

장대레일 화차의 분기부 및 곡선구간 통과시 추가횡압 발생에 관한 연구

Characteristic of Additional Lateral Force Induced by Freight Car Loading CWR When Passing over Turnout and Curves

김 은* 양신추** 이지하*** 이종득****
E. Kim S. C. Yang J. H. Lee J. D. Lee

ABSTRACT

This research suggests the assessment method of the additional lateral force caused bending moment of CWR when a freight car loading it is passing over turnout system or curves. The characteristics of lateral force are analyzed by calculating the lateral pressure acting on the rails of conventional railway.

1. 서론

본 연구에서는 장대레일 화차가 분기부 및 곡선구간을 통과할 때 장대레일 굽힘에 따른 추가 발생 횡하중을 유한요소해석법을 사용하여 평가하는 기법을 제시하였다. 또한 이들 추가 횡하중을 고려한 레일에 발생하는 횡압의 평가기법을 제시한 후, 제시된 기법을 사용하여 장대레일 화차가 국철구간을 통과할 때 발생하는 횡압을 계산함으로써 구간별 장대레일 화차의 횡압 특성을 분석하였다.

2. 장대레일 화차 및 선로조건

화차의 1량당 길이는 19.57m로서 300m 장대레일을 적재하는 화차는 총 16량이며, 장대레일을 고정하는 클램프 사이간격은 9.57m이다.

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

장대레일이 적재된 화차의 각 제원은 표 1과 같으며, 선두 및 중간화차의 무게중심은 표 2과 같다.

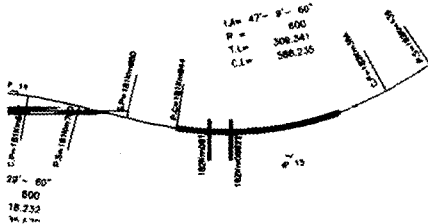
표 2. 화차의 무게중심

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

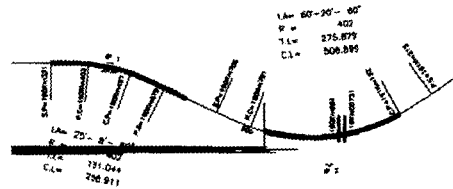
* 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 주임연구원 정희원
** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 주임연구원 정희원
*** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 주임연구원 정희원
**** 한국철도대학 교수 정희원

2.2 선로조건

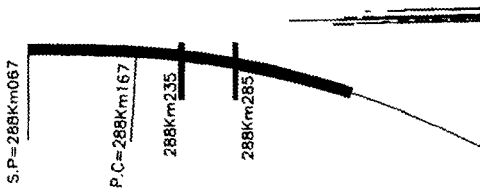
장대레일 운반구간(오송~신천간)에서 곡선반경이 작은 구간, 판형교구간 중에서 취약하다고 판단되는 개소를 선정하여 검토하였다. 그림 1은 선정구간을 나타내고, 표 3은 검토대상 구간의 선형특성을 정리한 것이다.



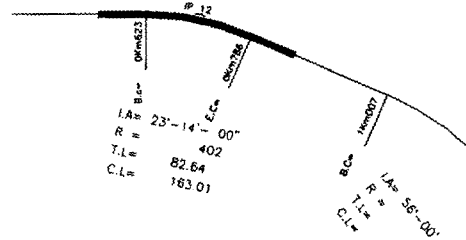
(a) 경부선(하) (삼거리천판형교)



(b) 경부선(하) (강청천판형교구간)



(c) 경부선(하) (288km067~289km026)



(d) 충북선 (0km300~1km800)



(e) 오송개도기지 분기기구간

그림 1. 황암해석 대상구간

표 3. 해석 대상구간별 특성

구 간	해석번호	비 고
경부선(하) 181km220~182km439 구간	Site 1	판형교구간
경부선(하) 189km909~191km800구간	Site 2-1	급곡선구간(R=402m곡선)
	Site 2-2	판형교구간
경부선(하) 197km970~199km652구간	-	곡선반경 R=600m 이상 구간
경부선(하) 197km970~199km652구간	Site 4	판형교구간
충북선 0km300~1km800구간	Site 5	원곡선+직선구간
오송역 #12분기기	Site 6	분기기 구간

