

국철구간 300m 장대레일 적재 화차의 적정주행속도 결정에 관한 연구

Study on Determination of Optimal Speed of Freight Car Loading 300m CWR on KNR Line

양 신 추*, 김 은**, 정우진***
S. C. Yang, E. Kim, W. J. Chung

ABSTRACT

In this study, a numerical method which assesses running stability of freight car loading 300m CWR and structural safety of conventional railway track when passing over curves and steel girder bridges is presented. Optimal speed of the freight car is suggest on the basis of numerical reviews for stability of derailment of the freight car and structural safety of track at weak points of the conventional line

1. 서 론

본 연구에서는 300m 장대레일을 적재한 화물열차가 국철구간을 통과할 때 곡선, 분기부, 판형교 구간에서 주행안정성 및 궤도구조안정성 정량적으로 평가하는 기법을 제시하였다. 또한 제시된 평가방법을 사용하여 실제 충북선 및 경부선구간의 선형 및 궤도 취약개소에서 열차 속도에 따른 장대레일 적재 화차의 탈선안정성 및 궤도구조안정성을 평가함으로써 향후 대구이남 고속철도 궤도공사에 사용될 장대레일 수송시 적정 주행속도를 제시하였다.

2. 장대레일화차의 탈선안전성 검토

2.1. 화차의 기본제원

1량당 길이는 19.57m로서 300m 장대레일을 적재하는 화차는 총 16량이며, 장대레일을 고정하는 클램프 사이간격은 9.57m이다. 각 제원은 표 1,2와 같다.

표 1. 용접대차 제원

항 목	제 원
유형	볼스차대차
현수장치	1차 : 총16개 스프링으로 구성 2차 : 없음
좌우 1차현수장치 거리	1.956m
고정축거	1.80m
대차중심거리	13.0m

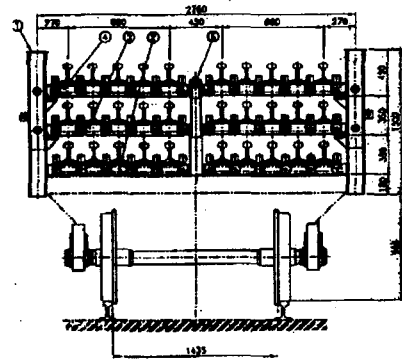


그림 1 장대레일 적재 단면

* 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 책임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 주임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 선임연구원, 정회원

표 2. 화차의 무게중심고

차량	공차시 무게중심고	장대레일 무게중심고	영차시 유효무게중심고
중간화차	0.69m	1.31m	1.28m
선두화차	0.69m	1.31m	1.18m

2.2 검토대상 선로조건

오송~대구간 장대레일 운반구간에 서 곡선반경이 작은 구간, 편형교구간 중에서 취약하다고 판단되는 5개 개소를 선정하여 검토하였다.

2.3 장대레일이 화차에 작용하는 횡하중 계산

앞쪽 차축의 바깥쪽 레일에서 가장 큰 횡압이 발생하도록 클램프에 작용하는 하중의 방향을 가정하였으며, 또한 하중의 크기도 전체 클램프에서 가장 큰 하중이 작용하는 것으로 가정하여 횡압을 계산하였다.

표 3은 외측축 전축횡압을 계산한 결과를 나타낸 것이다.

