

차륜/궤조륜 기하학적 접촉특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of the Wheel/Roller Contact Geometry

어현무†

Hyun-Moo Hur

Abstract

Understanding the contact between wheel and rail is a starting point in railway vehicle dynamic research area and especially analysis for the contact geometry between wheel and rail is important. On the one hand, the critical speed as the natural characteristics of rolling-stock is generally tested on the roller rig. The geometrical characteristics of the wheel/roller contact on the roller rig are different from these of the general wheel/rail contact because the longitudinal radius of roller is not infinite compared with rail. Thus, in this paper we developed the algorithm to analyze the wheel/roller contact geometry of our roller rig which is constructed now and analyzed the difference between wheel/roller contact and wheel/rail contact. In conclusion, we found that the yaw motion of wheelset and the roller radius influence the geometrical contact parameters in wheel flange contact area.

Keywords : Bogie roller rig(대차 주행시험대), Contact geometry(접촉기하), Contact geometrical parameter(접촉기하 인자), Roller(궤조륜), Wheel(차륜), Wheel profile(차륜단면형상)

1. 서론

철도차량의 동적 거동 해석은 차륜과 레일의 접촉에 의한 영향이 크다. 차륜과 레일간의 접촉은 차륜, 레일을 강체로 가정하여 레일에 대한 차륜의 기하학적 접촉 해석을 수행한 후, 탄성학적 접촉이론을 적용하여 접촉형상, 면적, 접촉응력을 구하고 동역학 방정식을 구성하여 해를 구하는 것이 일반적인 해석 방법이다. 따라서 차륜/레일간 기하학적 접촉특성 해석은 철도차량 동역학 해석의 출발점이라 할 수 있다.

한편, 철도차량의 진동, 승차감과 같은 동적 특성을 분석하고 수준을 평가함에 있어서는 시험선로 상에서 시험을 수행하는 것이 일반적이라 할 수 있다. 그러나 차량의 임계속도와 같이 주행선로 및 외부의 외란의 영향을 배제한 차량의 고유한 특성을 시험할 경우에는 시험선로 상에서의 시험보다는 실험실 환경 하에서 시험조건을 임의로 부여할 수 있는 전용시험기를 활용하는 것이 바람직하다.

이러한 목적으로 철도차량 안정성 시험평가관련 연구 분

야에서는 차량동특성시험기나 대차동특성시험기와 같은 주행시험대(roller rig)를 활용하고 있다. 주행시험대는 레일에 상당하는 궤조륜(roller)을 사용하고 있다. 궤조륜의 두부형상은 레일과 같지만 레일의 길이 방향의 반경이 무한대임에 비하여 궤조륜은 일정 반경을 갖으며 궤조륜 위에 윤축을 거치시키고 회전운동 한다. 따라서 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉특성은 일반적인 차륜/레일간 접촉특성과 상이하다고 할 수 있으며 이에 대한 이해는 주행시험대상에서의 차량 안정성 시험평가측면에서 매우 중요하다.

그러므로 본 연구에서는 한국철도기술연구원에서 구축중인 대차 동특성시험기의 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉특성에 대한 해석 연구를 수행함으로써 레일 위를 주행하는 일반적 차륜/레일 기하학적 접촉특성과의 차이점을 분석하고자 한다.

2. 접촉 해석 알고리즘

2.1 차륜/궤조륜 기하학적 접촉 해석 알고리즘

차륜과 궤조륜간의 기하학적 접촉 해석을 위하여 Fig. 1, Fig. 2와 같이 한 쌍의 차륜과 차축으로 구성된 윤축과 한 쌍

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부
E-mail : hmhur@krii.re.kr
TEL : (031)469-5245 FAX : (031)460-5289

의 궤조륜과 축으로 구성된 궤조륜축으로 모델링하였다. 윤축은 궤조륜축에 대하여 Y축 방향으로 병진 운동하며 Z축을 중심으로 요방향 회전 운동하고 Y축을 중심으로 롤방향 회전 운동할 수 있다고 가정하였다. 또한, 윤축의 횡방향 운동에 대하여 윤축은 궤조륜과 좌우 양측의 접촉점에서 항상 접촉하고 있다고 가정하였으며 궤조륜은 궤조륜축의 중심에 대하여 고정된 상태로 가정하였다.

