

300m 장대레일 적재 화차의 기존선구간 적정 주행속도 결정에 관한 연구

Determination of Optimal Speed of the Freight Car Transporting 300m CWR on KNR Line

이희성*, 양신추*
Hisung LEE, S. C. Yang

ABSTRACT

In this study is presented a numerical method which assesses running safety of the freight car loading with 300m CWR and structural safety of conventional railway track and fastening when passing over sharp curves and steel girder bridges. Optimal speed of the freight car is suggested based on the numerical reviews of the safety against derailment of the freight car and structural safety of track and fastening at vulnerable points of the conventional line.

주요기술용어 : Freight car(화차), Running safety(주행 안전성), Structural safety(구조 안전성), Continuous welded rail(장대레일), Fastening(체결장치)

1. 서론

본 연구에서는 300m 장대레일 수송 화차가 기존선 구간을 통과할 때 적재된 장대레일의 휨에 의해서 발생하는 횡하중에 따른 열차의 주행안정성 및 궤도구조안정성을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 평가방법을 사용하여 실제 장대레일을 운반하는 기존선(경부선 및 충북선)의 곡선반경이 작은 구간에서 화차가 주행할 경우에 열차속도 대역별로 발생하는 윤중과 횡압을 계산하여 탈선계수를 구한 후에 기준치와 비교하여 장대레일 적재 화차의 탈선안전성을 평가하였다. 또한 차량이 판형교 구

간을 통과 할 때 침목의 횡이동에 대한 구조안전성과 적재된 장대레일에 의한 횡하중 증가에 따른 체결구의 구조 안전성을 평가하였다. 이와 같은 3가지 평가를 통하여 고속철도 궤도 공사에 사용될 장대레일 수송화차의 적정 주행속도를 제시하였다.

2. 장대레일 적재 화차의 탈선안전성 검토

2.1. 화차의 기본제원

장대레일 적재 화차는 총 16량 1편성으로 구성되는데, 1량당 길이는 19.57m이며, 장대레일을 고정하는 클램프 사이의 간격은 9.57m로써 적재단면형상은 Fig. 1과 같다. 용접대차 제원과

* 회원, 한국철도기술연구원

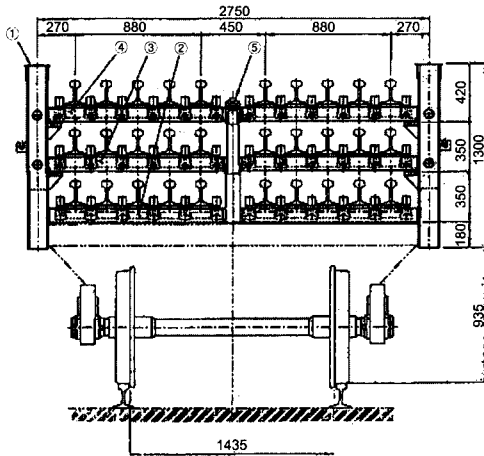


Fig. 1 Cross section of the freight car loaded with CWR

Table 1 Characteristics of welded bogie

항목	제원
유형	볼스차 대차
현가장치	1차: 총 16개 스프링으로 구성 2차: 없음

Table 2 Center of the gravity(measured from the top of the rail)

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

선두화차 및 중간화차의 무게중심 수치는 각각 Table 1, 2와 같다.

2.2 검토대상 선로조건

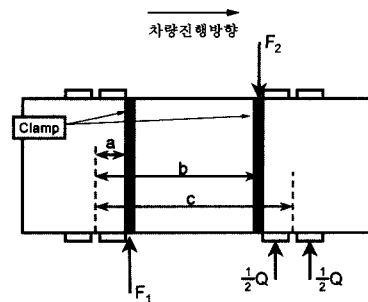
오송-대구간 장대레일 운반구간에서 곡선반경이 작은 구간, 관형교 구간 중에서 취약하다고 판단되는 5개 개소를 Table 3과 같이 선정하였다.