3. 장대레일이 화차에 가하는 횡하중 산출

장대레일화차가 곡선구간을 통과할 수 있도록 하기 위해서는 클램프를 통하여 장대레일에 외력을 가함으로써 장대레일이 선형에 맞게 휘어지게 하여야 한다. 이 경우 반대로 차량은 클램프 위치에서 장대레일로부터 외력에 대한 반력으로서 횡하중을 받게 된다. 따라서 장대레일 화차의 주행안전성과 하부구조물의 안전성을 검토하기 위해서는 장대레일이 차량에 작용하는 횡하중의 계산이 필요하다.

본 연구에서 계산과정에 적용된 기본 가정은 다음과 같다.

- (i) 장대레일 횡하중은 클램프 위치에 작용한다.
- (ii) 곡선통과시 장대레일 클램프의 위치는 선로선형과 동일한 위치에 있다.
- (iii) 장대레일은 종방향으로는 자유로이 움직일 수 있고, 곡선훈경은 궤간에 비하여 충분히 크므로 총 20개의 장대레일은 각각 동일한 횡하중을 유발한다. 즉 차량에 작용하는 전체 횡하중은 한 개의 장대레일이 유발하는 횡하중을 계산하여 장대레일 개수를 곱함으로써 구한다.
- (iv) 장대레일이 클램프에 작용하는 총 횡하중의 작용점은 장대레일의 무게중심과 동일하고 지평면과 평행하다.
- (v) 클램프에서 레일은 횡방향 변위만 구속되어 있고 나머지 방향(나머지 자유도)은 자유롭게 움직인다.
- (iv) 장대레일의 횡방향으로의 이동은 기준선에 대하여 직각방향으로 움직인다.

그림 2는 장대레일 화차에 설치된 클램프 위치를 나타낸다.

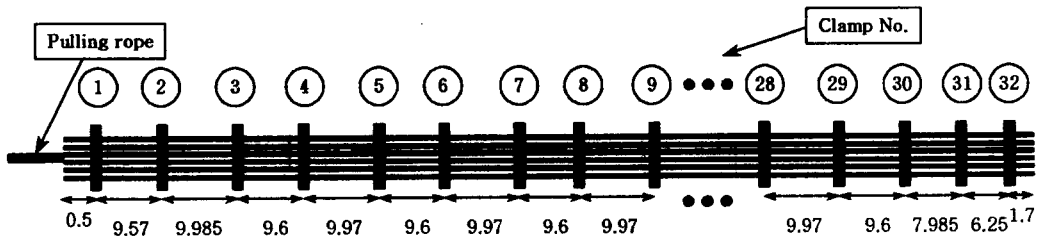
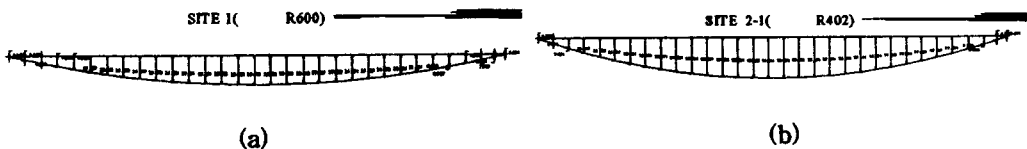


그림 2. 장대레일화차의 클램프 위치

3.1 클램프에 작용하는 횡하중 계산

유한요소해석을 통해 각 횡변위는 클램프 위치에서의 변위조건으로 입력되었다. 입력변위 지점에서 구해지는 반력을 장대레일이 차량에 작용하는 횡하중으로 간주하였다.

그림 3은 선정된 개소들에 대하여 장대레일 횡하중을 계산하기 위하여 클램프 위치에서 기준선으로부터 선로까지의 거리를 나타낸 것이다. 각 횡변위는 유한요소 해석에서 클램프 위치에서 변위조건으로 입력되었으며, 입력변위 지점에서 구해지는 반력을 장대레일이 차량에 작용하는 횡하중으로 간주하였다.