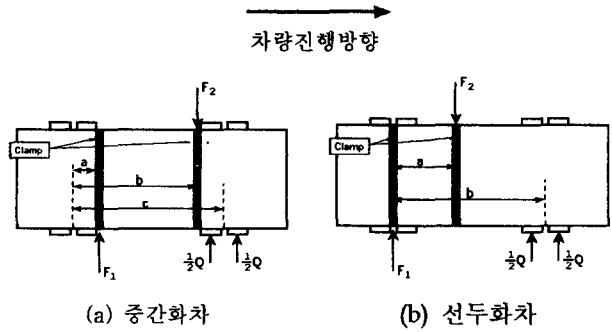


그림 2. 클램프에 횡하중이 작용할 경우 앞쪽 차량위치에서 레일의 반력 계산

표 3. 장대레일에 의하여 발생하는 횡압

Site 번호	클램프에 작용하는 최대횡하중 (ton)		$(F_2 - F_1)/4$	레일에 작용하는 최대횡하중 (ton)		하중작용 높이 (m)	비고	
	중간화차	선두화차		중간화차	선두화차		중간화차	선두화차
Site 1		$F_1=0.925$ $F_2=0.775$	-0.038		0.186	1.66	$a=1.81m$ $b=11.4m$ $c=13.0m$	$a=6.25m$ $b=13.0m$
Site 2-1		$F_1=1.562$ $F_2=1.299$	-0.066		0.376	1.66	"	"
Site 2-2	$F_1=5.375$ $F_2=5.277$		-0.025	1.939		1.66	"	"
Site 4	$F_1=3.286$ $F_2=3.273$		-0.003	1.207		1.66	"	"
Site 5	$F_1=0.763$ $F_2=0.721$		-0.011	0.263		1.66	"	"

2.4 윤중의 추정식

2.4.1 원심력에 의한 윤중의 증감

장대레일 화차가 곡선부를 주행할 경우 장대레일이 휘어지게 하기 위한 힘이 장대레일 클램프를 통하여 작용하게 된다. 이러한 힘은 역으로 차량에 가해지는 외력이 되고 역시 윤중변동을 유발하는 원인이 된다. 이러한 경우의 윤중변동은 그림 3으로부터 외력의 방향을 원심력과 동일하다고 가정하면 다음과 같이 유도된다.

$$\bar{P}_i = \frac{W_0}{2} \left[\left((2 - \gamma) + \frac{v^2}{gR} \cdot \frac{C}{G} \right) - \frac{H_g}{G/2} \cdot \left(\frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right] + F(C/2G - H_f/G) \quad (1)$$

$$\overline{P}_o = \frac{W_0}{2} \left[\left(\gamma + \frac{v^2}{gR} \cdot \frac{C}{G} \right) + \frac{H_g^*}{G/2} \cdot \left(\frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right] + F(C/2G + H_F/G) \quad (2)$$

여기서 \overline{P}_o : 바깥쪽 레일 윤증정상분(kN), \overline{P}_i : 안쪽 레일 윤증정상분(kN), γ : 바깥쪽 레일 차륜의 정지윤증비, W_0 : 정적축중(kN), v : 주행속도(m/s), G : 궤간(m), C : 캔트(m), R : 곡선반경(m), g : 중력가속도(9.8m/s²), H_g^* : 차량유효중심 높이(m)(비진자차량의 경우, 실제차량 중심 높이의 1.25배로 한다), F : 장대레일로부터 차량에 가해지는 하중, H_F^* : 레일 상면으로부터 외력이 작용하는 점까지의 유효높이이다

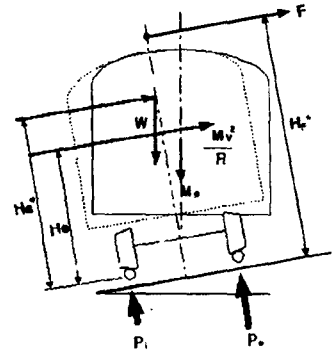


그림 3 곡선부 윤증변화

2.4.2 선로면의 비틀어짐에 의한 윤증증감

완화곡선부에서는 캔트체감에 따른 선로면의 비틀어짐에 의해, 1차 현수장치 스프링 및 2차 현수장치 스프링의 신축에 의한 윤증증감이 생긴다. 선로면의 굴절에 의한 윤증증감의 메카니즘을 고려한 정적윤증증감분의 추정식은 다음식과 같다.[1]

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

$$K_{\phi} = \frac{1}{\frac{1}{4k_1 b_1^2} + \frac{1}{2k_2 b_2^2}}, \quad k_{\phi 1} = 2k_1 b_1^2, \quad \Delta t_c = \frac{2c}{a_{TC}} + t_c, \quad \Delta t_a = \frac{2a}{a_{TC}} + t_a$$

