

◆ 특집 ◆ 레일방식 철도차량의 고속화 기술

곡선부에서 차륜 마모 저감을 위한 차륜담면 형상 설계

Design of Wheel Profile to Reduce Wear of Railway Wheel

최하영¹, 이동형¹, 송창용², 이종수^{3,✉}
Ha-Young Choi¹, Dong-Hyong Lee¹, Chang-Yong Song², and Jongsoo Lee^{3,✉}

1 한국철도기술연구원 고속철도연구본부(High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

2 목포대학교 해양시스템공학과(Department of Ocean Engineering, Mokpo National Univ.)

3 연세대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

✉ Corresponding author: jleej@yonsei.ac.kr, Tel: 02-2123-4474

Manuscript received: 2012.3.21 / Revised: 2012.4.26 / Accepted: 2012.4.27

The wear problem of wheel flange occurs at sharp curves of rail. This paper proposes a procedure for optimum design of a wheel profile wherein flange wear is reduced by improving an interaction between wheel and rail. Application of optimization method to design problem mainly depends on characteristics of design space. This paper compared local optimization method with global optimization according to sensitivity value of objective function for design variables to find out which optimization method is appropriate to minimize wear of wheel flange. Wheel profile is created by a piecewise cubic Hermite interpolating polynomial and dynamic performances are analyzed by a railway dynamic analysis program, VAMPIRE. From the optimization results, it is verified that the global optimization method such as genetic algorithm is more suitable to wheel profile optimization than the local optimization of SQP (Sequential Quadratic Programming) in case of considering the lack of empirical knowledge for initial design value.

Key Words: Wheel Profile (차륜 형상), Wear (마모), Optimization (최적화), Genetic Algorithm (유전자 알고리즘)

기호설명

T : 크립력(N)
 γ : 크리피지
 η : 윤중감소비
 Q : 수직하중(kN)
 Y : 횡방향 하중(kN)
 F : 하중(kN)
 μ : 마찰계수
 P_0 : 축하중(kN)

1. 서론

철도 차륜과 레일의 마모는 철도산업에 있어서 매우 중요한 문제중의 하나다. 마모는 차륜과 레일의 수명을 제한하고 철도 차량의 주행 안정성이나 곡선 주행 성능과 같은 철도차량의 동적 성능에도 영향을 미친다.

차륜과 레일의 기하학적 형상은 철도차량의 차륜과 레일 접촉시 차륜과 레일의 상호작용에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 이 기하학적 인자는 차륜과 레일의 접촉위치와 접촉형상을 변화시키고, 차륜-레일 마모에 영향을 준다. 특히 곡선선로에서 차륜 플랜지(flange)와 레일 게이지(gauge)사이의 접촉압력은 직선선로 보다 더 크게 발생하기때문에

차륜과 레일의 마모와 피로 등의 손상 증가와 삭 정 및 교체주기 감소, 소음 증가, 승차감 저하 등이 발생한다. 과도한 차륜 플랜지 마모는 철도차량 유지보수 비용을 증가시킬 뿐만 아니라, 탈선과 같은 대형사고로 이어질 수 있다. 초기에는 이 문제들을 저감하기 위해서 차륜담면 형상 설계를 주로 철도 운영자들의 경험을 토대로 하였으나 최근에는 최적화 방법을 사용하여 유용한 결과를 얻고 있다.

마모된 차륜 형상과 레일 형상을 확장한 차륜 형상을 컴퓨터 해석을 통하여 새로운 차륜 형상을 Leary 등¹이 제시하였다. Shevtsov 등²은 MARS(Multipoint Approximations based on Response Surface fitting method)로 목표 구름반경차와 실제 구름반경차의 차이를 최소화하는 방법으로 최적화된 차륜 형상을 설계하였다. Cui 등³은 차륜과 레일 사이의 수직방향 간격 함수를 향상된 SQP 알고리즘을 이용하여 차륜 형상을 설계하는 방법을 제시하였다. Persson 과 Iwinicki⁴는 철도 차량을 위한 차륜 형상 설계에 유전자 알고리즘을 적용하였다. 허 등⁵은 설정된 설계 영역에서 설계 변수에 따른 스플라인을 설정하고 차륜-레일 접촉 특성 해석을 수행하여 등가담면구배를 해석하는 기법을 차륜 형상 설계에 적용하였다.