차륜/궤조륜간 접촉점 위치를 구하는 방법은 3차원 공간상에서의 입체해석 기하를 이용하여 다음과 같은 알고리즘을 적용하였다[1,2].

- i) Fig. 3과 같이 궤조륜은 고정된 상태에서 윤축을 궤조륜 위 Z방향으로 일정거리 만큼 떨어진 위치에 위치시킨다. 윤축을 주어진 요각(ψ_w)만큼 회전시키고 Y축 방향으로 y_w 만큼 병진운동 시킨다.
- ii) X축에 대하여 롤각 만큼 롤링 운동시킨다.(초기치는 0°로 함)
- iii) 궤조륜의 Z축에 수직인 XY평면을 궤조륜과 윤축간의 공간상에 설정하고 궤조륜과 차륜이 공통으로 놓이는 영역을 설정한 후 X, Y축 방향으로 일정 미소 간격으로 등분하여 메쉬를 설정한다.
- iv) 메쉬 XY평면상의 임의의 한 점 $p(a, b, z)$ 에 대하여 그 점을 통과하고 XY평면에 수직인 선을 그어 차륜과 궤조륜의 가까운 표면과 만나는 점을 각각 $p_1(a, b, z_1), p_2(a, b, z_2)$ 라 하자. 그러면 두 점의 X, Y 좌표는 동일하며 Z축 좌표 값만 상이하다. z_1, z_2 를 구하고 그 차이를 구하면 p 에서의 차륜/궤조륜간 거리가 된다.
- v) 우측 메쉬 XY평면상의 모든 점에 대하여 차륜/궤조륜간 거리를 구하고 그 중 최솟값을 구하여 우측 차륜/궤조륜간 최소거리(d_R)로 한다.
- vi) 좌측 차륜/궤조륜에 대하여도 iii ~ v와 같은 방법을 적용하여 좌측 차륜/궤조륜간 최소거리(d_L)를 구한다.
- vii) $d = |d_R - d_L|$ 을 구한다.
- viii) d 가 수렴기준치 ϵ 이하가 될 때까지 윤축의 롤각을 증가시키면서 ii ~ vii까지의 과정을 newton법을 이용하여 반복 계산 하고 수렴기준치 ϵ 이하로 수렴하는 롤각을 찾는다.
- ix) 이 때 좌우측 접촉점에 대하여 구름반경(rolling radius), 접촉각(contact angle), 윤축롤각(wheelset roll angle), 접촉면적(contact area), 접촉타원상 장반경과 단반경간의 비(A/B)등과 같은 기하학적 접촉파라미터를 산출한다.
- x) 윤축의 횡변위 y_w 를 $y_L \leq y_w \leq y_R$ 에 해당하는 구간에 대하여 i ~ ix과정을 반복한다.

2.2 기하학적 접촉 파라미터

전절에서 구한 좌우 양측의 접촉점에 대하여 구름반경, 구름반경차(rolling radius difference), 접촉각, 접촉각차(contact angle difference), 윤축롤각, 접촉면적, 접촉타원상 장반경과 단반경간의 비등과 같은 기하학적 접촉 파라미터를 산출할 수 있다. 본 연구에서 적용한 접촉 파라미터 산출방법은 FRA

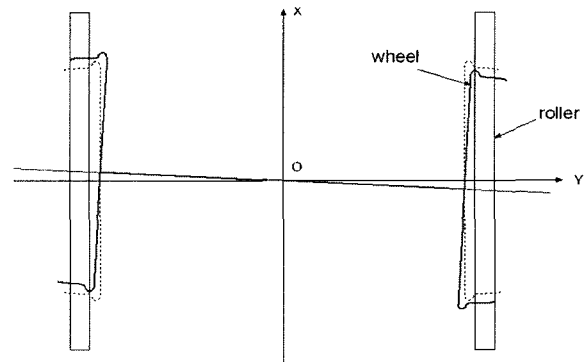


Fig. 1. Wheel/roller model(XY plane)