여기서 $\overline{\Delta P}$: 평면성 굴절에 의한 정적윤증증감소분(kN), K_{ϕ} : 종합회전스프링정수(kN·m/rad), $k_{\phi 1}$: 대차의 종합회전스프링 정수(kN·m/rad), $2b$: 좌우접촉점 간격(m), $2b_1$: 좌우 1차 현수장치 스프링 간격(m), $2b_2$: 좌우 2차 현수장치 스프링 간격(m), k_1 : 상하 1차 현수장치 스프링 정수/1축당(kN/m), k_2 : 상하 2차 현수장치 스프링정수/대차편축당(kN/m), Δt_c : 대차중심간 평면성 굴절(m), Δt_a : 축거 평면성 굴절(m), $2a$: 축간거리, $2c$: 대차중심간 거리(m), a_{TC} : 캔트체감배율, t_c : 캔트체감분을 제외한 대차중심간 평면성 굴절(m), t_a : 캔트체감분을 제외한 축거 평면성 굴절(m)이다

2.4.3 공기 스프링의 비틀림에 의한 윤증증감

곡선통과시에 차체·대차간에 생긴 상대회전변위에 의해 2차 현수장치 스프링으로써 사용되고 있는 공기스프링에 비틀림이 생기면, 그 반력 F_1 이 윤축횡압으로서 선로에 작용한다.

곡선부에서 공기스프링의 변형에 의하여 발생하는 수평하중 F' 는 다음 식과 같다.

$$F' = k \times b_2 \tan \phi = kb_2 \frac{c}{R} \quad (4)$$

여기서 k 는 2차 현수장치 스프링 전후강성(kN/m)이다. 대차에 발생하는 모멘트는 다음 식으로 구해진다.

$$M = 2 \times F' \times b_2 = \frac{2kb_2^2 c}{R} = a(F_1 + F_2) = \frac{2kb_2^2 c}{R} \quad (5)$$

따라서 외궤측 레일에 작용하는 횡압은 다음식으로 나타내어진다.

$$F_1 = \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{aR} \quad (6)$$

2.4.4 바깥레일·안쪽레일 윤중의 추정식

원심력, 선로면의 비틀어짐 및 공기 스프링의 비틀어짐의 세 가지 요소를 고려하여, 안쪽 및 바깥쪽 레일의 윤중은 다음식으로 구해진다.

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

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

여기서 ΔP : 평면성 굴절에 의한 정적윤중감소(kN), F_1 : 공기스프링의 비틀림에 의한 윤축횡압(kN), η : F_1 의 윤중성분의 보정계수로서, β 에 따라 식(4.13)과 같이 결정된다.

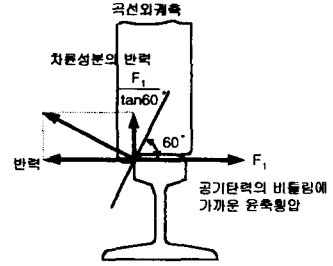


그림 4 공기스프링의 비틀어짐에 의한 윤중증가의 메카니즘

2.5 횡압추정식

2.5.1 안쪽레일의 마찰력에 의한 곡선전향횡압

안쪽레일측 차륜 레일간의 마찰계수(=안쪽레일측 횡압윤중비)가 클수록 곡선전향횡압은 커진다. 이 마찰력(곡선전향횡압)에 상당하는 안쪽레일측 횡압정상분은 다음식과 같다.

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

안쪽 레일측 횡압윤중비 κ 는, 시각력 시뮬레이션에 의한 계산결과 및 실측데이터를 기초로하여 차륜답면형상별(기본과 원호 또는 수정원호)에 따라 다음 식으로 주어진다.

2.5.2 원심력, 공기스프링의 비틀림, 외력에 의한 윤축횡압

차체에 가해지는 외력을 고려한 횡압정상분은 다음 식으로 표시된다.

$$\Delta Q_{AS} = W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + F_1 + F = W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2k b_2^2 c}{aR} + F \quad (10)$$

여기서 ΔQ_{AS} 는 윤축횡압정상분이다.