Table 3 Track conditions of every section under analysis

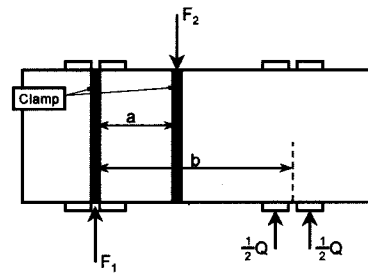
구간	해석번호	곡선반경 (m)	캔트량 (mm)	캔트체감율 (배)	슬래 (mm)
경부선(하) 181km220~182km439	Site 1	600	150	500	6
	Site 2-1	402	150	553	9
경부선(하) 189km909~191km800	Site 2-2	402	150	546	9
	Site 4	800	150	667	5
충북선 0km300~1km800	Site 5	402	150	600	9

2.3 장대레일에 의한 화차의 횡하중

외측 레일의 앞쪽 차축에서 가장 큰 횡압이 발생하도록 클램프에 작용하는 하중의 방향을 가정하였다. 또한 하중의 크기도 전체 클램프에서 가장 큰 하중이 작용하는 것으로 가정하여 횡압을 계산하였다. Fig. 2는 클램프에 횡하중이 작용하는 경우 앞쪽 차륜의 위치에서 레일의 반력 계산 개념도이며, Table 4는 그 계산 결과이다.



(a) 중간화차



(b) 선두화차

Fig. 2 Calculation of rail reaction force on the front wheel with lateral load applied on the clamp

2.4 윤중 추정식

2.4.1 원심력에 의한 윤중 증감

장대레일 수송 화차가 곡선부를 주행할 경우

Table 4 Lateral load due to transporting CWR

Site 번호	클램프에 작용하는 최대횡하중(ton)		(F2-F1)/4	레일에 작용하는 최대횡하중(ton)		하중작용 높이 (m)	비고	
	중간화차	선두화차		중간화차	선두화차		중간화차	선두화차
Site 1		F1=0.925 F2=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		F1=1.562 F2=1.299	-0.066		0.376	1.66	"	"
Site 2-2	F1=5.375 F2=5.277		-0.025	1.939		1.66	"	"
Site 4	F1=3.286 F2=3.273		-0.003	1.207		1.66	"	"
Site 5	F1=0.763 F2=0.721		-0.011	0.263		1.66	"	"

적재된 장대레일이 휘어지게 하기 위한 힘이 장대레일 클램프를 통하여 작용하게 된다. 이러한 힘은 역으로 차량에 가해지는 외력이 되고 또한 윤중변동을 유발하는 원인이 된다.

이러한 경우의 윤중변동은 Fig. 3으로부터 외력의 방향을 원심력과 동일하다고 가정하면 다음 식과 같다.

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

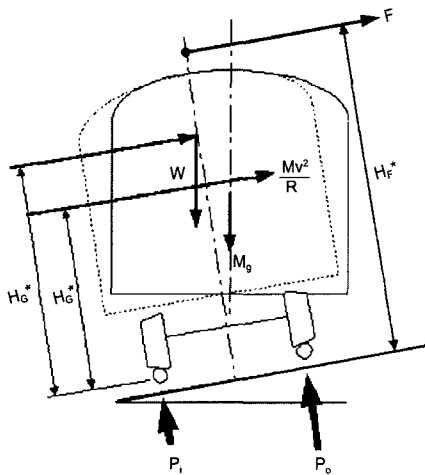


Fig. 3 Wheel load change in curves

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

여기서, \overline{P}_o : 외측 레일 윤중정상분(kN), \overline{P}_i : 내측 레일 윤중정상분(kN), v : 외측레일쪽 차량의 정지윤중비, W_0 : 정적축중(kN), v : 주행속도 (m/s), G : 궤간(m), C : 캔트(m), R : 곡선반경 (m), g : 중력가속도(9.8m/s²), H_G^* : 레일 상면으로부터 차량유효중심높이(m)(틸팅차량이 아닌 경우, 실제차량중심높이의 1.25배), F : 장대레일로부터 차량에 가해지는 하중, H_F^* : 레일 상면으로부터 장대레일 적재에 의한 횡하중 작용점까지의 유효높이이다.

2.4.2 선로면 비틀림에 의한 윤중증감

완화곡선부에서는 캔트체감에 따른 선로면의 비틀림에 의해, 1차 및 2차 현가장치 스프링의 변형에 의한 윤중증감이 발생한다. 선로면의 비틀림에 의한 윤중증감의 메카니즘을 고려한 정적 윤중증감분은 다음 식과 같다.¹⁾

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

단, $K_{\phi} = \frac{1}{\frac{1}{4k_1b_1^2} + \frac{1}{2k_2b_2^2}}$, $k'_{\phi 1} = 2k_1b_1^2$,

