

차륜/레일 기하학적 인자에 의한 등가담면구배 영향 분석

Analysis on the Influence of Wheel/Rail Geometric Parameters on the Equivalent Conicity

허연무* · 권성태*

Hyun-Moo Hur · Sung-Taé Kwon

Abstract

The geometric parameters between wheel and rail change wheel/rail contact geometry characteristics, and this influence dynamic behavior of rolling stock. So, the selections of optimum geometric parameters between wheel and rail is important for planning of railway system. In this study, we have analyzed the influence of geometric parameters like wheel flange-back distance, gage, and rail inclination on the equivalent conicity relating to dynamic behavior. The analyses show the following results. The widening of wheel flange-back distance, the decrement of gage increase the equivalent conicity and the increment of rail inclination show the sharp change of the equivalent conicity.

Keywords : Wheel(차륜), Rail(레일), Equivalent Conicity(등가담면구배)

1. 서론

철도차량이 직선선로를 고속 주행할 경우의 안정성은 차량 현가계 구성요소인 스프링, 댐퍼, 부쉬류와 같은 현가계요소 특성에 의하여 결정되며, 차륜과 궤도의 기하학적 적합성도 차량 안정성에 큰 영향을 미친다. 이러한 차륜과 궤도의 기하학적 적합성은 차륜과 레일의 담면형상(profile), 궤간(gage), 차륜내면거리(flange-back distance), 레일 경좌(rail inclination)등과 같은 기하학적 인자에 영향을 받는다. 이러한 기하학적 인자는 차륜과 레일의 접촉시 기하학적 접촉점 위치를 변화시키며 이는 특히 고속주행시 안정성과 관련된 인자인 등가담면구배 특성을 변화시켜 차량의 동적 거동에 영향을 미친다[1-3].

따라서, 본 연구에서는 차륜/레일의 기하학적 인자인 차륜내면거리, 궤간, 레일경좌의 변화에 따라 차량의 동적 성능과 관련된 등가담면구배 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 국내 기존철도에 적용중인 차륜과 레일의 담면형상을 중심으로 각 인자의 변화에 따른 기하학적 접촉특성을 분석하였다.

2. 등가담면구배 영향 분석

차륜의 내면거리, 궤간의 치수, 레일경좌와 같은 기하학적 인자 변화에 의한 차륜과 레일의 접촉특성 영향 분석을 수행하였다. 차륜과 레일간의 기하학적 접촉특성 해석을 위하여 1개의 차축과 2개의 차륜으로 구성된 윤축모델과 좌우 레일로 구성된 레일모델을 구성하였다.

차륜의 담면형상은 접촉시 윤축의 횡방향 거동에 따른 기하학적 접촉특성이 연속적으로 나타나는 구배 1/20인 원호형 heumann담면으로 하였으며 레일의 두부형상은 국내 기존선 구간의 대표적 레일형상인 50kgN레일을 대상으로 하였다. 접촉 해석시 활용한 형상 및 수치는 관련 도면에 의거하여 모델링하였다. 차륜/레일간 접촉점위치 해석은 자체 개발한 차륜/레일 기하학적 접촉특성 프로그램을 활용하였으며 등가담면구배의 영향을 중심으로 기하학적 특성 변화를 분석하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 본 해석에 적용한 차륜 및 레일에 대한 형상을 나타낸다.

2.1 등가담면구배

원추형 담면이 아닌 원호형 담면형상을 적용한 차륜의 경우, 윤축횡변위와 좌우 차륜의 구름반경차(rolling radius difference)의 관계는 선형적이지 않으며 Fig. 3과 같이 비선

* 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
E-mail : hmhur@krii.re.kr
TEL : (031)460-5245 FAX : (031)460-5289
* 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

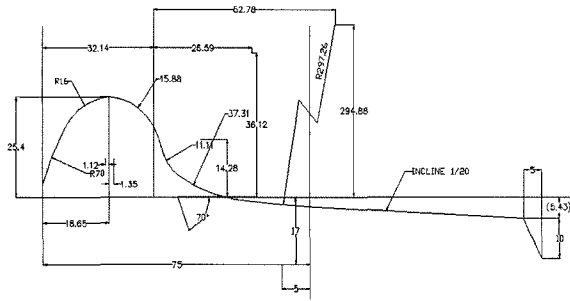


Fig. 1. KNR 1/20heumann profile

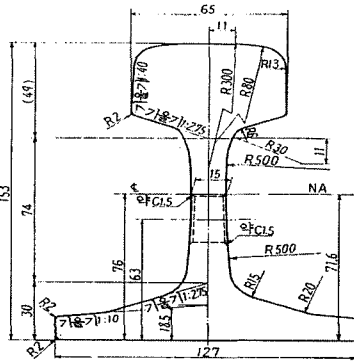


Fig. 2. KNR 50kgN Rail

형적으로 나타난다. 이러한 비선형 관계를 일차함수로 선형화 하여 구한 기울기의 반을 등가담면구배(equivalent concity, λ_e)라 하며 아래의 식으로 정의한다[4].