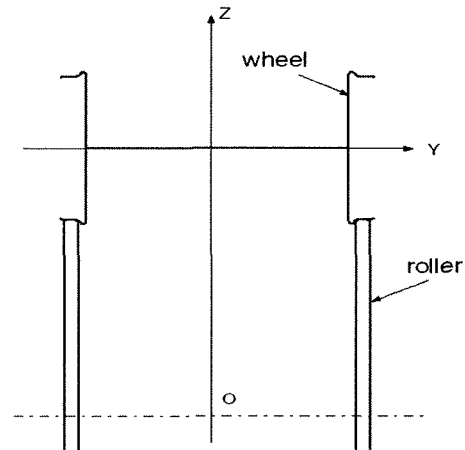


Fig. 2. Wheel/roller model(YZ plane)

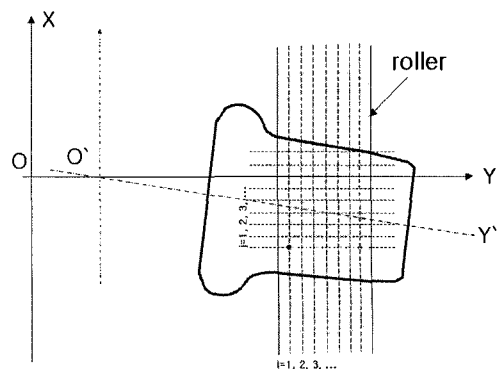


Fig. 3. Meshes on the XY plane

분석을 위하여 궤조륜에 대한 윤축의 요각을 3° 만큼 설정하여 해석하였다. 접촉점에서의 접촉반경 해석은 Hertz의 이론을 적용하였으며 이에 필요한 하중으로 축중(axle load) 15ton을 부여하였다. 윤축의 횡변위 해석구간은 $-15 \leq y_w \leq 15$ 로 하였으며 수렴기준치 ϵ 는 0.001m로 하였다[5,6,7].

3.2 해석 결과

주행시험대상에서의 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉해석 결과는 다음과 같다. 접촉점 분포를 보면 차륜/레일간 접촉점 분포는 Fig. 6에서와 같이 차륜 담면부/레일 두부, 차륜 플랜지/레일 게이지코너부에 집중되고 있다. Fig. 7은 차륜/궤조륜간 접촉점 분포로서 차륜/레일간 접촉점 분포와 분포위치가 유사함을 알 수 있다. 그러나 차륜/궤조륜 접촉에 있어서는 3차원 접촉이므로 레일상에서의 접촉점 위치가 YZ축 평면상에 존재하지 않고 3차원 공간상에 위치하게 된다. Fig. 8~Fig. 9는 각각 YX평면, YZ평면상에서의 접촉점 위치를 나타낸다.

접촉특성 해석결과는 Fig. 10~Fig. 16과 같다. Fig. 10과 같이 구름반경은 차륜/레일 접촉에 비하여 플랜지접촉영역인 6mm 이후에 다소 증가함을 보이고 있다. 이는 윤축의 요각 변위에 의하여 차륜의 플랜지 접촉이 차륜/레일간 접촉에서 보다 먼저 발생하고 있음을 의미한다. 따라서 좌우 접촉점에서의 구름반경의 차이인 구름반경차도 Fig. 11에서와 같이 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 12의 접촉점에서의 접촉각도 차륜/레일 접촉에 비하여 플랜지 접촉영역에서 다소 증가함을 보이고 있으며 이에 따른 접촉각차도 Fig. 13과 같이 같은 경향을 보이고 있다. 윤축의 물각도 Fig. 14에서와 같이 플랜지 접촉영역에서 다소 증가하는 같은 경

향을 보이고 있다. 이러한 결과는 차륜/레일 접촉이 윤축의 요각을 0°로 가정한 해석 결과임에 비하여 차륜/궤조륜 접촉은 윤축의 요각을 3° 설정하여 3차원 공간상에서 접촉점 해석을 수행한 결과 플랜지 접촉이 먼저 발생한 결과라 할 수 있다.

