

◆ 특집 ◆ 철도의 고속화를 위한 차륜-궤도 인터페이스

등가담면구배를 목적함수로 하는 차륜담면형상 설계기법

Design Method of Railway Wheel Profile with Objective Function of Equivalent Conicity

허현무^{1,✉}, 유원희¹, 박준혁¹, 김민수¹
Hyun Moo Hur^{1,✉}, Won Hee You¹, Joon Hyuk Park¹ and Min Soo Kim¹

¹ 한국철도기술연구원 주행추진연구실 (Vehicle Dynamics & Propulsion System Research Department, KRRI)
✉ Corresponding author: hmhur@krri.re.kr, Tel: 031-460-5245

Manuscript received: 2010.3.8 / Revised: 2010.6.18 / Accepted: 2010.6.29

A design method of railway wheel profile with objective function of equivalent conicity considering wheel dimension constraint, two points contact problem between wheel and rail was proposed. New design method shows good results. New wheel profile generated from optimization process shows better dynamic performance compared with initial profile as the purpose of wheel profile design. And to verify the design method with testing the stability of new wheel profile, we conducted a critical speed test for new wheel profile using scale model applied scaling method of railway vehicle dynamics. The result of critical speed test show good agreement with that of numerical analysis. From the above results, it is seen that the design method with objective function of equivalent conicity is feasible and it could be applied to design new wheel profile efficiently.

Key Words: Wheel Profile (차륜담면형상), Critical Speed (임계속도), Stability (안정성), Flange (플랜지), Tread (담면), Equivalent Conicity (등가담면구배)

1. 서론

철도차량의 차륜은 레일과 접촉하여 구름 운동을 하고 대차와 차체 하중을 부담하는 중요한 요소이다. 레일과 접촉하는 차륜의 담면형상(Wheel profile)의 구조는 탈선 방지를 위한 플랜지(Flange)와 담면부(Tread)로 구성되어 있으며 다양한 원호와 구배라는 기울기를 가진 직선으로 조합되어 있다. 차륜담면형상은 고속주행 안정성이나 곡선 주행성능과 같은 철도차량의 동적 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 각 차량의 운용속도, 선로 특성, 궤도형상 등을 고려하여 적합한 형상이 선정되어 사용되어야 한다.

그러나 국내 기존선로와 같이 선형이 취약한

노선을 주행하는 기존철도차량이나 도심 급곡선 구간을 주행하는 전동차를 살펴보면 위와 같은 고려 없이 주로 고속 주행안정성에 초점이 맞춰진 차륜담면형상이 적용되고 있다. 이로 인하여 곡선 구간 주행 시 조향성능 미흡으로 인한 과도한 차륜 횡압이 발생하게 되고 이는 차륜 플랜지의 마모와 소음 발생의 원인이 된다. 이로 인하여 차륜의 조기 삭정 및 교체, 관련된 차량 구성품 손상, 그로 인한 유지보수비용이 증가하는 요인이 되고 있다.^{1,2} 따라서 차량의 안정성을 저해하는 않는 범위 내에서 곡선구간 주행 시 조향성능을 향상시킬 수 있는 차륜담면형상의 개발이 필요하다.

곡선 구간 주행 시 차륜의 마모를 저감시키기

위한 새로운 차륜담면형상 개발에 대한 다양한 연구가 시도되었다. Leary, J. F 등은 화차 차륜의 마모를 저감시키기 위하여 차륜 플랜지부 원호를 개선하여 곡선 주행 시 차륜의 마모를 저감한 바 있다.³ 또한 일본에서는 전동차의 차륜담면 마모를 저감하기 위하여 차륜담면형상 개발에 대한 case study 연구가 진행되기도 하였다.^{4,5} 국내에서도 기존철도차량의 과도한 차륜 마모를 저감시키기 위한 차륜담면형상 개발 연구가 수행된 바 있다.^{6,7} 이와 같이 초기의 연구는 주로 사례연구로서 경험적인 방법으로 기존 차륜담면형상의 문제점을 개선하기 위하여 차륜담면형상 변경을 시도한 연구가 대부분이어서 차륜담면형상 설계과정에서의 이론적 배경이 취약하였다.