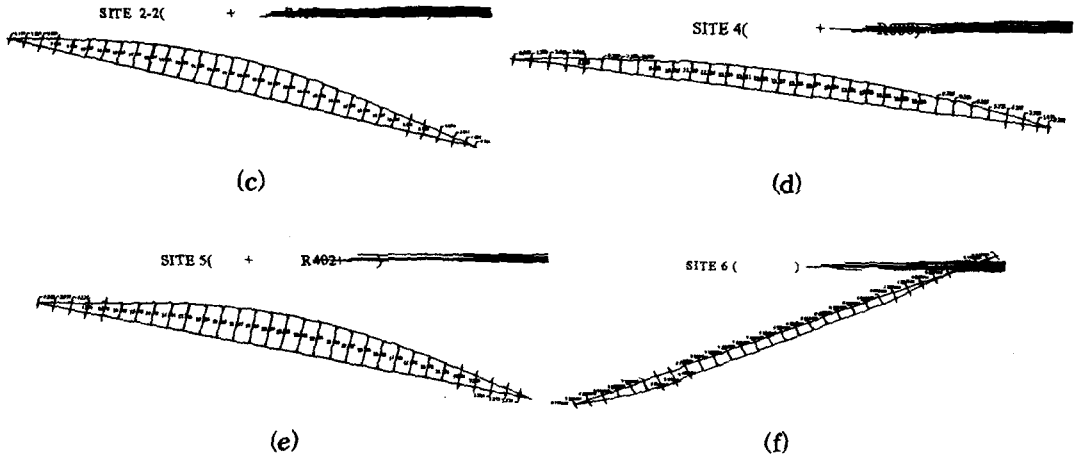


그림 3. 기준선으로부터 선로까지의 클램프 횡방향 이동거리

그림 4는 각 개소에서 장대래일 횡하중의 계산결과를 클램프 위치별로 나타낸 것이다.

