급곡선 주행 안정화를 위한 주행방향 크리피지 특성 최적화 연구

Optimization of Characteristics of Longitudinal Creepage for Running Stability on Sharp Curved Track

심경석 · 박태원* · 이진희 · 김남포

Kyung-Seok Sim · Tae-Won Park · Jin-Hee Lee · Nam-Po Kim

Abstract Urban railway vehicles operate in downtown areas. Due to increases in the number of passengers and changes in the service plans, railway vehicles are expected to operate on sharp curved tracks. However, on these tracks, the running stability of the railway vehicles is significantly decreased and the creepage is increased. Creepage causes the wheel/rail to wear and vibration. Therefore, reducing the creepage helps ensure the running stability and can be beneficial for the environment and cost. In this paper, the longitudinal creepage is analyzed using a railway vehicle model on a sharp curved track. Furthermore, in order to minimize the problems when a railway vehicle runs on a sharp curved track, the characteristics of a bogie are optimized using response optimization.

Keywords : Creepage, Optimization, Railway vehicle, Sharp curved track

초 록 도시철도는 도심내를 운행하는 철도차량으로써, 도시철도 이용이 활발해지고 운행 계획에 따라 급곡선 구간의 운용이 필요할 것으로 예상된다. 하지만 이러한 급곡선 선로에서는 철도차량의 주행 안정성이 현저히 감소하며 크리피지가 증가하게 된다. 크리피지는 차륜이 레일 위를 구를 때 접촉면에서의 속도차에 의한 미끄러짐량으로 차륜 마모, 진동 등의 원인이 된다. 따라서 크리피지를 줄이는 것은 주행 안정성 확보 및 환경 문제, 비용 저감에 도움을 줄 수 있다. 본 논문에서는 급곡선 선로 주행에 의한 주행방향 크리피지 발생 정도를 전동차를 모델링하여 분석하고 나아가서 급곡선 선로 주행 시 발생할 수 있는 문제점을 최소화하기 위한 대차 특성을 최적화한다.

주요어 : 크리피지, 최적화, 철도차량, 급곡선 궤도

1. 서 론

도시철도는 시대가 변화함에 따라 도시 전역으로 확장하고 있고 주요 교통수단으로써 도시 내 다양한 지역의 운행이 이루어지고 있다. 운행 확장에 따라 주요 거점 도시 정착을 위한 급행화 방안이 운행 계획에 따라 추가되고 있으며 신설되는 도시철도의 운행 계획에도 급행화 방안은 계속적으로 실시될 것이다. 이와 같이 정착 구간 및 운행 시간을 탄력적으로 운영, 조절하기 위해서는 직선/곡선 궤도에서의 속도 증속 및 운행 시간 단축, 완행 열차의 임시 정착 등 다양한 운영 계획을 세울 수 있다. 이러한 운행 조건을 충족하기 위해서 일반 전동대차의 특성을 반영한 급곡선에서의 주행 특성을 고찰할 필요가 있으며 궤도 설치비용 등의 비용 저감 및 안전성 확보 등을 위한 최소곡선 반경 제시가 필요하다.

급곡선 궤도($R < 500m$)에서는 차륜과 레일의 스틱/슬립(stick/slip)에 의한 파상마모가 주로 발생한다. 이는 스텝

(squeal) 소음의 주원인이 되며[1,2] 차륜의 주행 방향과 레일 방향의 각도 차에 의해 충격이 발생하여 열차는 불안정한 거동을 보이게 된다[3]. 이러한 곡선부 소음/진동 현상을 Rudd 등[4]은 측거와 곡선반경 사이에서 소음 발생 현상을 연구하였으며, Monk-Steele 등[5]은 횡방향 크리피지에 의해 발생한 소음이 주행방향 크리피지에 미치는 영향을 조사하였다. Kim 등[3]은 횡방향 크리피지에 의한 소음원을 구동 속도, 구동각도, 하중 변화, 접촉 마찰 등에 따라 소음 발생 조건을 고찰하였다.

반응표면법은 설계변수가 여러 개일 경우, 이들의 반복해석을 최소화하여 상호 평가하는 방법이다. 반응표면법은 1950년대에 Box와 Wilson[6]에 의해 통계분야에서 처음으로 발표된 이후 최근까지 반응표면을 이용한 다양한 연구가 진행 중이다. Craig 등[7]은 차량모델에 반응표면법을 적용하여 충돌 안전 최적화를 수행 하였다. Choi 등[8]은 풍력 터빈 브레이드 구조 최적화를 수행하였으며, Jang 등[9]은 고속 전철의 승차감을 위한 현가장치를 반응표면법을 이용하여 최적화를 수행하였으며 현재까지 다양한 연구로 응용되고 있다.