최근에 와서 Shevtsov, I. 등은 차륜/레일 접촉 시 차륜의 구름반경차(Rolling Radius Difference)를 목적함수로 하여 역기구학적 방법으로 차륜담면형상을 추출하는 설계기법을 제시하기도 하였다.^{8,9} 또한 Jahed, H. 등은 스플라인을 이용한 형상설계와 최적화기법을 응용하여 원하는 구름반경차를 얻는 설계기법을 제시한 바 있다.¹⁰ 그러나 위 두 방법은 목적함수를 윤축의 횡변위에 대한 구름반경차와의 관계를 설정해야 한다. 이때 윤축횡변위에 대한 구름반경차의 값을 경험적으로 일일이 설정해야 어려움이 있으며 최적의 목적값이라고도 할 수 없다. 또한, 차륜의 치수기준 및 2 점접촉 여부에 대한 판정기준은 고려되어 있지 않다. 또한 Jahed, H.의 방법은 차륜/레일 접촉해석과정에서 상용 차륜/레일 접촉해석 S/W 를 활용해야 하는 번거로움이 있다.

따라서 이러한 단점을 보완하기 위한 차륜담면형상 설계기법을 제안하였다. 설계 목적함수를 구름반경차가 아닌 등가담면구배(Equivalent Conicity)로 하였으며 차륜/레일 접촉해석은 자체 개발한 접촉해석 모듈을 적용하였다. 그리고 차륜담면형상 치수 규정 충족 여부, 레일과의 2 점접촉 발생 여부를 판정하는 모듈을 개발하여 적용하였다. 그리고 Shevtsov, I 와 Jahed, H.의 논문이 설계기법 제시와 도출된 차륜담면형상에 대한 동특성 해석에 한정된 연구임에 비하여 본 논문에서는 추가적으로 축소모델기법을 적용하여 도출된 차륜담면형상에 대한 안정성을 검증하기 위한 시험 평가를 시도하였다.

2. 차륜담면형상 설계

2.1 설계기법

새로운 차륜담면형상을 설계하기 위하여 설계 방법을 제안하였다. Fig. 1 과 같이 초기의 차륜담면형상을 기초로 하여 설계 영역을 설정한 후 설계 변수에 따른 스플라인을 설정하고 차륜/레일 접촉 특성해석을 수행하여 등가담면구배를 해석하는 기법을 적용하였다. Fig. 2 는 차륜담면형상 설계를 위한 최적화 흐름도를 나타내며 각 과정에 대한 상세한 공정은 다음과 같다.