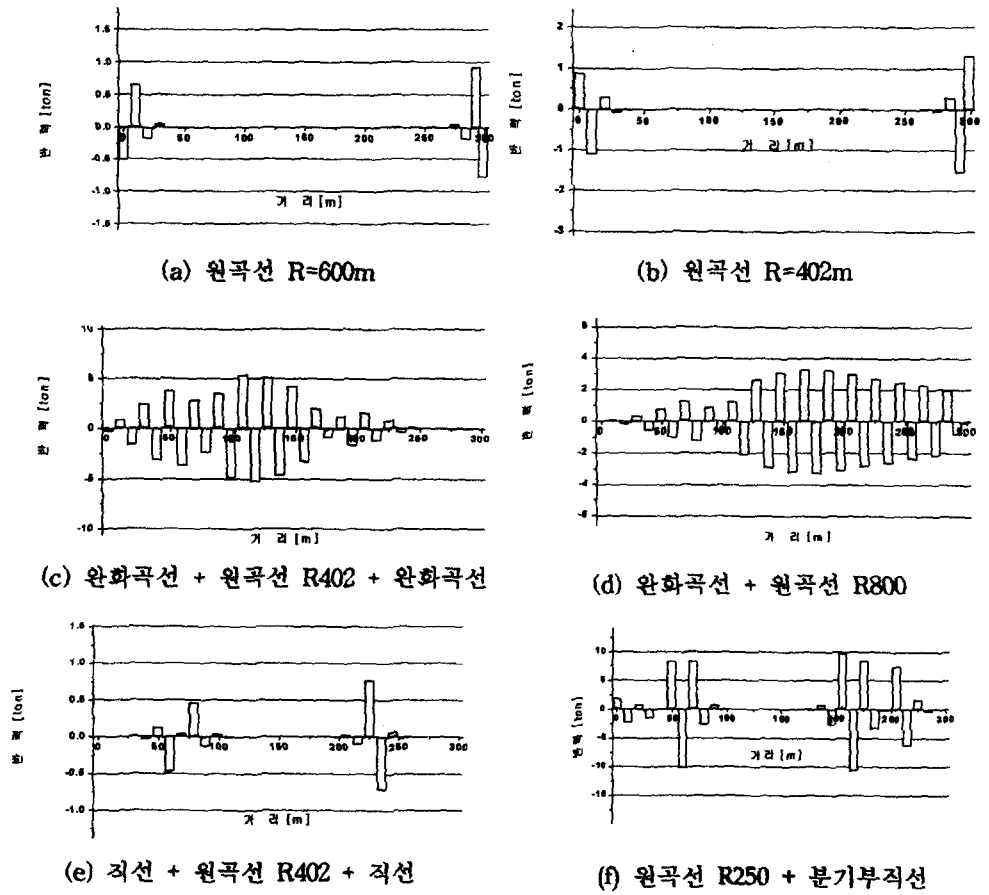


그림 4. 클램프에 작용작용하는 하중

Site 1은 R=600m인 원곡선구간의 해석결과를 나타낸 그림 4(a)로부터 차량에 가해지는 횡하중

은 주로 선두화차 및 후미화차에 있는 두 개의 클램프를 통하여 작용하는 것을 알 수 있다. 이것은 선두 및 후미화차의 클램프가 장대레일을 원곡선 선형에 맞게 휘게 하면 장대레일은 나머지 클램프가 거의 하중을 작용하지 않아도 원곡선 선형에 맞게 유지되는 것을 의미한다. R=402m(Site 2-1) 원곡선구간의 결과를 나타낸 그림 4(b)의 결과에서도 Site 1과 동일함을 알 수 있으며, 곡선반경이 작을 수록 발생하는 횡하중도 큰 것을 알 수 있다.

R=402m의 원곡선 양측에 완화곡선이 있는 Site 2-2와 Site 4에 대한 해석결과를 나타낸 그림 4(c), 4(d)로부터, 장대레일이 원곡선과 완화곡선에 걸쳐 있으면 원곡선구간에만 걸쳐 있는 경우와는 매우 다른 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 원곡선 중앙부에 가장 큰 횡하중이 교번으로 발생하고 완화곡선 가장자리로 갈수록 횡하중이 적게 발생하는 것을 알 수 있다.

원곡선 양측에 완화곡선이 없고 직접 직선으로 연결된 Site 5의 해석결과를 나타낸 그림 4(e)로부터 원곡선과 직선이 만나는 곳에서 횡하중이 크게 발생하고 그 특징은 원곡선구간의 해석결과와 유사함을 알 수 있다. 각 개소에서 장대레일이 차량에 작용하는 횡하중의 최대값과 대응하는 클램프 번호를 표 4에 나타내었다. 단, 여기서 +, - 부호는 하중의 작용방향을 나타내며, 부호는 곡선 외측으로 작용하는 하중을 나타낸다.

표 4 개소별 최대 횡하중 및 발생위치

Site	최대하중 작용위치(m)	Clamp 번호	최대횡하중 [ton]
1	292.05	No. 31	$F_1=-0.925$
	298.3	No. 32	$F_2=0.775$
2-1	292.05	No. 31	$F_1=-1.562$
	298.3	No. 32	$F_2=1.299$
2-2	117.905	No. 13	$F_1=-5.375$
	127.505	No. 14	$F_2=5.277$
4	166.645	No. 18	$F_1=-3.286$
	176.615	No. 19	$F_2=3.273$
5	225.355	No. 24	$F_1=-0.763$
	235.325	No. 25	$F_2=0.721$
6	59.195	No. 7	$F_1=-11.570$
	68.795	No. 8	$F_2=9.700$

3.2 레일에 작용하는 횡하중 계산

곡선부에서 차량의 탈선은 주로 앞쪽 대차에서 전축의 바깥쪽 차륜이 레일을 타고 넘음으로서 발생한다. 따라서 탈선에 대한 안전성을 검토하기 위해서는 전축 외곽의 차륜을 통하여 전달되는 횡압의 계산이 필요하다.