국내의 좁은 입지 면적과 철도 이용량 증가에 따른 국내 특성에 따라 급곡선 궤도에서의 철도 운행이 필요하다. 따

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-219-2524, E-mail : park@ajou.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.1.19>

라서 본 연구에서는 일반적인 급곡선 궤도($R < 500\text{m}$)보다 더욱 열악한 조건인 곡선반경 ($R < 100\text{m}$)에서의 국내 일반 전동차 주행 특성을 고찰하고 대차 설계비용을 최소화하기 위하여 설계변수를 최소화하고 곡선부를 원활히 주행할 수 있도록 주행방향 크리피지를 개선하는데 목적이 있다. 또한, 기존 운행하는 전동차의 제원을 이용하여 급행 및 완행 열차의 탄력적 운행 방안을 검토하기 위한 것으로 완행 열차의 임시 정차 및 속도 증속 방안을 위하여 급곡선 선로 내에서 운영할 수 있는 급곡선 반경 제시 및 급곡선 주행 시 차륜의 영향도 분석, 특성 최적화를 반응표면법을 이용하여 제시하는 것이다. 본 연구를 진행하기 위하여 철도차량 전용 해석 상용 툴(VI-Rail)을 이용하고 휠/레일 접촉이론은 Kalker의 FASTSIM[10]을 적용하였다. 차량 모델은 1축 차륜을 이용하는 전동차 설계 제원을 이용하여 동역학 철도차량 모델을 개발하였다.

2. 구름 접촉 이론

2.1 크리피지

철도차량의 동적 거동은 차륜과 레일의 상호 작용력에 의해 영향을 받게 된다. 차륜은 레일 상부에서 구름 접촉을 하고 주행방향으로 구름 운동을 하면서 두 물체 사이에는 속도 차가 발생하는데 이 상대속도를 순수 구름 속도로 나눈 값을 크리피지(creepage)라 한다. 방향에 따라서 종방향(longitudinal), 횡방향(lateral), 스핀(spin) 크리피지로 분류하며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\zeta_x = \frac{(v^w - v^r)^T t_1^r}{V}, \zeta_y = \frac{(v^w - v^r)^T t_2^r}{V}, \varphi = \frac{(\omega^w - \omega^r)^T n^r}{V} \quad (1)$$

여기서 ζ_x 는 주행방향 크리피지, ζ_y 는 횡방향 크리피지, φ 는 스핀 크리피지를 말하며 V 는 순수 구름 속도를 의미하며, $\bar{v}$, $\bar{\omega}$ 는 속도/각속도 벡터이다. 첨자 w, r 는 각각 휠과 레일을 의미하고, t_1^r, t_2^r, n^r 는 휠/레일 접촉점에서의 주행방향, 횡방향, 수직방향의 좌표를 의미한다[11].

곡선 선로에서의 크리피지는 곡선 외측부로 밀려서 발생하는 횡방향 크리피지와 양쪽 차륜의 반경차에 의해 발생하는 주행방향 크리피지가 주로 영향을 미치며 특히 급곡선으로 진입할 수록 공격각(attack angle)이 증가하면서 곡선 내측부로 휠셋(wheelset)이 밀리면서 횡방향 크리피지가 크게 증가하고 구름반경 차이에 의해 주행방향 크리피지가 증가한다.

2.2 크립력

차륜과 레일의 상호작용에 의해 접촉부에서는 점착, 크리피지, 마모 등의 특성이 나타나게 된다. 차륜과 레일 사이에서 크립력은 차륜 접촉 면적과 접촉 응력에 의해 현저한 영향을 미치며 크리피지와 반대방향으로 작용하게 된다. 차

Fig. 1 Contact force of the wheelset on the curved track

륜/레일의 형상학적 프로파일은 접촉면적에 따라 철도차량의 동적 거동 특성뿐 아니라 점착-크립-마모 특성에도 영향을 미친다[12].

Fig. 1은 대차 주행 시 차륜에 발생하는 힘의 특성을 나타낸다. 저속에서 플렌지 접촉(flange contact)은 전륜에서는 곡선부 외측에서 발생하지만 후륜에서는 곡선부 내측에서 발생하는 특징을 보인다.

3. 철도차량 동역학 모델/해석

3.1 동역학 모델링

3.1.1 차량 모델링

본 연구에서 차량의 동적 거동 해석은 VI-Rail을 이용하였으며 Wheel/Rail 접촉 알고리즘은 FASTSIM을 적용하였다. 모델링 된 차량의 좌표계는 Fig. 2와 같으며, X와 Z방향은 각각 좌표계 중심으로부터 차량의 진행방향과 연직방향으로 설정된다. 또한 X, Y, Z 방향에 대한 회전은 각각 T(rolling), P(pitching), W(yawing)로 표시하였다. 좌표계의

Fig. 2 Modeling frame

Fig. 3 Railway vehicle schematic

중심은 (0,0,0)에 위치해 있다. 대상 차량은 2량 1편성, 연결대차를 적용한 모델로 열차 위치는 Fig. 3과 같다. 적용 차량의 연결대차는 인접한 차량을 공기 스프링에 의해 지지하고 후미차량은 선두차량과 볼조인트(ball joint)로 연결하여 차량 사이와 차량/대차 사이의 회전운동을 원활히 할 수 있도록 구성하였다.