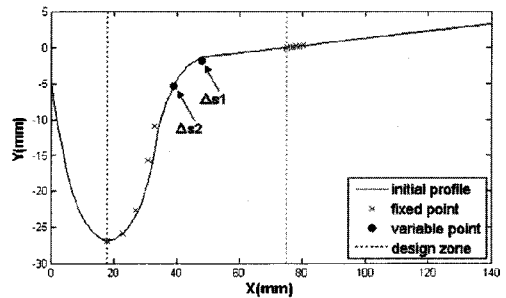


Fig. 1 Design zone and design variables

- (1) 등가담면구배 설계목표치와 레일 단면형상, 초기 차륜담면형상, 차륜/레일 접촉해석에 필요한 치수와 윤중 등을 입력한다. 초기 차륜담면형상의 최적화가 필요한 설계영역을 설정하고 설계변수에 대한 하한과 상한을 설정한다.
- (2) Fig. 1 과 같이 초기 차륜담면형상의 설계영역(·)에 플랜지부에 고정설계점(x)을 설정하고 가변설계점(o)을 설정한다.
- (3) 가변설계변수 s_1, s_2 의 Y 좌표를 가변설계변수 Y 축설계영역에서 일정 증분 간격으로 변화시킨다.
- (4) 고정설계점과 가변설계점들을 연결하는 spline 곡선을 생성시켜 후보 차륜담면형상을 생성한다.
- (5) 후보 차륜담면형상에 대하여 플랜지두께, 플랜지높이와 같은 치수를 해석하고 차륜담면형상에 대한 곡률반경을 해석한다. 여기서, 차륜담면형상의 곡률반경은 레일두부의 접촉점에서의 최소곡률반경과 비교하여 레일과의 2 점접촉 발생 여부를 판정하는 데이터로 활용된다. 즉 차륜담면형상의 곡률반경이 레일의 곡률반경보다 작으면 2 점접촉현상이 발생함을 의미한다. 또한, 레일과의 접촉점 해석을 수행하여 윤축의 횡변위에 대한 구름반경차와의 관계를 해석하고 등가담면구배를 구한다.

(6) 후보 차륜담면형상에 대한 차륜치수, 곡률 반경, 등가담면구배 해석결과를 차륜 치수기준, 레일과의 2 점접촉 발생 여부, 등가담면구배 목표치 기준과 비교하여 충족하면 종료하고 그렇지 않으면 (3)으로 가서 위 판정기준이 충족될 때까지 반복한다.

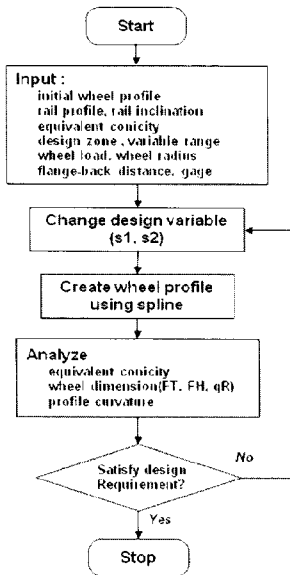


Fig. 2 Flow chart

2.2 차륜담면형상 설계

Table 1 과 같은 설계변수 값과 설계조건을 이용하여 위 설계기법을 적용한 차륜담면형상안을 도출하였다. 설계조건은 플랜지두께, 플랜지높이와 같은 철도차량 안전기준상의 차륜 치수 조건을 충족하며 기존 차륜담면형상에 비하여 곡선주행능이 향상된 등가담면구배가 0.2 인 레일과의 2 점접촉이 발생하지 않고 설계속도 180km/h 이상급 차륜담면형상으로 설계하였다. 기존 차륜담면형상의 등가담면구배가 0.05 로 직선구간에서의 고속주행 성능은 양호한 반면 곡선주행 시 내외레 차륜간의 구름반경차를 작게하여 원활한 곡선 추종이 어려운 단점이 있다. 이에 비하여 새로운 차륜담면형상의 등가담면구배 설계 목표치 0.2 는 직선주행에 요구되는 차륜담면형상의 안정성 한계를 충족하면서도 곡선주행 시 내외레 차륜간의 구름반경차를 급곡선 구간이라 할 수 있는 R300, R400 구간에 적합한 구름반경차를 발생시킬 수 있는 목표치라 할 수 있다.

Fig. 3 은 설계변수 s1, s2 에 따른 후보 차륜담면형상에 대한 등가담면구배를 해석한 결과이다. 이 결과 중 차륜 치수 조건과 레일과의 2 점 접촉이 발생하지 않는 결과를 추출한 것이 그림의 (•)으로 표시되어 있다. Fig. 4 는 설계조건을 충족한 결과 중 초기 차륜담면형상과 형상 변화가 가장 적은 담면형상을 나타낸다. Table 2 는 새 차륜담면형상에 대한 치수 및 등가담면구배 해석결과를 나타낸다. 새 차륜담면형상은 차륜 치수기준을 충족하고 있음을 알 수 있다. 플랜지 경사각은 기존 차륜담면형상과 거의 근사한 기울기를 나타내고 있다. 등가담면구배 해석결과 새 차륜담면형상의 등가담면구배는 0.2 로서 설계 목표치와 부합한 결과를 보이고 있다. 또한, 50kgN 레일이나 60kg 레일과의 접촉 시 기존 차륜담면형상은 50kgN 레일과 2 점 접촉이 발생함에 비하여 새로운 차륜담면형상은 2 점 접촉 현상이 발생하지 않아 곡선 주행 특성이 향상되었음을 알 수 있다.