최적화 기법은 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 값에 따라 기울기법인 국소최적화 방법(local optimization method)과 비기울기법인 전역최적화 방법(global optimization method)으로 크게 나눌 수 있다. 최적화 방법의 선택은 설계문제의 특성에 따라 신중한 선택이 요구된다. 국소최적화 방법을 비선형성이 매우 강한 설계 공간에 적용할 경우 국소최적해를 그 최적해로 예측할 가능성이 있다. 반면 전역최적화 방법은 많은 계산 비용을 필요하지만 설계 공간에서 전역 최적해를 찾아 낼 수 있다.

본 논문은 곡선구간 주행시 차륜 플랜지의 마모를 저감하기 위한 차륜담면 형상을 개발하고자 한다. 이와 같은 차륜담면 형상 설계문제에 적용할 최적화 방법을 선택하기 위하여 전역최적화 방법으로서 여러 공학 분야에서 널리 사용되어 그 유용성이 증명된 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms, GA)⁶과 국소최적화 방법인 순차이차계획 알고리즘(Sequential Quadratic Programming, SQP)⁷을 비교하였다. 그리고 철도차량 동역학 전용 프로그램인 VAMPIRE⁸를 사용하여 곡선부 주행시

차량의 운동을 시뮬레이션 하고, 차륜의 마모의 정도를 해석하였다.

2. 철도 차륜의 손상

차륜과 레일 접촉면의 상호작용은 기하학적인 형상, 재질, 현가장치 특성, 궤도조건 등의 여러 가지 영향인자가 복합적으로 작용한다. 차륜과 레일 사이의 높은 접촉응력은 레일 표면에서의 소성 변형을 야기한다. 소성변형이 누적되어 재료의 한계를 넘으면 마모/균열 등의 손상이 발생하고, 열차가 운행하면서 발생된 손상은 점차 성장하며, 발생부의 형상, 하중이력 및 환경 등의 조건에 따라 다양한 형태로 발전한다.⁹

Fig. 1은 실제 도시철도 차량의 차륜 마모 상태를 보여준다. 누적 주행거리 약 10,000 km 운행 후의 차륜 마모를 보여주고 있으며, 운행거리를 고려하면 마모가 심한 것으로 평가된다.

곡선부 주행시 레일 게이지와 차륜 플랜지에서 많은 양의 마모가 발생된다. 곡선반경 R250 구간에서는 도유기가 설치되어 있는 것에 비해 곡선부 R350 구간에는 도유기가 설치되어 있지 않아 차륜 플랜지 마모가 더 많이 진행되고 있다.

도유기가 설치되어 있지 않은 곡선부 R310~R400 구간에서의 레일은 열처리가 되어 있어 경도가 상대적으로 높고 차륜과 레일 사이에 건마찰이 발생하여 차륜 플랜지 마모가 커지게 된 것으로 판단된다. 차륜의 형상은 마모에 많은 영향을 미치기 때문에 차륜 플랜지 마모를 저감하기 위한 차륜담면 형상의 최적화가 필요하다.

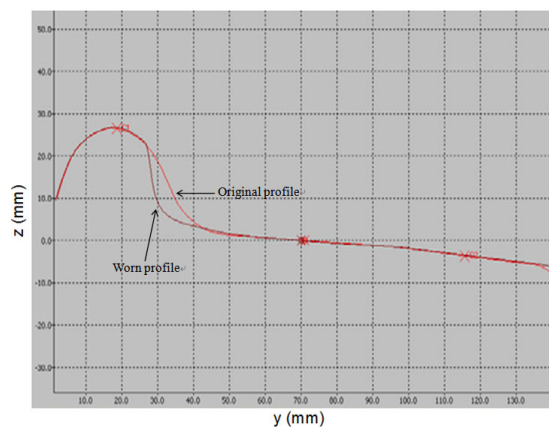


Fig. 1 Worn wheel profile

3. 철도 차륜담면 형상의 최적화

차륜담면 형상 최적화에는 도시철도 차량을 대상으로 하였으며 도유기가 설치되지 않은 곡선 반경 R350 에서 차륜에 발생하는 마모를 저감하기 위하여 차륜담면 형상을 최적화하였다. 차륜담면 형상 설계를 위한 조건은 Table 1 과 같다. 차륜담면 형상의 변경은 차륜과 레일사이의 접촉압력, 크립력, 크리피지, 차량의 동적거동 등을 변화시킨다. 이 변화에 의해 발생될 수 있는 철도 차량의 안전에 관련되어 중요한 탈선, 횡압, 운중감소를 제한함수로 정하였으며, 철도차량 안전기준에 관한 규칙¹⁰ 을 참고하였다. 철도차량 안전에 대한 제한 조건을 만족하면서 마모가 최소화 되도록 다음과 같이 정식화하였다.