차량의 질량정보는 Table 1에 나타내었고 1차, 2차 현가

Table 1 Mass properties

Part	Mass (Ton)	Inertia of moment (kgm ²)		
		Ixx	Iyy	Izz
Car-body	14	38,000	450,000	450,000
Bogie	3.8	1,900	1,900	3,800
Wheel-set	1.4	965	30	965

Table 2 Characteristics of the first and second suspension and center pivots.

Suspension	Direction	Stiffness (MN/m) or (MNm/deg)	Damping (MNs/m)
1 st suspension	X	4.9	0.008
	Y	3.77	0.008
	Z	0.89	0.002
2 nd suspension	X	0.167	-
	Y	0.167	0.096
	Z	0.37	0.16
	T	0.001	-
	P	0.001	-
	K	0.001	-
Center pivot	X	11.2	0.03
	Y	0.2	0.005
	Z	-	0.002

Table 3 Characteristics of a bump stop

Disp. (mm)	0	10	15	25	35	38
Force (N)	0	0	2	8.3	29.4	49

장치 특성은 Table 2에 나타내었다. 기존 20m 길이의 1량 전동차 모델을 X방향으로 1/2 축소한 2량 편성모델로 변경하였다. 1량 차량의 길이를 1/2로 축소한 이유는 급곡선 주행의 저항을 최소화하면서 약 20m길이에서 설계된 공조장치 시스템 배치 등의 설계를 변경하지 않고 차체 크기를 확보하기 위한 차량 최소 길이로 판단하였기 때문이다.

3.1.2 차륜/레일 프로파일 정의

차륜 프로파일(wheel profile)은 도시철도에서 주로 사용되는 KNR20(답면구배 1/20)을 모델에 적용하였다. 추가적으로 차량의 주행 거동 분석을 위하여 차륜 프로파일의 답면구배를 변경하여 1/10 답면구배와 1/5 답면구배를 적용하여 경향을 분석하였다. Fig. 4는 각 차륜 프로파일의 답면구배를 나타낸다.

Fig. 4 Wheel profile conicity

3.1.3 궤도 모델 정의

트랙 프로파일은 곡선반경을 30m부터 10mm씩 증가하여 100m까지 해석에 이용하였다. 급곡선 구간에서의 주행 특성을 확인하고 주행 시 크리피지 변화에 의한 특성을 확인하였다. 또한 차량 주행 특성을 면밀히 검토하기 위해 외란이 없는 트랙으로 가정하였고 급곡선부 크리피지 발생 최소화를 위한 연구단계이므로 도유기가 없는 일반적인 트랙으로 가정하였다. 전체적인 트랙 모델은 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5 Curvature of the curved track

3.2 동역학 해석 결과

급곡선에서의 주행이므로 주행속도는 15km/h의 저속 주행으로 가정하였다. 1량 2대차의 차량 모델과 2량 3대차의 수정된 차량 모델 주행 특성 경향을 비교하기 위하여 Fig. 5 궤도모델의 곡선반경 100m에서 주행 해석을 수행하여 비교하였다. 곡선 진입에 따라 탈선계수 및 마모지수가 증가하는 경향은 비슷하지만 2량 3편성 차량 모델이 곡선 주행에 따른 마모가 덜 발생됨을 확인하였고 해석 결과 중에 Front bogie의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

2량 편성 모델을 완성하고 곡선 반경에 따라 주행 해석을 수행하였다. 곡선 외측부에서의 주행방향 크리피지 크기를 Fig. 7에 결과로 나타내었으며 곡선 내측부에서의 주행방향 크리피지는 Fig. 8에 나타내었다. 그래프 하단 wheelset no.는 Fig. 3의 wheelset no. 순서이다. 곡선 외측부 크리피지가 대체로 높게 나왔으며 곡선반경이 작아질수록 크리피지의 크기는 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 크리피지의 증가는 Slip량이 증가함을 의미하며 Slip이 증가하면 차륜에서 마모량이 증가함을 의미한다. 일반적으로 차륜의 크리피지가 0.02를 벗어나면 차륜이 미끄러지면서 마모량이 증가한다고 알려져 있다[5].

동역학 해석 결과, 전체 차륜에서 크리피지 0.02를 만족하는 곡선반경은 100m이다.