한편 접촉점에서의 접촉면적은 Fig. 15와 같이 차륜/레일 접촉에 비하여 차륜/궤조륜간 접촉이 감소하고 있음을 나타

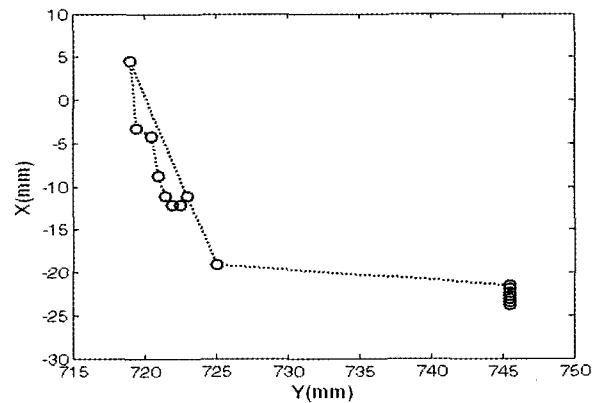


Fig. 8. Contact position at YX-plane(Rh)

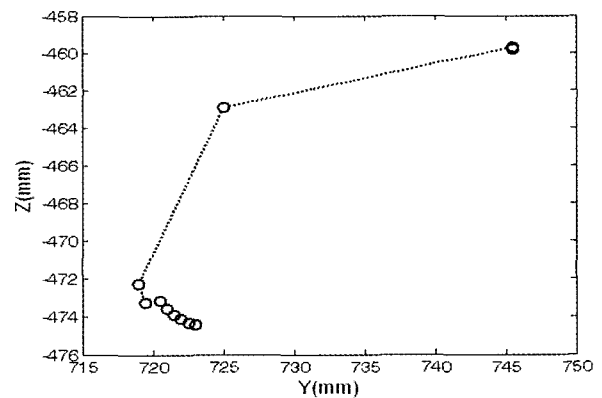


Fig. 9. Contact position at YZ-plane(Rh)

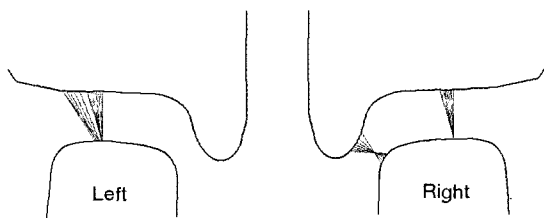


Fig. 6. Contact patches of wheel/rail contact

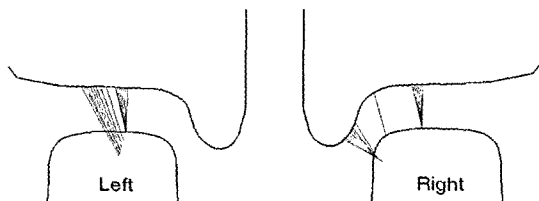


Fig. 7. Contact patches of wheel/roller contact

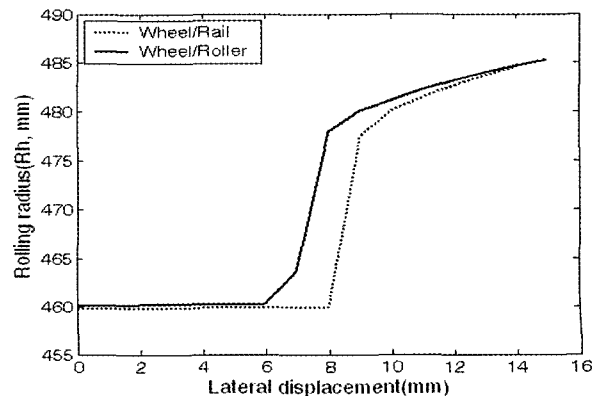


Fig. 10. Rolling radius(Rh)

내고 있다. 이는 Hertz 접촉이론을 적용한 접촉면적 계산과정에서 레일의 길이방향 반경이 무한대임에 비하여 궤조륜은 1376/2임에 비롯된 결과라 할 수 있다. 따라서 차륜/궤조륜 접촉 타원 상에서 장반경/단반경의 비도 플랜지 영역에서 차륜/레일 접촉에 비하여 크게 발생한다는 것을 Fig. 16을 통하

여 확인 할 수 있다.

또한, 등가담면구배를 살펴보면 Table 2에서와 같이 차륜/레일인 경우 0.0260임에 비하여 차륜/궤조륜인 경우에는 0.0259로서 그 차이가 매우 미미함을 알 수 있다. 이는 Fig. 12에서와 같이 등가담면구배는 일정구간의 구름반경차 기울