minimize

$$f = \text{Wear Number} = F_x \gamma_x + F_y \gamma_y + F_\phi \gamma_\phi \quad (1)$$

where,

F_x : longitudinal creep force, γ_x : longitudinal creepage,

F_y : lateral creep force, γ_y : lateral creepage

F_ϕ : spin creep force, γ_ϕ : spin creepage

subject to

$$g_1 = \text{Derailment Ratio} = \frac{Y}{Q} \leq 0.8$$

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan \alpha - \mu}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (2)$$

where, Q : vertical force on wheel

Y : lateral force on wheel

μ : friction coefficient

α : angle between the wheel flange and horizontal line

$$g_2 = \text{Lateral Force} = Y \leq 55.7 \text{ kN}$$

$$Y = (P/3 + 10) \quad (3)$$

where, Y : lateral force on wheel

P : axle load

$$g_3 = \text{Unloading Indicator} = \Delta Q / Q \leq 50\%$$

$$\Delta Q / Q \quad (4)$$

where, ΔQ : changing in the wheel load and the original static load

Q : original static load

design variables

$$-2.0 \leq dx1 \leq 2.0 \quad -3.0 \leq dx5 \leq 3.0$$

$$-3.0 \leq dx2 \leq 3.0 \quad -3.0 \leq dx6 \leq 3.0$$

$$-3.0 \leq dx3 \leq 3.0 \quad -3.0 \leq dx7 \leq 3.0$$

$$-3.0 \leq dx4 \leq 3.0 \quad -2.0 \leq dx8 \leq 2.0$$

Table 1 Summary for wheel profile design

Specification	Value
Wheel profile(initial)	Conical type 1/20
Rail profile	KS 60 kg
Rail inclination	1/40
Flange back distance	1354 mm
Gage distance	1435 mm
Wheel Diameter	860 mm
Wheel load	68.6 kN
Speed	70 km/h

3.1 설계변수

곡선 선로에서는 차륜 플랜지와 레일 게이시 사이에 접촉이 발생한다. 차륜 플랜지에서 발생하는 마모를 저감하기 위한 차륜 형상을 생성할 수 있도록 Fig. 2 와 같이 초기 차륜 형상에 8 개의 설계변수(dx1~dx8)를 정하였다.

직선 선로 운행시의 동적성능과 마모 등은 그대로 유지하면서 곡선 선로에서의 마모를 저감하도록 직선 선로 주행시 접촉하는 차륜담면의 형상은 그대로 유지하였다. 변수는 차륜 형상의 법선 방향으로 이동하며 PCHIP(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)¹¹ 을 이용하여 차륜 형상을 생성하였다.

3.2 목적함수 및 제한함수

차륜-레일 마모에 의해서 차륜 형상이 변화하며 이는 직접적으로 철도차량의 동적 성능과 차륜과 레일의 접촉 특성에 영향을 미친다. 본 논문에서는 접촉에너지 마모 모델 중 하나인 마모지수(Wear number)를 목적함수로 사용하였으며 식(1)과 같다. 단위는 N 이며 접촉점에서 발생하는 마찰에너지의 상대적인 비교가 가능하다.

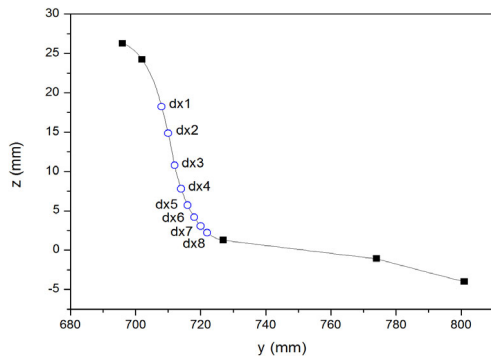


Fig. 2 Representation of design variables

탈선계수는 주행안전성을 평가하는 기준으로 널리 사용되고 있는 Nadal 의 방정식에 의해 나타냈으며 식(2)와 같다. 탈선계수의 허용한도는 빈도 부적확률이 100%인 경우의 0.8 로 정하였다.¹⁰