2.5.3 궤도 뒤틀림·이음부충격에 의한 횡압변동분

궤도뒤틀림, 특히 줄틀림이 있는 경우에는 차량동요에 의한 관성력에 의하여 윤축횡압의 변동분이 발생한다. 또 레일이음부에서는 충격적인 횡압의 변동분이 발생하며, 이것은 속도가 높을수록 커진다. 이상에 따른 윤축횡압변동분 성분들은 각각 다음 식으로 나타내질 수 있다.[2]

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

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

여기서 ΔQ_{AD} : 윤축횡압변동분(kN), σ_Z : 궤도줄틀림 표준편차(mm), k_Q : 윤축횡압변동계수 (1/mm/(km/h)), ΔQ_{imsb} : 이음부의 횡압변동분 (kN), ϵ : 이음부의 횡압변동분의 유효분 (%)이다

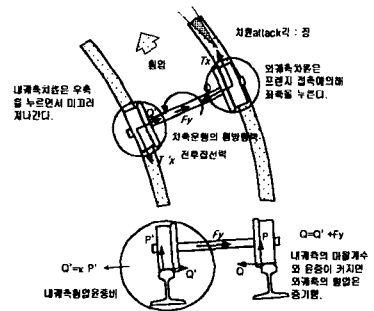


그림 5. 곡선전향횡압 발생 메카니즘

2.5.4 바깥 레일측횡압의 추정식

안쪽레일측의 마찰력에 의한 전향횡압, 원심력 및 공기 스프링의 뒤틀림, 외력에 의한 윤축횡압, 케도틀림 및 이음부충격에 의한 윤축횡압분 등을 고려하여 바깥 레일측 횡압은 다음식으로 구할 수 있다

$$Q_o = \overline{Q_i} + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + Q_{unsp} \quad (13)$$

3. 주행안전성 검토

해석대상 개소별 선로조건은 표 4와 같고, 장대레일화차의 주행안전성을 검토하기 위한 차량동특성은 표 5와 같다.

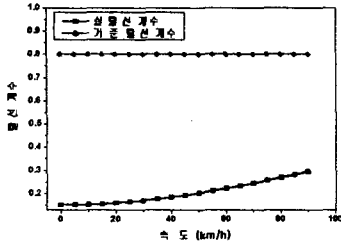
표 4. 해석대상 개소별 선로조건

구 간	해석번호	곡선반경 (m)	캔트량 (mm)	캔트체감율 (배)	슬랙 (mm)
경부선(하) 181km220~182km439	Site 1	600	150	500	(최대, 최소) 6
경부선(하) 189km909~191km800	Site 2-1	402	150	553	9
	Site 2-2	402	150	546	9
경부선(하) 197km970~199km652	Site 4	800	150	667	5
충북선 0km300~1km800	Site 5	402	150	600	9

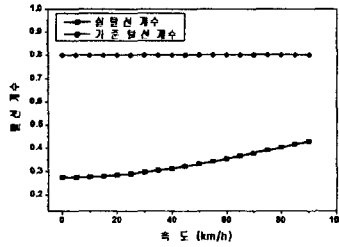
표 5. 탈선안정성 검토를 위한 파라메타

항 목	단 위	수 치
차량 유효중심높이	선두화차	(m) 1.180
	중간화차	(m) 1.280
장대레일 횡하중높이		(m) 1.66
정적축중	선두화차	(kN) 97
	중간화차	(kN) 123
바깥쪽바퀴 차륜의 정지윤증비		1.0
축거	(m)	1.8
대차중심간거리	(m)	13.0
좌우 1차 현수장치 스프링 간격	(m)	1.956
좌우 2차 현수장치 스프링간격	(m)	1.534
궤간	(m)	1.435
1차 현수장치 상하스프링 정수(1축당)	(MN/m)	8.78
2차 현수장치 상하스프링상수(대차편축당)	(MN/m)	0.10
2차 현수장치 전후강성(대차편축당)	(MN/m)	-
차륜플랜지각	(°)	60
차륜담면형상		기본담면
바깥바퀴 플랜지부 마찰계수 μ		0.3

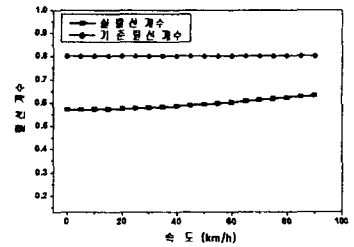
그림 6은 각각의 해석대상구간에서 탈선계수를 화차주행속도별로 구한 결과이다. 이들 결과로부터 모든 개소에서의 탈선계수는 속도 90km/h까지 탈선계수는 기준인 0.8을 충분히 만족함을 알 수 있다. 따라서 탈선안전측면에서 90km/h까지 속도제한이 필요 없음을 알 수 있다.