$\Delta t_c = \frac{2c}{a_{TC}} + t_c$, $\Delta t_a = \frac{2a}{a_{TC}} + t_a$

여기서, $\overline{\Delta P}$: 평면성 비틀림에 의한 정적윤증 감소분(kN), K_{ϕ} : 종합 회전스프링 상수(kN·m/rad), $k'_{\phi 1}$: 대차의 종합 회전스프링 상수(kN·m/rad), $2b$: 좌우접촉점 간격(m), $2b_1$: 좌우 1차 현가장치 스프링 간격(m), $2b_2$: 좌우 2차 현가장치 스프링 간격(m), k_1 : 상하 1차 현가장치 스프링 상수/1축당(kN/m), k_2 : 상하 2차 현가장치 스프링 상수/대차편축당(kN/m), Δt_c : 대차중심간 평면성 비틀림(m), Δt_a : 축거 평면성 비틀림(m), $2a$: 고정축거, $2c$: 대차중심간 거리(m), a_{TC} : 캔트체감배율, t_c : 캔트체감분을 제외한 대차중심간 평면성 비틀림(m), t_a : 캔트체감분을 제외한 축거 평면성 비틀림(m)이다.

2.4.3 공기스프링의 비틀림에 의한 윤증증감

곡선통과시에 차체와 대차간에 발생하는 상대회전변위에 의해 2차 현가장치로 사용하는 공기스프링에 비틀림이 발생하면, 그 반력 F_1 은 윤축횡압으로서 Fig. 4와 같이 선로에 작용한다.

곡선부에서 공기스프링의 변형에 의하여

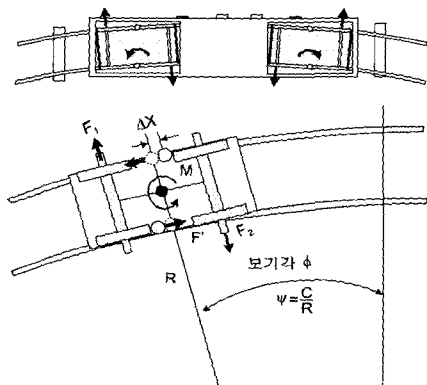


Fig. 4 Mechanism of wheel load fluctuation due to the twist of air spring

발생하는 수평하중 F' 는 다음 식과 같다.

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

여기서, k 는 2차 현가장치인 공기스프링의 전후강성(kN/m)이다.

대차에 발생하는 모멘트는 다음 식으로 구해진다.

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

따라서, 외측 레일에 작용하는 횡압은 다음 식과 같다.

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

여기서, β 는 보정계수이다.¹⁾

2.4.4 내·외측 레일의 윤증추정식

원심력, 선로면의 비틀림 및 공기스프링의 비틀림의 세가지 요소를 고려하면, 내측 및 외측 레일의 윤증은 다음 식과 같다.

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

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

여기서, ΔP : 선로면의 비틀림에 의한 정적윤증 감소(kN), F_1 : 공기스프링의 비틀림에 의한 윤축횡압(kN), η : F_1 의 윤증성분의 보정계수로써, β 에 따라 다음과 같이 결정된다.

$\eta = 1(\beta > 0)$, $\eta = 0(\beta \leq 0)$

2.5 횡압 추정식

2.5.1 내측레일의 마찰력에 의한 곡선폭방향횡압

곡선통과시의 대차 앞쪽축의 외측레일의 차륜은 Fig. 5와 같이 플랜지가 레일에 접촉함에 따라 안쪽차륜은 레일상면을 미끄러지면서 내측

으로 이동하면서 주행하게 되고, 이때 내측레일 쪽에 마찰력이 작용한다. 이에 대한 반력으로 외측레일 쪽에 곡선전향횡압이 작용한다. 이때 곡선전향횡압(마찰력)에 상당하는 내측레일측 횡압정상분은 다음과 같다.

$$\overline{Q}_i = \kappa P_i \tag{9}$$

여기서, κ 는 내측 레일측 횡압윤증비이다.