차량이 곡선부를 주행하게 되면 플랜지와 레일의 접촉으로 횡방향 하중이 발생하는데 이것을 횡압이라고 한다. 철도차량은 정상적인 선로와 운행 조건하에서 레일과 선로의 구조적 안전을 위협하는 횡압의 발생을 최소화하도록 설계되어야 하며, 횡압의 한계치는 식(3)에 의해 구할 수 있다.¹⁰

윤증감소비는 철도차량의 운행상태에서 차량의 안정성에 영향을 미친다. 윤증의 감소는 차량의 진동이나 중심의 편기, 궤도의 평면성 틀림, 곡선에서의 캔트 및 원심력, 풍압 등의 원인으로 발생된다. 윤증 감소치에 대한 정적인 윤증의 비를 윤증감소비라고 하며 이 값이 허용한도를 초과하면 탈선의 위험이 있다. 평가기준은 철도차량 안전기준에 관한 규칙에 의해 동적 윤증감소 빈도누적확률 100% 적용하여 0.5 까지 허용된다.¹⁰

3.3 동적성능해석

철도시스템에서 차륜과 레일 사이의 상호작용은 매우 복잡한 비선형 요소이다. 마모는 차륜과 레일의 형상을 변화시키고 횡단면 형상에 따른 차륜과 레일의 기하학적 차량 동적 성능과 운전상의 안전에 중요한 영향을 미친다.

동적 성능과 안전성을 평가하기 위해서 컴퓨터 모델링 프로그램을 사용하였다. 해석 모델링 프로그램은 컴퓨터 성능이 좋아짐에 따라 더 현실적인 철도 차량 모델링이 가능해졌다. 해석 모델링 프로그램을 철도차량 모델링에 사용하는 것으로 실제로 테스트하는 것에 비교해 낮은 비용으로 테스

트할 수 있다. 이것은 철도 차량 수치적 모델링 사용의 중요한 이점이다. 그렇게 함으로써 값비싼 시간과 인력, 시험장비 등 시험에 사용되는 금전적 비용을 절약을 할 수 있다. 모델링 프로그램은 NUCARS, ADAMS/Rail, VAMPIRE, SIMPACK 등이 있다. 본 논문에서는 철도차량 동역학 문제를 빠르고 효율적으로 풀 수 있는 철도차량 동역학 전용 프로그램인 VAMPIRE 를 이용하였다. 곡선 선로의 반경은 마모가 많이 발생된 도유기를 설치하지 않은 R350 으로 하고 차량속도는 70 km/h 로 하였다.

4. 결과 및 고찰

차륜단면 형상을 최적화하는 방법으로 유전자 알고리즘과 SQP 알고리즘을 비교하였다. 비선형성이 강한 설계문제에서 SQP 알고리즘과 같은 국소 최적화 기법은 설계변수의 초기 값 설정에 따라 최적해의 수렴에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 SQP 알고리즘 기반 형상 최적화시 초기 값 설정에 따른 최적해의 영향도를 검토하기 위하여 설계변수의 초기 값을 Table 2 와 같이 설정하였다.

Table 2 Initial variables of SQP

Case	Initial variables							
	dx1	dx2	dx3	dx4	dx5	dx6	dx7	dx8
SQP_A	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SQP_B	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
SQP_C	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0
SQP_D	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
SQP_E	1.0	-1.0	1.0	-1.0	1.0	-1.0	1.0	-1.0

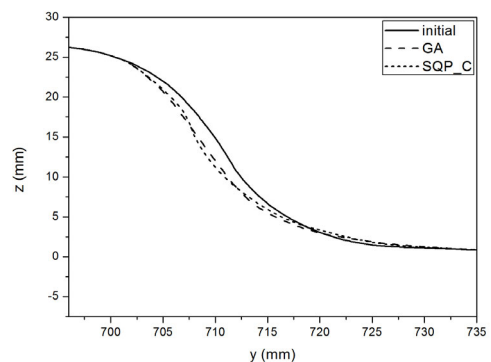


Fig. 3 Comparison of wheel profiles

최적화된 차륜담면 형상들을 Fig. 3 에서 보여주고 있으며 유전자 알고리즘으로 최적화한 프로파일은 Fig. 1 의 마모된 차륜담면 형상과 유사하다.