Table 1 Design value for wheel profile generation

Parameter	Property
Initial wheel profile	Conical type 1/20 profile
Rail profile	60kg rail
Equivalent conicity	0.2
Flange-back distance	1,354 mm
Rail inclination	1/40
Gage	1,435 mm
Wheel radius	430 mm
Wheel load	8 ton
Constraints of the variable points	$0 \leq \Delta s_1, \Delta s_2 \leq 1$

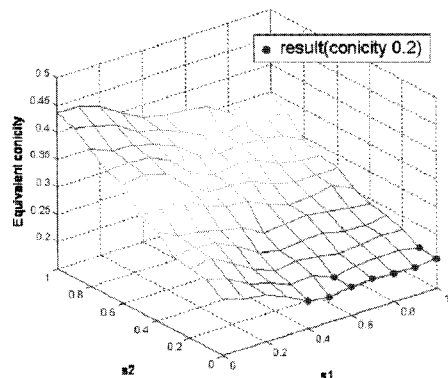


Fig. 3 Equivalent conicity according to design variables

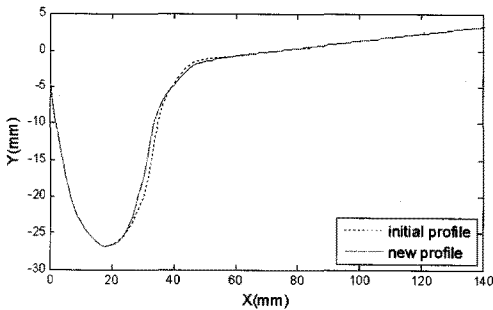


Fig. 4 New wheel profile

Table 2 Dimension of new wheel profile

Parameter	Initial profile	New profile	Criteria
Flange thickness(mm)	35.0	33.6	25 - 35mm
Flange height(mm)	26.9	26.7	23 - 34mm
qR	10.1	8.9	
Flange gradient(deg)	69.2	69	
Equivalent conicity	0.055	0.20	
2 points contact with rail	○	X	

Fig. 5~Fig. 7 은 새 차륜담면형상과 60kg 레일과의 기하학적 접촉특성 해석을 수행하여 구한 접촉 파라미터 특성을 나타낸다.⁶ Fig. 5 는 윤축 횡변위에 대한 좌우 차륜의 구름반경차를 나타낸다. 그림에서와 같이 차륜이 담면부 접촉 영역인 윤축 횡변위 5mm 이내에서 보면 새 차륜담면형상은 기존 차륜담면형상에 비하여 기울기가 큰 특성을 보이고 있다. 플랜지 접촉영역인 윤축 횡변위 5mm 이상의 영역에서 보면 기존 차륜담면형상은 기울기가 매우 급격하여 레일과의 2 점접촉현상이 발생함에 비하여 새 차륜담면형상은 전 접촉영역에서 기울기가 완만하여 2 점접촉 현상이 발생하지 않는다. 또한 담면부 접촉영역인 ±5mm 이내에서 구름반경차가 기존 차륜담면형상보다 크게 발생함으로써 곡선구간 주행 시 외측 차륜에 필요한 이동거리를 증가시켜 원활한 곡선 적응을 도모할 것으로 기대 할 수 있다. Fig. 6 은 윤축 횡변위에 대한 차륜 접촉점에서의 접촉각을 나타낸다. 플랜지 목부 원호의 곡률반경이 커짐에 따라 그 영역에서 접촉각이 작아짐을 보이고 있다. Fig. 7 은 접촉점에서의 접촉타원의 면적을 나타낸다. 새 차륜담면형상의 접촉면적이 기존에 비하여 작아짐을 알 수 있다. 이는 기존 차륜담면형상이 원추형으로 담면

부 접촉면적이 큰 반면 새 차륜담면형상은 원호형 담면에 가깝고 등가담면구배가 크기 때문에 접촉 면적이 상대적으로 작아지게 됨을 알 수 있다.