앞서의 결과들에서도 알 수 있듯이 클램프에 작용하는 횡하중의 작용방향은 횡하중이 클 경우 인접 클램프의 반대방향이 되는 것을 알 수 있었다. 이러한 횡하중은 차량에 회전모멘트를 발생시키고 따라서 차륜에서 횡압을 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 앞쪽 차축의 바깥쪽 레일에서 가장 큰 횡압이 발생하도록 클램프에 작용하는 하중의 방향을 가정하였으며, 또한 하중의 크기도 전체 클램프에서 가장 큰 하중이 작용하는 것으로 가정하였다.

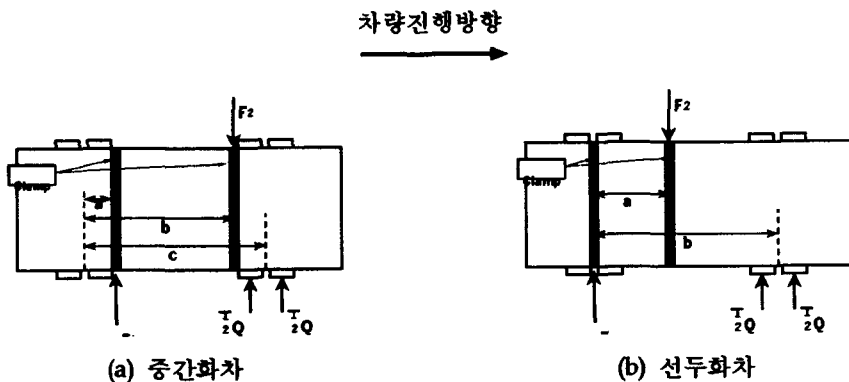


그림 5. 클램프에 횡하중이 작용할 경우 앞쪽 차륜위치에서 레일의 반력 계산

그림 5는 클램프에 횡하중이 작용할 경우 앞쪽대차에서 앞쪽차축의 바깥쪽 차륜위치에서 반력을 계산하기 위한 개념도이다. 그림에서 나타난 바와 같이 앞쪽 차축의 바깥쪽 차륜 위치에서의 반력은 앞쪽대차에 발생하는 횡하중의 1/2를 부담하는 것으로 가정하였다. 이 경우 중간화차(그림 5(a))에 대해서는 앞쪽 차축의 바깥쪽 차륜 위치에서의 레일에 작용하는 횡하중은 다음 식으로 구해지고

$$F_{QL} = \frac{1}{2} Q = \frac{1}{2} \frac{bF_2 - aF_1}{c} \quad (1)$$

선두화차에서 대해서는 다음 식으로 구해진다.

$$F_{QL} = \frac{1}{2} Q = \frac{a}{2b} F_2 \quad (2)$$

표 5 장대레일에 의하여 발생하는 횡압

Site 번호	클램프에 작용하는 최대횡하중(ton)		(F ₂ -F ₁)/4	레일에 작용하는 최대횡하중(ton)		하중작용 높이 (m)	비 고	
	중간 화차	선두 화차		중간 화차	선두 화차		중간 화차	선두 화차
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	"	"

한편 장대레일 횡하중에 의한 윤증변화를 계산하기 위한 하중은 다음과 같다.

$$F_{QV} = \frac{1}{4} (F_2 - F_1) \quad (3)$$

해석개소 대상별로 앞차축 위치에서 횡하중을 계산하면 표 5와 같이 정리될 수 있다.

4. 장대레일화차의 주행속도에 따른 횡압발생 계산

4.1 안쪽레일의 마찰력에 의한 곡선전향 횡압

곡선통과시의 대차전축의 바깥레일의 차륜은 플랜지가 레일에 접촉함에 따라 안쪽차륜은 레일 상면을 미끄러지면서 내측으로 이동하면서 주행하게 되고, 따라서 안쪽레일쪽에 마찰력(윤증×마찰계수)이 작용한다. 이에 대한 반력으로서 바깥 레일쪽에는 횡압 즉 곡선전향횡압이 작용한다.