Table 3 은 설계된 차륜의 치수가 차륜 치수기준을 만족하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 3 의 차륜담면형상을 적용한 경우의 안정성을 나타내는 임계속도는 기존 차륜의 경우 약 57 m/s (205 km/h 급)이고 GA 의 경우는 53 m/s (190 km/h 급), SQP_C 의 경우는 55 m/s (198 km/h 급) 이다. 이는 차륜담면형상 안정성 설계 목표치 180 km/h 을 상회하는 결과로서 안정성을 충분히 확보한 담면형상으로 볼 수 있다.

Table 3 Dimension of designed wheel profiles

Parameter	Initial profile	GA	SQP_C	Criteria
Flange thickness (mm)	35.4	33.4	33.9	25-35
Flange height (mm)	26.25	26.25	26.25	23-34
qR(mm)	10.5	8.5	9.1	
Flange gradient (deg)	63.4	65.4	66.5	

SQP 를 이용한 최적화된 차륜담면 형상은 SQP_C case 인 경우에만 전역최적화 결과와 유사한 결과를 나타내는데, 이는 SQP_C 의 초기점이 전역 최적점에 가깝다는 것을 의미한다. 즉, 실제 차륜담면 형상 최적설계에서 초기설계에 대한 경험적 지식이 없을 경우 전역최적설계기법을 적용하는 것이 타당한 접근방법이라고 할 수 있다.

곡선 선로를 통과할 때 차륜의 공격각과 횡압은 Fig. 4 과 Fig. 5 에서 각각 보여주고 있다. 공격각과 횡압은 기존 형상보다 최적화된 형상의 경우에 더 작은 값을 보여주었다. 곡선부의 접촉점에서 곡선반경차(Rolling Radius Difference)는 기존 형상의 경우는 3.96 mm 이고 유전자 알고리즘으로 최적화된 경우와 SQP 알고리즘으로 최적화 된 경우 각각 4.34 mm, 4.44 mm 로 최적화된 형상의 경우가 큰 값을 가지므로, 최적화된 형상의 경우가 기존 형상의 경우보다 곡선부에서 더 원활한 주행이 가능할 것으로 생각된다.

차륜 플랜지와 레일 게이시 접촉을 하는 곡선 선로에서 초기 차륜담면 형상과 최적화된 차륜담면들의 마모지수를 Fig. 6 과 같이 보여준다. 최적

화에 사용된 마모지수는 곡선부에서 평균값을 사용하였으며, 2 점 접촉인 경우는 마모지수를 합산하여 계산하였다. 마모지수가 기존 형상의 경우보다 유전자 알고리즘으로 최적화한 경우 약 5.2%, SQP 알고리즘으로 최적화한 경우 약 5.0% 감소되었다. 모두 1 점 접촉을 하였다. 이는 구름반경차