Fig. 7 Longitudinal creepage of the outer wheels

Fig. 8 Longitudinal creepage of the inner wheels

4. 실험계획법

4.1 요인배치법(Factorial Design)

고차의 교호작용을 실험인자로 활용하여 같은 실험 횟수로 더 많은 인자의 영향을 검토하기 위해 부분배치 실험을 적용하였다. 이는 완전 요인배치 실험의 횟수를 1/2, 1/4 등으로 나누어 실험 횟수를 줄이는 것으로 본 연구에서는 1/2 부분 배치법을 적용하여 실험을 수행하였다.

축거를 선정하였고, 모든 차축이 곡선의 중심을 향하는 것이 불가능할 때 곡선부 궤간을 약간 넓히는 슬랙을 고려하였으며, 현가계 전후강성을 유연하게 하여 곡선주행 시 자기조향기능을 향상시킬 수 있는 설계변수(주행방향 강성)를 고려하였다. 총 6개의 설계변수를 선정하였으며 설계변수는 2수준으로 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Design variable

Design variable		2 Level	
		-1	+1
D1	1 st X-dir. Stiffness (MN/m)	2.45	4.9
D2	2 nd X-dir. Stiffness (MN/m)	0.084	0.167
D3	Wheel base (m)	1.9	2.1
D4	Conicity	0.05	0.2
D5	Wheel radius (m)	0.33	0.43
D6	Slack (mm)	0	30

(a) Results of derailment

(b) Results of wear number

Fig. 6 Comparison of the running analysis on the curved track

4.1.2 실험계획표

1/2수준 요인배치법에 의한 실험계획표는 Table 5에 나타내었다. 설계변수 D1~D6까지 각 실험마다 겹치지 않도록 배

Table 5 Experiment design with six design variables

No.	Design variable					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	-1	+1
9	-1	-1	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	-1	-1
11	-1	+1	-1	+1	-1	-1
12	+1	+1	-1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1	-1	-1
14	+1	-1	+1	+1	-1	+1
15	-1	+1	+1	+1	-1	+1
16	+1	+1	+1	+1	-1	-1
17	-1	-1	-1	-1	-1	+1
18	+1	-1	-1	-1	-1	-1
19	-1	+1	-1	-1	+1	-1
20	+1	+1	-1	-1	+1	+1
21	-1	-1	+1	-1	+1	-1
22	+1	-1	+1	-1	+1	+1
23	-1	+1	+1	-1	+1	+1
24	+1	+1	+1	-1	+1	-1
25	-1	-1	-1	-1	+1	-1
26	+1	-1	-1	+1	+1	+1
27	-1	+1	-1	+1	+1	+1
28	+1	+1	-1	+1	+1	-1
29	-1	-1	+1	+1	+1	+1
30	+1	-1	+1	+1	+1	-1
31	-1	+1	+1	+1	+1	-1
32	+1	+1	+1	+1	+1	+1

열하였으며, 각 해석마다 주행방향 크리피지를 결과값으로 확인하였다. 2량 1편성 모델은 차륜이 12개 이므로 해석 결과에 의한 주행방향 크리피지는 12개이다.

4.2 요인분석

각 실험계획에 의한 32회의 해석을 완료하였으며, Minitab [13]을 이용하여 요인분석을 수행하였다. 각 차륜에서의 주행방향 크리피지의 민감도를 분석한 결과, 주효과의 영향 분포가 각 차륜마다 다르게 나타남을 Fig. 9를 통하여 확인할 수 있다. 각 그래프마다 0에서 멀리 떨어질수록 각 차륜에서 민감하게 영향을 미치는 설계변수이다. 대체로 D5, D6이 주행방향 크리피지에 가장 민감한 결과를 보였으며 Fig. 9(a)의 D1, D2가 다소 민감한 결과를 보였다. 반면, D4의 민감도는 가장 적은 것으로 확인되었다. 하지만 Fig. 9(a)에서부터 Fig. 9(c)까지 각 휠의 위치마다 주행방향 크리피지에 영향을 미치는 변수가 각각 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 반응 최적화를 수행하여 각 차륜에서의 주행방향 크리피지를 모두 만족하는 최소 곡선반경을 제시하고자 한다.

5. 최적화 설계

5.1 반응표면법

최적설계를 하기 위해서는 성능을 명시적으로 표현하는 근사화(approximation) 기법이 필요한데 이 분야의 대표적인 방법으로 반응표면법(response surface method)이 있다. 반응표면법은 주로 실험계획법을 통해서 얻은 데이터 값으로부터 명시적 함수를 얻기 위해 사용하는 방법인데 최근에는 수치적 실험값으로부터 실험인자와 반응 값 사이의 관계를 명시적인 함수로 표현하는데 쓰인다[14].