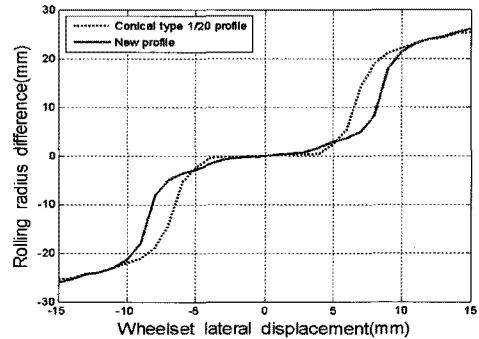


Fig. 5 Rolling radius difference

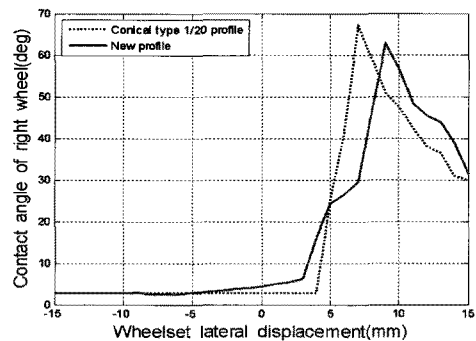


Fig. 6 Contact angle

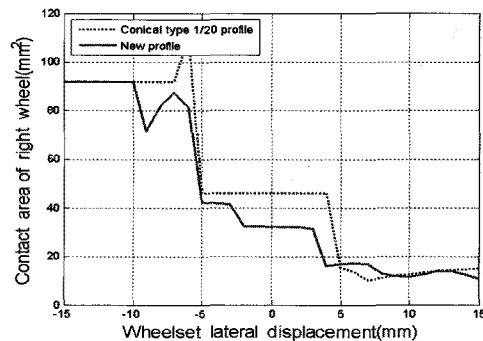


Fig. 7 Contact area

3. 차륜담면형상 동적 성능 해석

새 차륜담면형상의 주행 성능을 분석하기 위하여 주행 안정성 및 곡선주행 시 횡압특성에 대한

해석을 수행하였다. 주행 안정성 해석은 비선형 임계속도 해석기법을 적용한 해석을 수행하였으며, 횡압특성 해석은 철도차량 동특성 해석 전용프로그램인 VAMPIRE 를 이용하여 곡률반경 R300 인 곡선을 주행할 경우를 가정한 모사해석을 수행하였다.^{11,12}

해석에 적용한 차량모델은 국내 전동차를 대상으로 하였다. Fig. 8 은 새 차륜담면형상을 적용한 경우의 안정성을 나타내는 임계속도 해석결과를 나타낸다. 새 차륜담면형상의 임계속도는 약 63m/s 로서 시속으로 환산하면 226km/h 급이다. 이는 차륜담면형상 안정성 설계 목표치 180km/h 을 상회하는 결과로서 충분한 안정성을 확보한 담면형상이라 할 수 있다.

Fig. 9 는 R300 곡선을 속도 70km/h 로 주행 시의 외계 횡압을 해석한 결과이다. 곡선구간 주행 시 횡압을 보면 기존 차륜담면형상이 23.2kN 임에 비하여 새로운 담면형상은 18.7kN 으로서 약 20% 정도 횡압이 저감됨을 보이고 있다. 그 외 Table 3 과 같이 동일 해석조건에서 상대 비교한 탈선계수나 윤증감소율은 기준치에 비하여 저하된 수치를 나타내어 안정성 측면에서도 향상됨을 알 수 있다. 따라서 새 차륜담면형상은 목표로 한 최고속도조건을 충족하면서도 향상된 곡선주행성능을 보일 것으로 기대된다.

