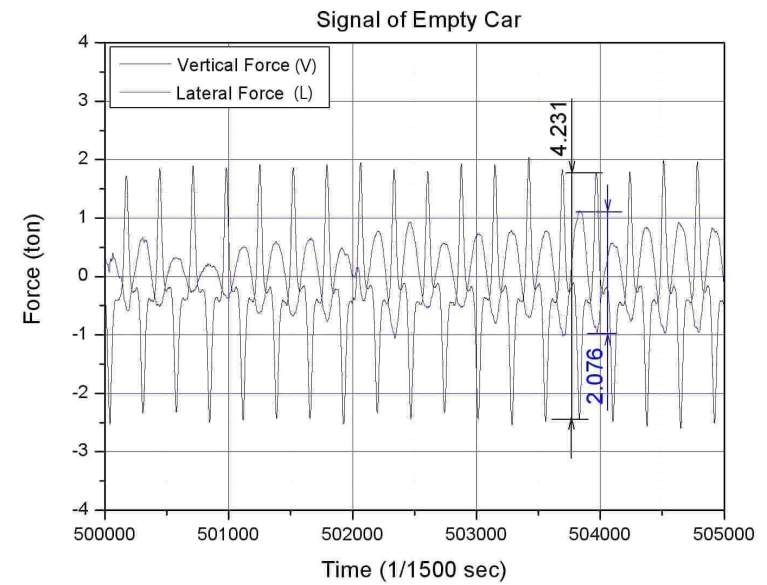
$$P \sin \theta \geq Q \cos \theta + \mu(P \cos \theta + Q \sin \theta) \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

$$\text{정리하면, } \frac{Q}{P} \leq \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

플랜지각 θ 를 증대시키면 탈선 안전이 증대되나 플랜지 마모량이 증가하여
차륜수명이 짧아지며, 탈선계수는 안전을 고려하여 대략 $\frac{Q}{P} \leq 0.8$ 로 한다.



탈선 계수 측정 시험 및 계측 결과



미끄럼 탈선

$$\frac{Q}{P} < \frac{\tan\theta + \mu}{1 - \mu \tan\theta}$$

타오름 탈선

$$\frac{Q}{P} < \frac{\tan\theta - \mu}{1 + \mu \tan\theta}$$

$$\tan 60^\circ = 1.73 \quad \tan 65^\circ = 2.14 \quad \mu = 0.2$$

	$\frac{\tan\theta + \mu}{1 - \mu \tan\theta}$	$\frac{\tan\theta - \mu}{1 + \mu \tan\theta}$
$\tan 60^\circ \quad \mu = 0.2$	2.95	1.14
$\tan 65^\circ \quad \mu = 0.2$	4.09	1.36
$\tan 60^\circ \quad \mu = 0.25$	3.49	1.03

플랜지각이 커지면, 탈선 안전도는 증가, 플랜지 마모 증가

마찰계수가 커지면, 미끄럼 탈선 안전도는 증가, 타오름 탈선 안전도는 감소

주행 저항 (曲線 유선형)



50년



125년



$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d V^2 A$$

F_d : 공기 저항력

ρ : 공기 밀도

C_d : 공기 저항 계수

V^2 : 차량 속도

A : 차량 전면 면적

$$F = a V^2 + b V + c$$



형태	공기저항계수	형태	공기저항계수
구체 → 	0.47	원통형 → 	0.62
반구체 → 	0.42	짧은 원통형 → 	1.15
원뿔 → 	0.50	물방울 형상 → 	0.04
정육면체 → 	1.06	물방울 반쪽 → 	0.09
45도 회전시킨 정육면체 → 	0.80		



감사합니다.