본 논문에서는 차륜/레일 접촉에서 발생하는 주행방향 크리피지를 최소화하기 위한 대차 특성 최적화를 수행하였다. 최적화 과정은 다음과 같은 일반화된 최적화 공식으로 기초한다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize longitudinal creepage} \\ &\text{subject to } lb_i \leq D_i \leq ub_i \quad (i = 1 \dots n) \\ &LB_j \leq C_j \leq UB_j \quad (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 9 Result of the factorial analysis

여기서 D_i 는 i 번째 설계변수이며, lb_i 와 ub_i 는 D_i 의 하한과 상한 경계값이다. C_j 는 j 번째 제한조건이며, LB_j 와 UB_j 는 제한조건의 하한과 상한값이다. n 과 m 은 각각 설계변수와 제한조건의 개수를 의미한다.

각 차륜의 주행방향 크리피지 최소화를 목적함수로 하며 설계변수의 경계값(Table 4)을 만족하고 본 해석에서의 제한조건은 사용하지 않았다.

반응표면법은 설계변수와 응답함수 사이의 관련성을 표현하는 함수로 측정된 데이터로부터 가정된 함수의 계수를 최소자승법(least square method)으로 추정된 뒤, 구해진 반응표면모델을 유용하게 이용하는 일련의 과정이다. 본 연구에서는 식 (3)과 같이 곡면효과를 고려한 2차 반응표면 모델을 사용하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i D_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} D_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j \geq 1} \beta_{ij} D_i D_j \quad (3)$$

여기서 D_i 는 설계변수, n 은 설계변수의 개수, β_0 , β_i , β_{ii} , β_{ij} 는 최소자승법으로 추정되어야 할 미지의 계수이다.

최소자승법을 이용하여 잔차(residual)의 제곱합을 최소화하는 반응표면모델 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

여기서 X 는 실험적으로 구성되는 설계 행렬(design matrix)이고 Y 는 해석에 대한 결과값이다.

5.2 Box-Behnken 계획법을 이용한 최적화 설계

반응 표면 설계법에는 크게 두 가지 방법이 있다. 중심합성 실험 계획법과 Box-Behnken 계획법이다. 두 실험계획법의 차이는 선정된 설계변수 밖의 범위의 실험이 가능한 방법이 중심합성 실험 계획법이며, 5개 수준이 사용된다. 반대로 Box-Behnken 계획법은 설계변수 내에서 곡면 효과를 보는 것으로 설계변수 내에서 최적 설계 시 용이하다. 즉, 설계변수를 벗어나는 실험이 불가능하거나 공정 최적화를 위한 실험계획 시에 용이하다. Box-Behnken 계획법은 3수준으로 실험계획표를 작성하게 되고 실험에 의한 반응표면 모델식을 생성하여 반응 최적화를 진행 하게 될 것이다. 최적화에 이용된 설계변수는 Table 6과 같다.

Table 6 Design variables

Design variable		3 level		
		-1	0	+1
D1	1 st X-dir. Stiffness (MN/m)	2.45	3.675	4.9
D2	2 nd X-dir. Stiffness (MN/m)	0.084	0.12525	0.167
D3	Wheel base (m)	1.9	2.0	2.1
D4	Conicity	0.05	0.1	0.2
D5	Wheel radius (m)	0.33	0.38	0.43
D6	Slack (mm)	0	15	30

5.3 최적화 결과

5.3.1 최적화 결과 I

Box-Behnken 계획법은 설계변수가 6개일 경우, 총 실험 횟수는 49회를 수행하게 된다. 최적화시 weight function은 각 차륜에 1을 적용하여 수행하였고 최적화 결과는 Table 7에 나타내었다. 최적화에 이용된 반응표면 모델식은 다음 절(5.3.2 최적화 결과 II)에서 간단히 설명하기로 한다.

Table 7 Optimization results using the six design variables

Design variable		Result	
		Current	Optimized
D1	1 st X-dir. Stiffness (MN/m)	4.9	4.0091
D2	2 nd X-dir. Stiffness (MN/m)	0.167	0.167
D3	Wheel base (m)	2.1	1.9
D4	Conicity	0.05	0.2
D5	Wheel radius (m)	0.43	0.33
D6	Slack (mm)	0	30

최적화 결과, 설계 변수 선정 시 -1과 +1수준의 끝 부분에서 최적화 결과가 나왔다. 1차 주행방향 강성값만이 중간값에서의 결과를 보였다. 최적점의 값이 설계변수 하한과 상한 경계값에 위치해 있음을 확인할 수 있다. 최적점을 찾기 위해서 설계값 범위를 넓게 설정하는 것이 옳지만 대차의 현수장치 공간 및 구동장치 등의 위치 확보를 위하여 D3설계변수를 최소 1.9m로 선정하였으며, 직선주행 안정성을 고려할 때 D4 설계변수를 무한히 증가시킬 수만은 없다. 또한 차륜반경(D5)은 차륜의 마모 한계와 차량 높이 등을 고려하여 0.33m까지 고려하였다. 슬랙은 윤축거리가 일정하므로 무제한 넓힐 수는 없고 30mm를 초과할 수 없는 규정에 따랐다.