Table 3 Dynamic performance of new wheel profile

Parameter	Initial profile	New profile
Critical speed(km/h)	320	226
Lateral force(kN)	23.2	18.7
Derailment coefficient	0.44	0.35
Wheel unloading(%)	13.9	13.7

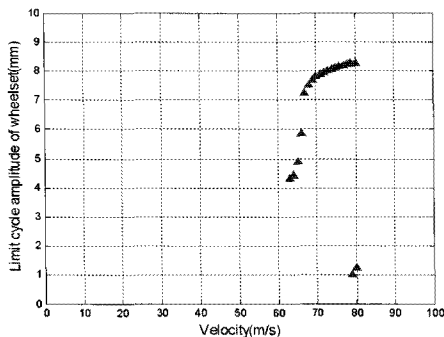


Fig. 8 Critical Speed for new wheel profile

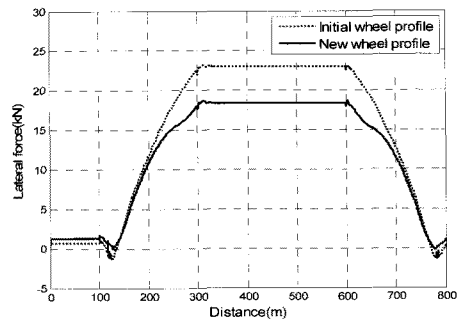


Fig. 9 Lateral force reduction of new wheel profile

4. 차륜담면형상 안정성 시험

새 차륜담면형상의 주행 안정성을 검증하기 위하여 축소모델기법을 적용한 임계속도 시험을 실시하였다. 임계속도 시험은 축소대차모델의 임계속도를 평가하기 위하여 구축된 축소주행 시험대와 축소대차 시제를 이용하여 수행되었으며, 새 차륜담면형상을 1/5 로 축소 제작한 차륜담면형상 시제를 대상으로 임계속도를 평가하였다.^{11,13} Fig. 10 은 시험장치와 축소대차 시제를 나타낸다.

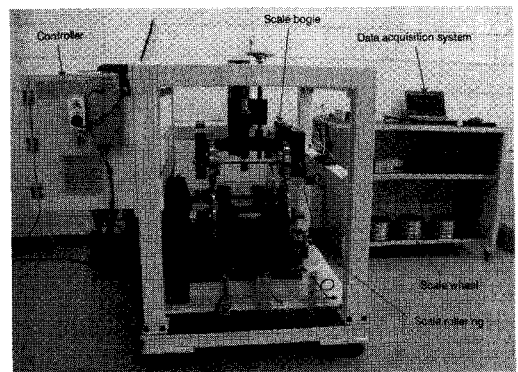


Fig. 10 Scale roller-rig to evaluate critical speed of new wheel profile

Fig. 11 은 축소차륜시제에 대한 임계속도 해석결과와 시험 결과를 비교한 그림이다. 축소차륜 담면형상 시제를 적용한 축소대차의 임계속도 해석결과는 13m/s 였으며 축소차륜담면형상 시제를 적용한 축소대차의 임계속도 시험결과는 12.7m/s 로 평가되었다. 이를 Full scale 일 경우로 환산하면 각각 65m/s 와 63.5m/s 로서 해석결과와 시험결과가 매우 근사함을 알 수 있다.

따라서 곡선 주행성능을 향상시키기 위하여 제

안한 새로운 차륜담면형상은 충분한 안정성을 확보하였다고 평가되며 그 외 동적성능 해석 결과를 고려할 때 기존 차륜담면형상에 비하여 향상된 주행성능을 보일 것으로 기대된다.

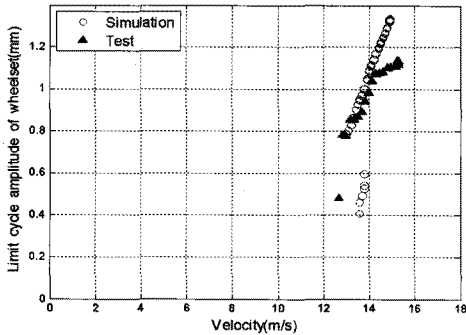


Fig. 11 Critical speed for the scale bogie applied with new wheel profile

5. 결론

등가담면구배를 목적함수로 하는 새로운 차륜형상 설계기법에 대한 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

차륜 치수조건, 2 점접촉 판정조건을 고려하고 등가담면구배를 목적함수로 하는 차륜담면형상 설계기법을 제시하였다. 새로운 설계기법은 제한조건을 충족한 설계결과를 보였으며 등가담면구배 목적값과 동일한 결과를 보였다.