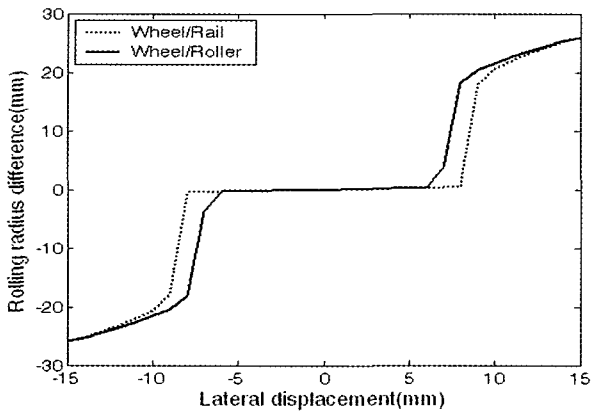


Fig. 11. Rolling radius difference

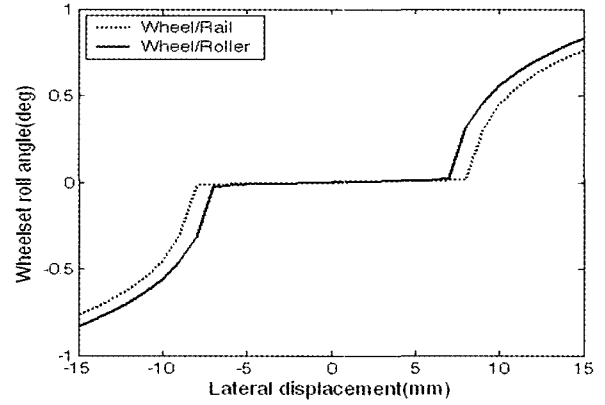


Fig. 14. Wheelset roll angle

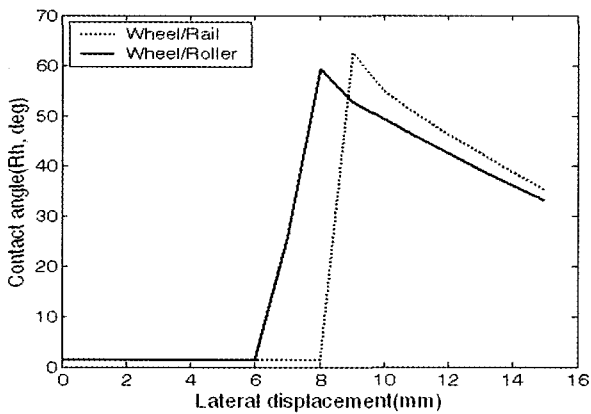


Fig. 12. Contact angle(Rh)

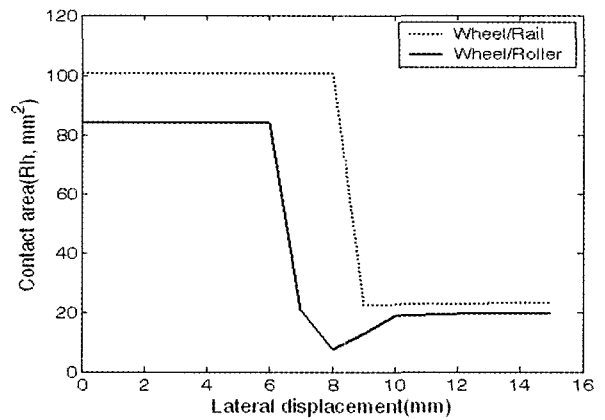


Fig. 15. Contact area(Rh)