3절의 동역학 모델은 곡선 선로반경이 100m였을 때 주행방향 크리피지가 0.02이하였던 반면 최적화 후, 모든 차륜의 주행방향 크리피지가 0.02 이하가 되는 최소곡선 선로 반경은 70m가 되었다.

5.3.2 최적화 결과 II

전절에서 수행한 최적화 결과는 기존 대차모델을 변경 시 고려요소가 존재하므로 설계변수를 축소된 최적화를 수행하기로 한다. 차륜반경 및 축거의 변경은 차량 하부 설계가 재검토 되어야 하므로 기존 설계값을 적용하고 차륜의 답면구배는 0.2에서 주행방향 크리피지가 줄어드는 효과가 있으므로 설계값을 0.2로 변경하여 설계변수를 축소하였다. 따라서 설계변수 D1, D2, D6 만을 재설정하여 최적화를 수행하였다.

Box-Behnken 계획법은 설계변수가 3개일 경우, 총 실험 횟수는 13회를 수행하게 되며 실험계획표는 Table 8과 같다. 전절과 동일한 곡선반경(70m)에서 해석을 수행하였다. 각 차륜에서 측정된 주행방향 크리피지 결과는 부록(Table 10)에 나타내었고 이를 근거로 식 (5)와 같은 반응표면 모델식을

Table 8 Experimental table using the box-behnken design

Order	Design variable		
	D1	D2	D6
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0

구하였다. 반응표면모델 계수는 부록(Table 11)에 제시하였다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1(D1) + \beta_2(D2) + \beta_3(D6) + \beta_4(D1)^2 + \beta_5(D2)^2 + \beta_6(D6)^2 + \beta_7(D1 \times D2) + \beta_8(D1 \times D6) + \beta_9(D2 \times D6) \quad (5)$$

3개의 설계변수를 이용하여 최적화를 수행하였고 결과는 Table 9와 같으며 결과적으로 1차 현가장치의 값만이 작아짐을 확인할 수 있다.

반응표면모델 계수(Table 11)를 이용하여 각 설계변수의 특성에 대한 영향 정도를 Fig. 10과 같이 표현하였다. 반응표면모델의 계수는 각 항의 민감도를 나타낼 수 있으며 변수의 민감함은 Fig. 9(a)에서 각 항목별로 민감한 정도가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 10(a)에서 전륜에 비해

Table 9 Optimization results using three design variables

Design variable		2 level	
		Current	Optimized
D1	1 st X-dir. Stiffness (MN/m)	4.9	3.07
D2	2 nd X-dir. Stiffness (MN/m)	0.167	0.167
D6	Slack (mm)	0	30

Fig. 10 Sensitivity of the regression coefficients

Fig. 11 Longitudinal creepage of the outer wheels

Fig. 12 Longitudinal creepage of the inner wheels

여 후륜의 outer, inner wheel의 D2 및 각 설계변수의 제공량이 민감하게 나타났다. 이는 Front bogie에는 모든 설계변수가 민감하다는 것을 의미이다. 또한 Fig. 10(b)와 Fig. 10(c)에서는 주로 D6과 D6의 제공량이 민감한 결과를 보인다. 반면 D1, D2의 영향도는 D6에 비하여 민감한 정도가 작다. 결과적으로 Front bogie에서 설계변수 변화에 따라 크리피지가 크게 변화할 것을 예측할 수 있으며 그 외 Middle bogie와 Rear bogie는 영향도가 상대적으로 작으므로 크리피지 변화에 크게 민감하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 ADAMS/Rail에서 해석한 결과를 비교한 그림이다. 각각 곡선부 외측 휠과 내측 휠에서의 주행방향 개선 효과를 확인할 수 있으며, 최적화 후 주행방향 크리피지가 0.02 이하의 값으로 모두 확보됨을 확인할 수 있다. 특히 주행방향의 곡선부 외측의 크리피지 개선에 효과적임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 일반 전동차의 대차를 이용한 급곡선 주행 해석을 수행하였다. 급곡선 주행에서의 주행 특성을 검토하여 주행 성능 개선에 효과적인 파라미터를 검토하였으며, 대차 현가장치의 외적인 설계 요소를 함께 검토하여 주행 성능 개선점을 확인하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 곡선부 외측에서의 주행방향 크리피지가 전반적으로 높으며 저속에서의 주행방향 크리피지는 곡선부 내측부 개선보다 외측부 개선에 효과적이었다.

2) 설계변수를 6개에서 차량에 대한 설계변수 3개만으로 최적화를 수행하여도 주행방향 크리피지의 저감이 가능함을 확인하였으며 설계 시 차량 제원 변경으로 주행방향 크리피지를 최소화할 수 있음을 확인하였다.