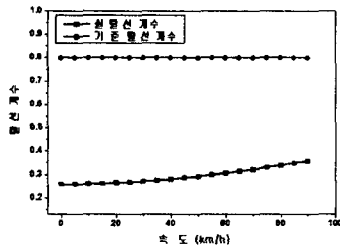
(a) Site 1 구간 통과시



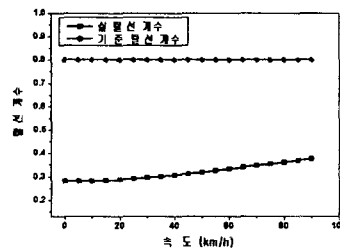
(b) Site 2-1 구간 통과시



(c) Site 2-2 구간 통과시



(d) Site 4 구간 통과시



(e) Site 5 구간 통과시

그림 6. 각 구간 통과시 선두화차의 탈선계수

4. 판형교구간 침묵이동에 대한 안전성 검토

판형교가 있는 해석구간에서 검토대상 화차의 축중은 표 6과 같다. 본 연구에서는 침묵 1개당 축중 및 횡압부담율을 실제 보다 안전측으로 각각 30%, 55%정도로 가정하였다. 따라서 침묵 1개당 축중은 표 7과 같고, 판형교상에 목침묵이 있는 경우 수직하중이 작용할 경우 목침묵은 횡방향으로 침묵고정장치에 의한 저항력에 의해 수직하중 × 마찰계수의 횡저항력이 추가된다. 마찰계수를 0.3 정도로 가정하면 침묵 1개당 횡저항력은 표 8과 같다.

표 6. 판형교구간이 있는 해석대상 화차의 축중

구분	Site 1 (선두화차)	Site 2-1 (선두화차)	Site 4 (중간화차)
축중(kN)	97.1	97.1	123.0

표 7. 판형교구간 침묵 1개당에 작용하는 축중

구분	Site 1	Site 2-1	Site 4
축중(kN)	29.1	29.1	36.9

표 8. 시속 90km/h일 때 판형교구간 침묵 1개당 횡압

구분	Site 1	Site 2-1	Site 4
횡저항력(kN) (마찰저항+고정장치저항)	14.7	14.7	17.1

판형교구간 침묵이동에 대한 안전성 검토를 한 결과, 표 8의 침묵저항력을 넘지 않는 개소별 열차속도는 대체로 65km/h 정도임을 알 수 있다.

5. 판형교 수평이동에 대한 안전성 검토

장대레일이 고정클램프에 작용하는 하중은 클램프마다 거의 교대로 하중방향이 바뀌고 그 크기가 비슷하므로 판형교 전체에 작용하는 횡하중은 크지 않으며, 따라서 판형교 전체가 횡이동할 우려는 매우 작다고 판단된다.

6. 체결장치 구조안전성 검토

앞 절에서 계산되어진 장대레일화차가 해석구간 통과시 발생하는 외래측 윤증과 횡압을 고려하여 체결장치의 안전성을 검토하였다. 검토결과는 표 9와 같으며, 체결클립은 팬드를 e-clip으로 하여 검토하였다.

표 9 체결장치 안전성 검토결과

위 치	구분 속도	윤증 W	레일수직입 력 W1(kg)	횡하중 H	레일횡입력 H1(kg)	Cext	레일경각각 φ (rad)	레일두부의 횡 방향변위 δ1(cm)	허용범위	
									횡압에 대한 저부횡변위 δ2(cm)	레일두부의 횡방향총변 위 (cm)
site1	90	1.466	467.539	1.390	872.356	15438.595	0.002	0.032	0.015	0.047
site2-1	90	1.591	507.392	1.868	1172.625	21512.012	0.003	0.045	0.020	0.065
site2-2	90	2.047	652.671	3.125	1961.741	37218.838	0.005	0.078	0.033	0.111
site4	90	1.778	566.918	1.891	1187.340	21448.552	0.003	0.045	0.020	0.065
site5	90	2.602	829.652	2.714	1703.781	30676.438	0.004	0.064	0.028	0.093