안쪽레일쪽 차륜 레일간의 마찰계수(=안쪽레일측 횡압윤증비)가 클수록 곡선전향횡압은 커진다. 이 마찰력(곡선전향횡압)에 상당하는 안쪽레일측 횡압정상분은 다음식과 같다.[1]

$$\overline{Q}_i = x P_i \quad (4)$$

$$\overline{P}_i = \frac{W_0}{2} \left[\left\{ (2 - \gamma) + \frac{v^2}{gR} \cdot \frac{C}{G} \right\} - \frac{H_g^*}{G/2} \cdot \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} \right] + F(C/2G - H_F/G) \quad (5)$$

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^* : 차량유효중심높이(m)(비진자차량의 경우, 실제차량 중심 높이의 1.25배로 한다), F : 장대레일로부터 차량에 가해지는 하중, H_F^* : 레일 상면으로부터

외력이 작용하는 점까지의 유효높이이다

4.2 원심력, 공기스프링의 비틀림, 외력에 의한 윤축횡압

곡선통과시의 차량에는 곡선반경, 캔트 및 속도에 의존한 원심력이 작용하여, 이것에 의해 정상적인 윤축횡압이 생긴다. 주행속도가 균형속도이하(캔트초과)의 경우에는 바깥레일측에 대해서는 마이너스 횡압이 되어, 균형속도이상(캔트 부족)의 경우에는 플러스의 횡압이 된다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 곡선통과시의 차체/대차간의 상대회전변위에 의해 2차 현수장치 스프링인 공기스프링에 비틀어짐이 생기면, 그 반력이 윤축횡압이 발생한다.

따라서 차체에 가해지는 외력을 고려한 횡압정상분은 다음 식으로 표시된다.

$$\Delta Q_{AS} = W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + F_1 + F = W_0 \left\{ \frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right\} + \beta \times \frac{2kb_2^2 c}{\Delta R} + F \quad (6)$$

여기서 ΔQ_{AS} 는 윤축횡압정상분이다.

4.3 궤도 뒤틀림, 이음부 충격에 의한 횡압 변동분

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

$$\Delta Q_{AD} = 3W_0 k_Q \sigma_z V, \quad \Delta Q_{Limp} = \left\{ \frac{\epsilon}{100} \right\} \times \left\{ \frac{2500}{R} + 4 \right\} \frac{V}{100} \quad (7)$$

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

4.4 바깥 레일측 횡압의 추정식

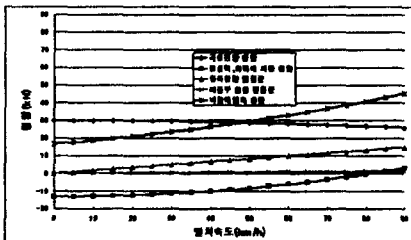
안쪽레일측의 마찰력에 의한 전향횡압, 원심력 및 공기 스프링의 뒤틀림, 외력에 의한 윤축횡압, 궤도틀림 및 이음부충격에 의한 윤축횡압분 등을 고려하여 바깥 레일측 횡압은 다음식으로 구할 수 있다

$$Q_o = \overline{Q_i} + \Delta Q_{AS} + \Delta Q_{AD} + Q_{Limp} \quad (8)$$

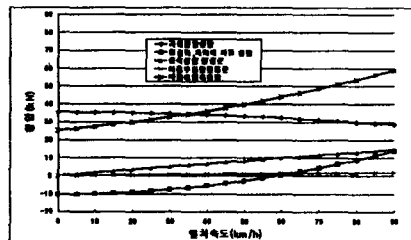
여기서 Q_o : 외측측횡압(kN), $\overline{Q_i}$: 내측측횡압정상분 (kN), ΔQ_{AS} : 윤축횡압정상분 (kN), ΔQ_{AD} : 궤도틀림에 의한 윤축횡압변동분(kN), Q_{Limp} : 레일이음부 횡압변동분(kN)이다.