3) 선로 곡선반경이 작아질수록 상기 서술한 설계변수로 크리피지 저감이 힘들 것으로 판단된다. 현가 특성 변경 외에 급곡선 주행 안정화를 극복하기 위해서는 좌우 차륜이 하나의 차축에 고정되어 같은 회전 속도를 가지는 단일 휠셋이 아닌 독립차륜[15]을 이용하여 좌우 회전을 달리하여 곡선 회전을 원활히 주행하거나 대차에 조향기능[16]을 추가하여 곡선주행에서 원활하게 주행할 수 있는 기술이 필요할 것으로 판단된다.

4) 차륜 마모 개선을 위한 크리피지 감소는 현가장치 최적화를 통하여 개선할 수 있으며 Fig. 6과 같이 차량의 길이가 작아지면 급곡선에서 탈선계수 및 마모가 개선됨을 알 수 있었다. 본 논문은 향후 급곡선을 주행하게 될 철도차량 설계에 활용될 수 있을 것이다.

철도차량이 주행하는 급곡선에서의 주행 성능 개선은 차륜 반경차, 현가특성 변경, Slack 적용 등에 의한 주행방향 크리피지 개선 외에도 임계속도 확보, 횡방향 크리피지 개선 등도 함께 고려되어야 한다. 향후 연구에서는 횡방향 크리피지를 일정 수준 이하의 값을 확보할 수 있는 연구를 진행하여 급곡선 주행에서 발생할 수 있는 마모 저감 및 주행 안정성 등을 고찰하는 연구를 진행 할 예정이다.

References

- [1] D.T. Eadie, M. Santoro, J. Kalousek (2005) Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves, *Transactions on Wear*, 258(7-8), pp. 1148-1155.
- [2] Y. Suda, H. Komine, T. Iwasa, Y. Terumichi (2002) Experimental study on mechanism of rail corrugation using corrugation simulator, *Transactions on Wear*, 253(1-2), pp. 162-171.
- [3] K.J. Kim, J.K. Park, B.S. Kim, J.C. Kim, (2008) An experimental study of the curve squeal noise, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(2), pp. 176-181.
- [4] M.J. Rudd (1976) Wheel/rail noise-part II: wheel squeal, *Journal of Sound and Vibration*, 46, pp. 381-394.
- [5] A.D. Monk-Steel, F.G. Thompson, M.H.A. Janssens (2006) An investigation into the influence of longitudinal creepage on railway squeal noise due to lateral creepage, *Journal of Sound and Vibration*, 293, pp. 766-776.
- [6] G.E.P. Box, K.B. Wilson (1951) On the experimental attainment of optimum conditions, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 13(1), pp. 1-45.
- [7] K.J. Craig, N. Stander, D.A. Dooge, S. Varadappa (2005) Automotive crashworthiness design using response surface-based variable screening and optimization, *International Journal for Computer-aided Engineering and Software*, 22(1), pp. 38-61.
- [8] C.W. Choi, J.W. Jin, K.W. Kang (2012) Structural optimization for small scale vertical-axis wind turbine blade using response surface method, *The KSFM Journal of fluid machinery*, 16(4), pp. 22-27.
- [9] J.W. Jang, S.G. Baek, S.W. Lee, Y.S. Choi, J.C. Koo (2010) Optimization of the suspension to improve ride comfort using response surface model for high speed train, *Proceedings Autumn of Korean Society of Mechanical Engineers*, Rep. of Korea, pp. 1234-1237.
- [10] J.J. Kalker (1983) A simplified theory for non-hertzian contact, *Vehicle System Dynamics*, 12(1-3), pp. 43-45.
- [11] A.A. Shabana, K.E. Zaazaa, H. Sugiyama (2008) *Railroad vehicle dynamics: a computational approach*, CRC Press, NW USA, pp. 140-145.
- [12] M. Rosenberger, P. Dietmaier, J. Payer, K. Six (2008) The influence of the wheelsets relative kinematics of railway vehicles on wheel/rail wear in curved track, *Vehicle system dynamics*, 46, pp. 403-414.
- [13] MINITAB statistical manual, Minitab INC.
- [14] T.H. Lee, J.J. Jung, S. Hong, H.W. Kim, J.S. Choi (2006) Statistical analysis and prediction for behaviors of tracked vehicle traveling on soft soil using response surface methodology, *Transactions of Korean Society of Ocean Engineers*, 20(3), pp. 54-60.
- [15] R.V. Dukkipati, S.N. Swamy, M.O.M. Osman (1992) Independently rotating wheel systems for railway vehicles-a state of the art review, *Vehicle System Dynamics*, 21, pp. 297-330.
- [16] T.X. Mei, R.M. Goodall (2003) Recent development in active steering of railway vehicles, *Vehicle system dynamics*, 39(6), pp. 415-436.