위 치	구분 속도	경차에 의한 체결구 위치변위 (cm)	레일입력과 횡압에 의한 체결력+(kg)	레일입력과 횡압에 의한 체결력-(kg)	초기체결력에 대한 패드압 력변위 (cm)	허용범위		전단응력 (kg/cm ²)
						0 < 체결력 < 1033.684	허용범위 총변위 < 0.15	
site1	90	0.012	982.426	1002.339	0.042	0.010	0.052	0.825
site2-1	90	0.017	977.860	1005.606	0.042	0.010	0.052	1.109
site2-2	90	0.030	965.363	1013.368	0.042	0.013	0.055	1.855
site4	90	0.017	976.931	1004.595	0.042	0.012	0.054	1.123
site5	90	0.025	966.699	1006.266	0.042	0.017	0.059	1.611

검토결과 90km/h의 주행시에도 체결장치는 안전함을 알 수 있었다.

7. 클램프 구조안전성 검토

7.1 제동시 종방향 수평력의 계산

표 10. 제동시 종방향 수평력

속도 (km/h)	총제동거리 (S)	공주거리 (S ₀)	실제제동거리 (S _a)	제동시 감가속도 a=0.5V ² /S(m/s ²)	수평력(F) F=ma(kgf)	20개 장대레일 수평력(kgf)
120	729.6	166.7	562.9	0.99	1827	36540
110	633.8	152.8	481.0	0.97	1791	35820
100	542.7	138.9	403.8	0.96	1772	35440
90	456.8	125.0	331.8	0.94	1735	34700
80	376.7	111.1	265.6	0.93	1717	34340
70	302.9	97.2	205.7	0.92	1698	33960
60	236.0	83.3	152.7	0.91	1680	33800

7.2 응력 검토

$$\begin{aligned} \sigma &= 36,540\text{kgf}/36\text{cm}^2 \\ &= 1015\text{kg}/\text{cm}^2 < \text{탄성범위}(4000\text{kg}/\text{cm}^2) \text{ O.K.} \end{aligned}$$

8. 결 론

300m 장대레일을 20개 적재하여 운반하는 화차가 기존선 곡선구간을 통과할 때 장대레일의 휨에 의하여 발생하는 횡하중에 따른 열차의 주행안정성과 궤도의 구조안정성을 열차속도대역별로 검토하여 합리적인 열차통과속도를 결정하고자 기술검토를 수행하였다.

기존선 장대레일 운반구간에서 곡선반경이 작은 구간, 판형교 구간중에서 특히 장대레일 횡하중이 크게 발생하거나, 궤도구조가 취약하다고 판단되는 5개 구간을 선정하여 탈선에 대한 주행안정성을 검토한 결과 모든 경우 속도 90km/h까지 탈선계수 0.8를 넘지 않음을 알 수 있었다.

판형교구간에서 교량침목고정장치의 이동에 대한 안전성을 검토한 결과 구간에 따라 다소의 차이는 있었지만 열차속도를 65km/h로 제한할 필요가 있음을 알 수 있다.

또한 체결장치의 전도안전성을 검토한 결과 분기기구간을 제외한 나머지 구간에서 90km/h까지 안전함을 알 수 있었다.

이상의 검토로부터 장대레일 수송화차 주행안정성을 고려한 운송속도를 구간별로 다음과 같이 제한하는 것이 추천된다.

표 11. 장대레일화차의 주행안정성을 고려한 구간별 운송속도

구간	제한속도	비고
본선구간	70	장대레일 운송화차의 속도제한의 국제적 규정중 가장 엄격한 일본 신간선 기준적용
판형교구간	65	본 기술검토결과 반영
역구내 분기기구간	10	장대레일 운송화차의 속도제한의 국제적 규정중 가장 엄격한 프랑스, 독일 기준적용

참 고 문 헌

1. “궤도기술 : 운중횡압 추정식에 의한 탈선에 대한 안정성 평가”, 内田雅夫의 3인, 철도총연보 고서 2001. 4
2. “신선로-궤도구조와 관리”, 삼포중 외 3인, 사단법인 일본철도시설협회
3. “Modern Railway Track”, Coenraad Esveld, MRT-Productions, 2001