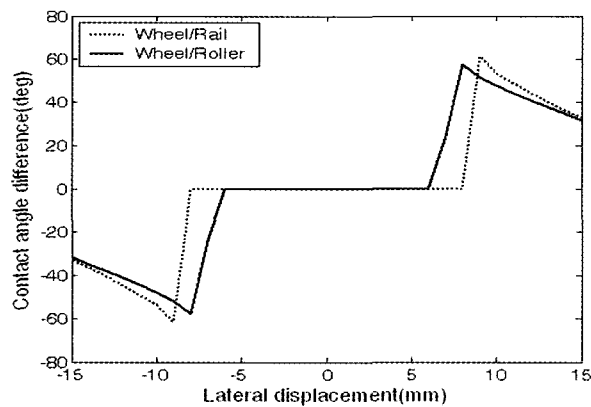


Fig. 13. Contact angle difference

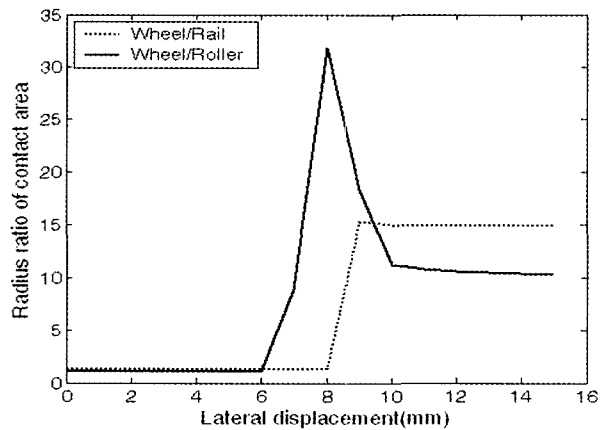


Fig. 16. Radius ratio of contact area(Rh)

Table 2. Equivalent conicity

contact condition	wheel/rail	wheel/roller
Equivalent conicity	0.0260	0.0259

기에 의하여 결정되는 데 본 해석에서 적용한 구간인 $-5 \leq y_w \leq 5$ 의 구간에서는 두 경우 거의 일치하는 값을 보이기 때문에 판단된다.

따라서 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉특성은 차륜/레일간 기하학적 접촉특성에 비하여 윤축 요각 변위에 따른 플랜지 접촉이 플랜지 접촉영역(6~8mm)에서 다소 먼저 발생하고, 이로 인한 기하학적 접촉 파라미터에 영향을 미침을 알 수 있다. 그 중 특히 가장 큰 영향은 접촉점에서의 접촉면적으로 차륜과 레일의 답면형상에 의하여 각 각 상이하겠지만 본 해석의 경우에는 차륜/레일간 접촉에 비하여 약 20% 정도 저감하는 경향을 나타내고 있다. 등가답면구배 역시 차륜, 레일의 답면형상에 의하여 각 각 상이하겠지만 본 해석에선 플랜지 접촉 영역이전의 변화가 매우 미미하므로 거의 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

대차 동특성시험기의 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉특성에 대한 해석 연구를 수행함으로써 레일 위를 주행하는 일반적 차륜/레일 기하학적 접촉특성과의 차이점을 분석하였다.

윤축 요각 변위를 고려한 차륜/궤조륜간 기하학적 접촉특성은 차륜/레일간 기하학적 접촉특성에 비하여 플랜지 접촉이 다소 먼저 발생하고 이로 인한 기하학적 접촉 파라미터 특성이 플랜지 접촉영역에서 상이하 지는 것을 알 수 있다. 그 중 특히 가장 큰 영향은 접촉점에서의 접촉면적으로 차륜, 레

일의 답면형상에 의하여 상이하겠지만 본 해석의 경우에는 차륜/레일간 접촉에 비하여 약 20% 정도 저감하는 경향을 나타내고 있다. 등가답면구배 역시 차륜, 레일의 답면형상에 따라 상이하겠지만 본 해석에선 거의 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구 결과는 향후 대차 주행시험대를 이용한 차량 입계속도 및 동특성 해석과정에서 차륜/궤조륜간 작용력 해석을 위한 접촉 기하로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 본 해석 연구의 후속 연구로서 대차주행시험대를 이용한 차량 안정성 시험평가연구가 지속적으로 진행될 것으로 기대한다.

참고 문헌

1. Satoh, E., Miyamoto, M. (1993), "Geometrical contact between wheel and roller rig", Journal of the Japan Society of the Mechanical Engineers, Vol.59, No.562, pp.1686-1693.
2. ORE Committee C116 (1973), "Interaction between vehicles and track, Report No.3 : Geometry of the contact between wheelset and track", ORE Report C 116, pp.1-35
3. Heller, R., Cooperrider, N. K. (1977), "Users' manual for asymmetric wheel/rail contact characterization program", FRA/ORD-78/05, pp.1-26.
4. "Calculation of equivalent conicities for the S1002 wheel profile on UIC60 Rails", ERRI Report DT54/E.
5. 허현무, 유원희 (2005), "고속철도 차륜답면의 마모특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제8권, 제5호, pp.477-482.
6. 허현무, 권성태 (2005), "차륜/레일 기하학적 인자에 의한 등가답면구배 영향 분석", 한국철도학회논문집, 제8권, 제5호, pp.490-494.
7. 허현무 (2004), "경제적 차륜답면관리기술 개발", 한국철도기술연구원.