접수일(2013년 7월 14일), 수정일(2013년 12월 11일),
게재확정일(2014년 1월 13일)

Kyung-Seok Sim : sukisi83@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-749, Korea

Tae-Won Park : park@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-749, Korea

Jin-Hee Lee : ljh1227@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-749, Korea

Nam-Po Kim : npkim@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176 Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea

부 록

Table 10 Results of creepage analysis

Bogie	Front bogie				Middle bogie				Rear bogie			
Wheel	Front wheel		Rear wheel		Front bogie		Rear wheel		Front wheel		Rear wheel	
	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner
1	0.008	0.002	0.022	0.003	0.007	0.003	0.020	0.004	0.007	0.003	0.004	0.018
2	0.008	0.002	0.027	0.003	0.007	0.003	0.022	0.003	0.007	0.003	0.004	0.018
3	0.008	0.002	0.027	0.002	0.007	0.003	0.020	0.004	0.006	0.003	0.003	0.018
4	0.008	0.002	0.029	0.003	0.007	0.003	0.021	0.004	0.006	0.003	0.003	0.018
5	0.007	0.002	0.029	0.007	0.006	0.003	0.023	0.01	0.006	0.003	0.007	0.020
6	0.007	0.002	0.029	0.007	0.006	0.003	0.023	0.011	0.006	0.003	0.008	0.020
7	0.008	0.001	0.017	0.004	0.007	0.003	0.016	0.005	0.006	0.003	0.003	0.018
8	0.008	0.001	0.017	0.004	0.007	0.003	0.016	0.005	0.006	0.003	0.003	0.018
9	0.006	0.003	-0.010	-0.020	0.006	0.003	0.024	0.01	0.006	0.003	0.01	0.019
10	0.007	0.002	0.030	0.007	0.006	0.003	0.022	0.011	0.006	0.004	0.007	0.020
11	0.008	0.001	0.017	0.004	0.007	0.003	0.016	0.005	0.006	0.003	0.004	0.017
12	0.009	0.001	0.017	0.004	0.007	0.003	0.016	0.005	0.006	0.003	0.003	0.018
13	0.008	0.002	0.027	0.002	0.007	0.003	0.021	0.004	0.006	0.003	0.003	0.018

Table 11 Regression coefficients

Bogie	Front bogie				Middle bogie				Rear bogie			
Wheel	Front wheel		Rear wheel		Front bogie		Rear wheel		Front wheel		Rear wheel	
	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner
β_0	8.00E-03	2.00E-03	2.70E-02	2.33E-03	7.00E-03	3.00E-03	2.10E-02	3.67E-03	6.33E-03	3.00E-03	3.33E-03	1.80E-02
β_1	1.96E-20	-3.34E-20	8.75E-04	1.25E-04	-7.09E-21	1.26E-35	3.75E-04	-1.29E-19	-6.57E-21	-1.47E-20	1.25E-04	4.48E-22
β_2	2.50E-04	-1.25E-04	5.88E-03	3.25E-03	4.15E-21	6.34E-36	-3.75E-04	2.50E-04	-2.50E-04	1.25E-04	-7.50E-04	2.50E-04
β_3	7.50E-04	-6.25E-04	-1.25E-03	1.88E-03	5.00E-04	6.85E-35	-3.50E-03	-2.75E-03	2.93E-20	-1.25E-04	-2.38E-03	-1.00E-03
β_4	4.08E-20	-1.25E-04	4.38E-03	3.58E-03	-8.08E-20	-2.33E-34	-1.25E-04	4.17E-05	8.33E-05	-1.25E-04	-2.92E-04	2.50E-04
β_5	-2.08E-19	1.25E-04	-5.13E-03	-3.17E-03	-2.64E-20	-3.14E-35	-1.25E-04	4.17E-05	8.33E-05	1.25E-04	4.58E-04	-2.50E-04
β_6	-5.00E-04	-3.75E-04	-8.38E-03	-4.17E-04	-5.00E-04	4.98E-35	-1.38E-03	4.04E-03	-4.17E-04	1.25E-04	2.21E-03	7.50E-04
β_7	9.77E-21	-3.71E-21	-7.50E-04	2.50E-04	-1.82E-22	-4.07E-36	-2.50E-04	2.50E-04	2.74E-20	1.80E-20	-8.25E-20	1.89E-20
β_8	1.95E-20	-1.28E-19	1.48E-19	1.16E-18	1.56E-21	2.92E-35	-6.35E-19	-2.50E-04	-2.79E-20	3.71E-21	-2.50E-04	2.53E-20
β_9	-8.79E-20	2.50E-04	-1.00E-02	-6.75E-03	5.94E-20	1.28E-35	5.00E-04	-2.50E-04	9.41E-20	-2.50E-04	5.00E-04	-8.46E-19