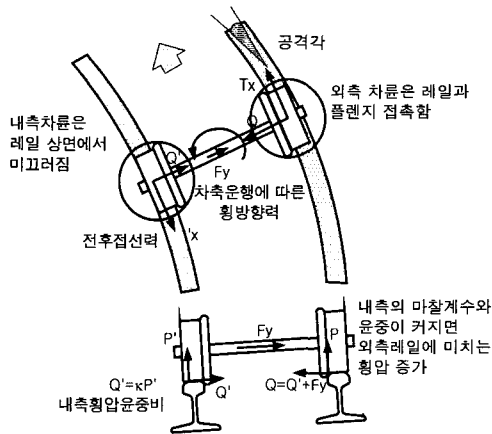


Fig. 5 Mechanism of lateral loads of front wheel in curves

2.5.2 원심력, 공기스프링의 비틀림, 외력에 의한 윤축횡압

차체에 가해지는 외력을 고려한 횡압정상분은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta Q_{AS} &= W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + F_1 + F \\ &= W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2kb_2^2c}{aR} + F \end{aligned} \tag{10}$$

여기서, ΔQ_{AS} 는 윤축의 횡압정상분이다.

2.5.3 궤도틀림, 이음부충격에 의한 횡압변동분

궤도틀림, 특히 줄틀림이 있는 경우에는 차량동요에 의한 관성력에 의해서 윤축횡압의 변동분이 발생한다. 또한 레일이음부에는 충격에 의

한 횡압변동분이 발생하며, 이것은 속도가 증가할수록 커진다. 이들에 따른 윤축횡압변동분 성분들은 각각 다음 식과 같다.²⁾

$$\Delta Q_{AD} = 3W_0 k_Q \sigma_Z V \tag{11}$$

$$\Delta Q_{unsp} = \left\{ \frac{\epsilon}{100} \right\} \times \left\{ \frac{2500}{R} + 4 \right\} \frac{V}{100} \tag{12}$$

여기서, ΔQ_{AD} : 윤축의 횡압변동분(kN), σ_Z : 궤도줄틀림 표준편차(mm), k_Q : 윤축의 횡압변동계수(1/mm/(km/h)), ΔQ_{unsp} : 레일이음부의 횡압변동분 (kN), ϵ : 레일이음부의 횡압변동분의 유효분(%)이다.

2.5.4 외측레일의 횡압추정식

내측레일측의 마찰력에 의한 전향횡압, 원심력 및 공기 스프링의 뒤틀림, 외력에 의한 윤축횡압, 궤도틀림 및 이음부충격에 의한 윤축횡압등을 고려하여 외측 레일의 횡압은 다음식과 같다.

$$Q_o = \overline{Q}_i + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + Q_{unsp} \tag{13}$$

3. 주행안전성 검토

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

Fig. 6은 각각의 해석대상구간에서 탈선계수를 화차주행속도별로 계산한 결과이다. 이들 결과로부터 모든 개소에서의 탈선계수는 속도 90km/h까지 기준탈선계수인 0.8^{2,3)}을 충분히 만족함을 알 수 있다. 따라서 탈선안전측면에서 90km/h까지 속도제한이 필요 없음을 알 수 있다.

4. 판형교 구간 침묵이동에 대한 안전성 검토

판형교가 있는 해석구간에서 검토대상 화차의 축중은 Table 6과 같다.

Table 5 Parameters for the safety review against derailment

항 목	단 위	수 치
차량 유효 중심 높이(H_G^*)	선두화차	1.180
	중간화차	1.280
장대레일 적재에 의한 횡하중 작용점 높이(H_F^*)	m	1.66
정적축중(W_0)	선두화차	97
	중간화차	123
외측레일쪽 차륜의 정지윤증비(ν)		1.0
고정축거(2a)	m	1.8
대차중심간거리(2c)	m	13.0
좌우 1차 현가장치 스프링 간격(2b1)	m	1.956
좌우 2차 현가장치 스프링 간격(2b2)	m	1.534
궤간(G)	m	1.435
1차 현가장치 상하 스프링상수/축(k_1)	MN/m	8.78
2차 현가장치 상하 스프링상수/대차편축(k_2)	MN/m	0.10
2차 현가장치 전후강성/대차편축(k)	MN/m	-
차륜플랜지각	°	60
외측 차륜의 플랜지부 마찰계수(μ)		0.3

Table 6 Axle load respective freight car in steel girder bridge sections

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

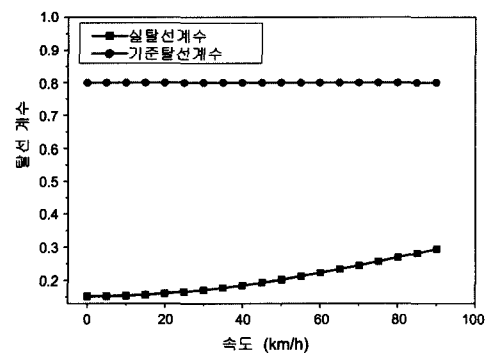
Table 7 Axle load applied on one sleeper in steel girder bridge sections