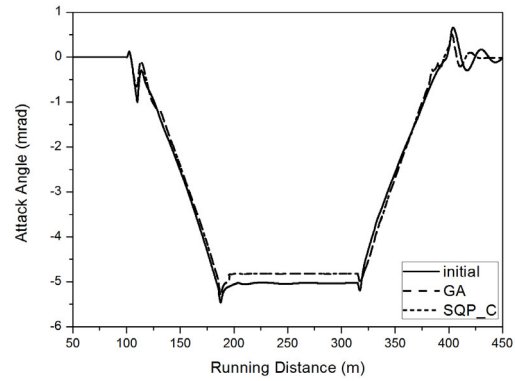


Fig. 4 Attack angle of wheel

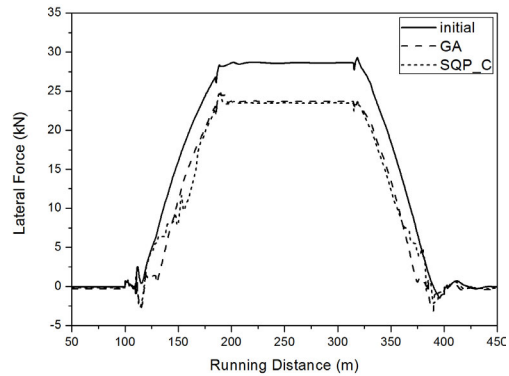


Fig. 5 Lateral track force of wheel

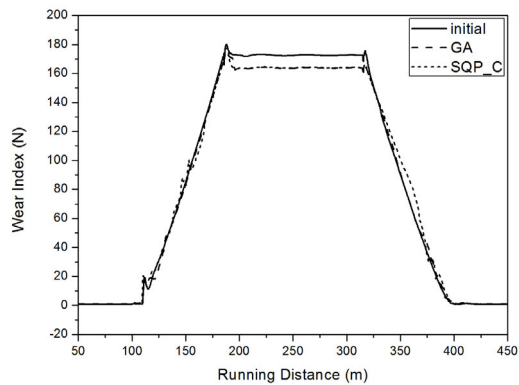


Fig. 6 Wear index of wheel

Table 4 Optimization results

Parameters	Initial	GA	SQP_A	SQP_B	SQP_C	SQP_D	SQP_E
Wear number(N)	172.52	163.61	172.56	171.68	163.94	169.39	173.85
Derailment ratio	0.407	0.332	0.414	0.395	0.331	0.346	0.349
Lateral track force(kN)	29.28	24.67	29.84	28.63	24.92	28.14	25.57
Unloading indicator(%)	20.3	20.44	20.54	20.93	20.91	21.23	21.06

의 증가, 횡압의 감소, 공격각의 감소가 마모를 저감되는데 영향을 미친 것으로 판단된다.

알고리즘 적용에 따른 최적화의 비교 결과는 Table 4 와 같다. SQP 알고리즘으로 차륜담면 형상을 최적화시 초기 변수의 위치에 따라 많은 영향을 받는 것으로 보아 마모를 저감을 위한 차륜담면 형상 최적화는 비선형성이 매우 큰 것으로 판단된다. 최적화된 차륜담면 형상 경우 모두 마모와 탈선계수, 횡압은 초기 차륜담면 형상의 경우에 비해 더 향상된 성능을 보여주었다. 그러나 윤증감소는 초기 차륜담면 형상에 비해 최적화된 차륜담면 형상 두 경우 모두 증가하였지만, 그 값이 기준에 만족하는 값을 가지며 그 정도가 미미하였다.

5. 결론

차륜-레일 마모는 유지보수와 철도차량의 동적 성능에 많은 영향을 미친다. 도유기가 설치되어 있지 않는 곡선반경 R350 구간에서 가혹한 차륜의 마모가 발생하였다. 본 논문은 유전자 알고리즘과 SQP 알고리즘을 이용하여 곡선부에서 차륜의 플랜지 마모 저감을 위한 차륜담면 형상 설계방법을 연구하였다. 곡선부의 차륜 플랜지 마모를 저감시키기 위한 차륜담면 형상 최적화는 비선형성이 크기 때문에 초기 설계값에 대한 경험적 지식이 부족한 경우 SQP 알고리즘을 이용하는 것 보다 유전자 알고리즘을 이용하는 것이 타당함을 확인하였다. 곡선부에서 최적화된 차륜담면의 마모와 탈선, 횡압이 초기 차륜담면 형상의 경우에 비해 더 좋은 성능을 보였으며, 이는 철도차량의 유지보수에 도움이 될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. John, F. L., Stephen, N. H., and Britto, R., "Development of freight car wheel profiles -a case study," *Wear*, Vol. 144, No. 1-2, pp. 353-362, 1991.
2. Shevtsov, I. Y., Markine V. L., and Esveld, C.,

"Optimal design of wheel profile for railway vehicles," *Wear*, Vol. 258, No. 7-8, pp. 1022-1030, 2005.

3. Cui, D., Li, L., and Jin, X., "Optimal design of wheel profiles based on weighed wheel/rail gap," *Wear*, Vol. 271, No. 1-2, pp. 218-226, 2011.
4. Persson, I. and Iwnicki, S. D., "Optimisation of railway Wheel profiles using a genetic algorithm," *Vehicle Sys. Dynamics*, Vol. 41(Suppl.), pp. 517-526, 2004.
5. Hur, H. M., You, W. H., Park, J. H., and Kim, M. S., "Design Method of Railway Wheel Profile with Objective Function of Equivalent Conicity," *J. of KSPE*, Vol. 27, No. 8, pp. 13-19, 2010.
6. Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley, 1989.
7. Fletcher, R., "Practical methods of optimization," John Wiley and Sons, 1987.
8. AEA TECHNOLOGY Rail, "VAMPIRE User Manual," 2001.
9. Lewis, R. and Olofsson, U., "Wheel-rail interface handbook," CRC Press, 2009.
10. Railroad Safety Law, "Rule about safety level of rolling stocks," Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Notification No. 280, 2010.
11. Fritsch, F. N. and Carlson, R. E., "Monotone Piecewise Cubic Interpolation," *SIAM J. Numerical Analysis*, Vol. 17, No. 2, pp. 238-246, 1980.