4.5 해석결과

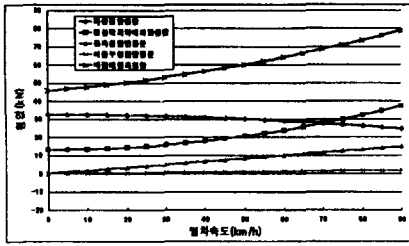
그림 6은 주행 중 가장 안전성의 위협을 받게되는 선두화차에 의하여 발생한 횡압성분 및 총 횡압량을 계산한 결과이다.



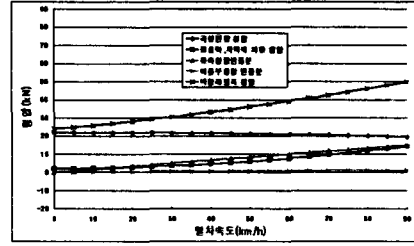
(a) Site 1 해석결과



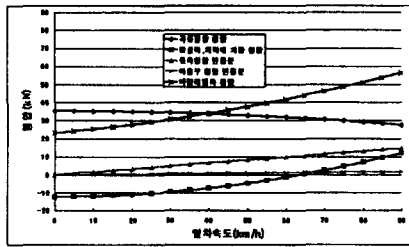
(b) Site 2-1 해석결과



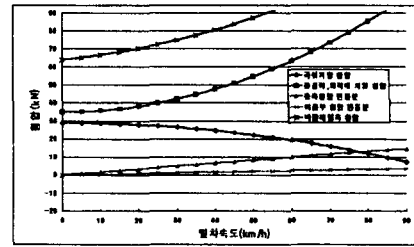
(c) Site 2-2 해석결과



(d) Site 4 해석결과



(e) Site 5 해석결과



(f) Site 6 해석결과

그림 6. 해석결과

이들 결과로부터 모든 횡압성분이 속도증가에 따라 증가 하나 곡선전향횡압은 속도증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 6(b)와 6(c)의 결과로부터 같은 곡선반경일지라도 원곡선구간을 통과할 때보다도 원곡선 양쪽에 완화곡선이 있는 경우 횡압이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 6(e)로부터 원곡선 양쪽에 직선이 직접 붙은 경우는 완화곡선이 있는 경우와 다르게 횡압이 증가하지 않은 것을 알 수 있다. 분기기구간 해석결과를 나타낸 그림 6(f)로부터 분기기구간은 타 구간에 비하여 곡률변화가 심하기 때문에 횡압이 매우 크게 발생하므로 열차주행시 서행이 요망됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 장대레일 화차가 분기부 및 곡선구간을 통과할 때 장대레일 굽힘에 따른 추가 발생 횡하중을 유한요소해석법을 사용하여 평가하는 기법을 제시하였다. 장대레일 클램프로부터 화차에 작용하는 횡하중은 원곡선구간에서는 주로 선두화차 및 후미화차에 있는 두 개의 클램프를 통하여 횡하중이 작용하는 것을 알 수 있다. 또한 곡선반경이 작을수록 발생하는 횡하중도 큰 것을 알 수 있다. 장대레일 화차가 국철구간을 통과할 때 발생하는 차량이 외궤측레일에 작용하는 횡압을 계산한 결과로부터 모든 횡압성분이 속도증가에 따라 증가하지만, 곡선전향횡압은 속도증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 같은 곡선반경일지라도 원곡선구간을 통과할 때보다도 원곡선 양쪽에 완화곡선이 있는 경우 횡압이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 원곡선 양쪽에 직선이 직접 붙은 경우는 완화곡선이 있는 경우와 다르게 횡압이 증가하지 않은 것을 알 수 있다. 분기기구간은 타 구간에 비하여 곡률변화가 심하기 때문에 횡압이 매우 크게 발생하므로 열차주행시 서행이 요망됨을 알 수 있다.

참고문헌

1. “궤도기술 : 윤중횡압 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