구 분	Site 1	Site 2-1	Site 4
축중(kN)	29.1	29.1	36.9

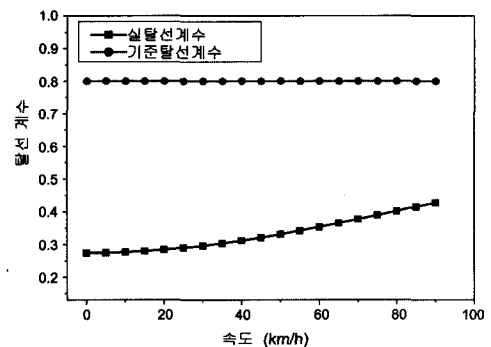
본 연구에서는 침목 1개당 축중 및 횡압부담을 일반적으로 검측된 수치보다 안전측으로 하여 각각 30%, 55%정도로 가정하였다. 따라서 침목 1개당 축중은 Table 7과 같고, 판형교상에 목침목이 있는 경우 수직하중이 작용할 경우 목침목은 횡방향으로 침목고정장치에 의한 저항력외에 수직하중×마찰계수의 횡저항력이 추가된다. 침목고정장치 횡저항력은 계측된 수치인 5.97kN을 사용하고 마찰계수를 0.3으로 가정하면 침목 1개당 횡저항력은 Table 8과 같다.

이에 따라 판형교 구간 열차속도 대역별 침목 1개당 작용하는 횡압은 Table 9와 같으므로,

Table 8의 침목횡저항력을 넘지 않는 개소별 적정 열차속도는 대체로 65km/h 정도로 판단된다.



(a) Site 1 구간 통과시



(b) Site 2-1 구간 통과시

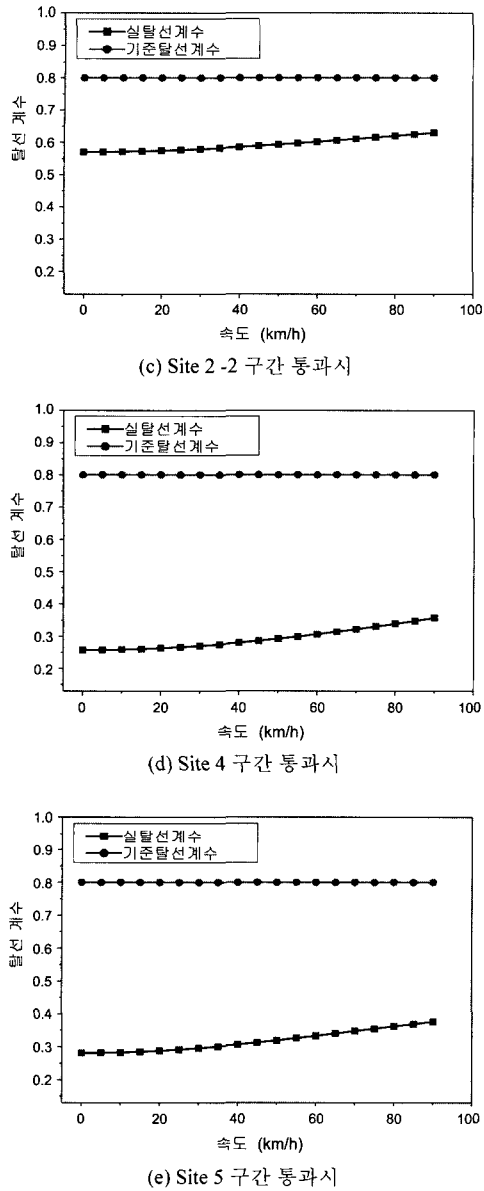


Fig. 6 Derailment coefficient of the front freight car when passing respective sections

Table 8 Lateral load applied on one sleeper in steel girder bridge sections with the train running at 90km/h