곡선주행성능 향상을 위하여 등가담면구배 0.2로 설계한 새 차륜담면형상은 기존 차륜담면형상에 비하여 향상된 횡압저감 효과와 동적 성능을 보였다. 그리고 새 차륜담면형상에 대한 안정성을 검증하고자 축소모델기법을 적용하여 새 차륜담면형상에 대한 임계속도 시험결과, 해석결과와 매우 부합한 결과를 나타내어 제안한 설계기법이 타당함을 알 수 있었다.

따라서 제안한 차륜담면형상 설계기법은 목표로한 설계조건에 부합할 수 있는 설계안을 도출할 수 있는 효율성을 보였다고 판단된다. 제안된 설계기법은 향후 신조 차량 개발 시, 혹은 기존 차량의 새로운 차륜담면형상 개발 시 유용하게 활용될 것으로 기대한다. 향후에는 본 논문에서 제안된 차륜담면형상에 설계기법에 대한 실물 실차를 대상으로 한 안정성 및 곡선주행성능 시험이 추후 진행될 계획이다.

참고문헌

1. Hur, H. M., Lee, C. W., Kwon, S. T. and Yun, C. H., "Analysis on the Wear Patterns of Wheel Profile for Conventional Line," Proc. of Korean Society for Railway Spring Conference, pp. 651-655, 2003.
2. Hur, H. M., Park, J. H., Kim, M. S., You, W. H. and Park, T. W., "The Wear Pattern of The Wheel Profile for EMU According to The Mileage," Proc. of Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 1007-1008, 2008.
3. Leary, J. F., 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.
4. Yamada, K., Hayashi, T., Nakata, M. and Isa, M., "New Profiled Tread Design Method and It's Applied Tread Named CS-Tread," The 5th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems(CM2000), pp. 259-264, 2000.
5. Sasaki, K., Kageyama, T., Asano, K. and Okumura, M., "Development of the Wheel Tread Profile for Commuter Train," The 5th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems(CM2000), pp. 265-270, 2000.
6. Hur, H. M., Kwon, S. T., Lee, C. W. and Koo, D. H., "Arc-type Wheel Profile Design and Test Results," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 7, No. 2, pp. 130-136, 2004.
7. Hur, H. M., Kwon, S. T., Seo, J. W. and Kwon, S. J., "Strength and Dynamic Performance Analysis for Tilting Train Wheel," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 11, pp. 85-92, 2006.
8. 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.
9. Shevtsov, I. Y., Markine, V. L. and Esveld, C., "Design of Railway Wheel Profile Taking into Account Rolling Contact Fatigue and Wear," Wear, Vol. 265, No. 9-10, pp. 1273-1282, 2008.
10. Jahed, H., Farshi, B., Eshraghi, M. A. and Nasr, A., "A Numerical Optimization Technique for Design of Wheel Profile," Wear, Vol. 264, No. 1-2, pp. 1-10, 2008.

11. Hur, H. M., Park, J. H., You, W. H. and Park, T. W.,
“A Study on the critical speed of worn wheel profile
using a scale model,” The Journal of Mechanical
Science and Technology, Vol. 23, No. 10, pp. 2790-
2800, 2009.
12. Delta Rail, “VAMPIRE User’s Manual,” 2003.
13. Hur, H. M., You, W. H., Kim, N. P. and Park, T. W.,
“Stability Evaluation of the Railway Bogie according
to the Tread Inclination of Wheel Profile using Scale
Model,” Transactions of the KSME A, Vol. 33, No.
10, pp. 1099-1107, 2009.