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

Table 9 Lateral load applied on one sleeper depending on train speed

열차속도 (km/h)	Site 1	Site 2-1	Site 4
0	3.3131	5.9617	7.0891
5	3.6606	6.3264	7.5076
10	4.0363	6.7313	7.9542
15	4.4404	7.1765	8.4288
20	4.8727	7.6618	8.9315
25	5.3333	8.1874	9.4622
30	5.8222	8.7531	10.0209
35	6.3395	9.3591	10.6078
40	6.8850	10.0054	11.2226
45	7.4588	10.6918	11.8655
50	8.0609	11.4185	12.5365
55	8.6913	12.1854	13.2355
60	9.3500	12.9924	13.9626
65	10.0370	13.8398	14.7177
70	10.7523	14.7273	15.5008
75	11.4958	15.6550	16.3121
80	12.2677	16.6230	17.1513
85	13.0679	17.6312	18.0186
90	13.8964	18.6795	18.9140

5. 체결장치 구조안전성 검토

장대레일 수송 화차가 5개소의 해석구간 통과시에 외측 레일의 운중과 횡압을 고려하여 팬드를 e-clip으로 설치된 체결장치의 안전성을 검토하였다. Table 10, 11은 검토결과 및 허용범위를 나타내며, 검토결과 90km/h의 주행시에도 체결장치는 안전함을 보여주고 있다.

6. 결론

300m 장대레일을 20개 적재하여 운반하는 화차가 기존선 곡선구간을 통과할 때 장대레일의 힘에 의하여 발생하는 횡하중에 따른 열차의 주행안정성과 궤도의 구조안정성을 열차속도대역별로 분석하여 합리적인 열차통과속도를 결정하였다.

Table 10 Calculation results for safety of fastening devices

위치	Site1	Site2-1	Site2-2	Site4	Site5
속도	90	90	90	90	90
구분					
윤중 W	1.466	1.591	2.047	1.778	2.602
레일 수직압력 W1(kg)	467.5	507.4	652.7	566.9	829.7
횡하중 H	1.390	1.868	3.125	1.891	2.714
레일횡압력 H1(kg)	872.4	1172.6	1961.7	1187.3	1703.8
Cext	15438.	21512.	37218.	21448.	30676.
레일 경좌각 Ψ (rad)	0.002	0.003	0.005	0.003	0.004
레일두부의 횡방향변위 $\delta 1$ (cm)	0.032	0.045	0.078	0.045	0.064
횡압에 대한 저부횡변위 $\delta 2$ (cm)	0.015	0.020	0.033	0.020	0.028
레일두부의 횡방향 총변위(cm)	0.047	0.065	0.111	0.065	0.093
경좌에 의한 체결구위치 변위(cm)	0.012	0.017	0.030	0.017	0.025
레일압력과 횡압에 의한 체결력+(kg)	982.4	977.9	965.4	976.9	966.7
레일압력과 횡압에 의한 체결력-(kg)	1002.3	1005.6	1013.4	1004.6	1006.3
초기체결력에 대한 패드 압력변위 (cm)	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
레일압력에 대한 패드 압력변위 (cm)	0.010	0.010	0.013	0.012	0.017
레일압력에 의한 총변위 (cm)	0.052	0.052	0.055	0.054	0.059

Table 11 Allowable criteria

항 목	최 대	최 소
레일변위	-	0.4
체결력(kgf)	0	1033.7
패드총변위(cm)	-	0.15
전단응력(kg/cm ²)	-	6

기존선 장대레일 운반구간에서 곡선반경이 작은 구간, 판형교 구간 중에서 특히 장대레일 적재화차에 의해서 횡하중이 크게 발생하거나, 궤도구조가 취약하다고 판단되는 5개구간을 선정하여 탈선안전성을 해석한 결과 모든 경우에 속도 90km/h까지 탈선계수 0.8을 넘지 않았다.

판형교 구간에서 침목고정장치의 이동에 대한 안전성을 분석한 결과 구간에 따라 다소의 차이는 있었지만 열차속도를 65km/h로 제한할 필요가 있다.

또한 체결장치의 구조안전성을 검토한 결과 90km/h까지 안전하였다.

참 고 문 헌

- 1) 内田雅夫, 高井秀之, 村松造成, 石田弘明, 軌道技術: 輪重横壓 推定式による乗い上がりの脱線に対する安全性 評價, 鐵道總研報告書, 2001.
- 2) 須田征男, 長門 章, 徳岡研三, 新しい線路-軌道の構造と管理, 三浦 重 編, 社團法人 日本鐵道施設協會, 1997.
- 3) C. Esvelde, Modern Railway Track, MRT-Productions, 2nd Edition, 2001.
- 4) J. Alias, La Voie Ferree, EYROLLES, 1984.