$$\lambda_e = \frac{1}{2} \int \frac{N(y)(r_R - r_L)}{y} dy$$

여기서, $N(y)$: weighting function
 $r_R - r_L$: rolling radius difference(mm)
 y : lateral shift(mm)

윤축 횡변위에 따른 윤축의 운동빈도에 대해서는 weighting function이 부가되며, 통상적으로 weighting function은 정규분포가 활용된다. 등가담면구배 산정시의 정규분포에 적용하는 수치를 예를 들면, 좌우차륜 및 레일형상이 대칭이라고 가정할 때 평균(m) 0, 표준편차(σ) 1.5~2.5가 통상적으로 적용되며 $\pm 2\sigma$ 의 범위까지 일차함수로 선형화한다.

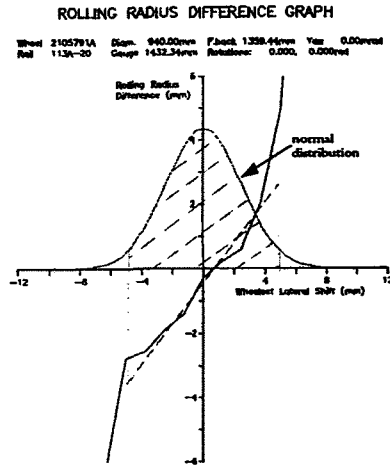
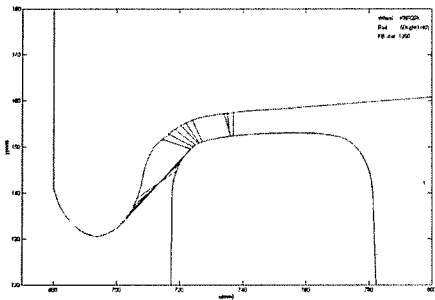


Fig. 3. Rolling radius difference

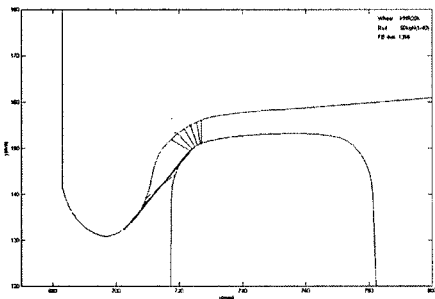
2.2 차륜내면거리의 영향

레일경좌 1/40, 궤간 1,435mm인 레일에 대하여 차륜내면거리를 1,350~1,360까지 변화시키면서 차륜/레일 접촉시의 기하학적 특성을 분석하였다. Fig. 4는 궤간 1,435mm일 때, 차륜내면거리 변화에 따른 차륜/레일 접촉점 분포를 나타낸다. 국내 여객열차 차량의 통상적인 윤축 내면거리 기준치인 1,356mm일 경우의 접촉점 분포와 비교하면 내면거리가 작아지면 접촉점 분포가 차륜담면부와 레일두정면으로 이동하며, 반대로 내면거리가 커지면 차륜 플랜지부와 레일의 게이지코너부로 집중 분포됨을 알 수 있다.

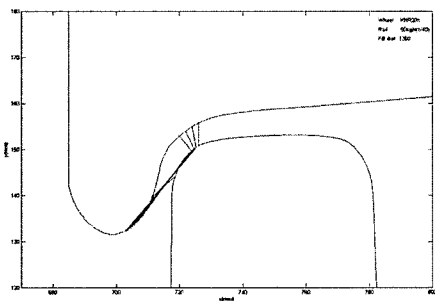
따라서, 윤축의 횡방향 이동에 따른 차륜의 구름반경은 플랜지부 접촉시 반경이 증가하며 이는 좌우 차륜의 구름반경의 차이를 크게 하게 한다. 그로 인하여 Fig. 5와 같이 윤축 횡변위에 따른 구름반경차의 기울기는 내면거리가 증가하면 커지며, 감소하면 작아지는 경향을 보임을 알 수 있다. 또한, Fig. 6과 같이 차륜 접촉각차(contact angle difference)와 Fig. 7의 윤축롤각(wheelset roll angle)의 변화도 윤축 횡변위에 따라 내면거리 증가에 따라 비례하는 경향을 보임을 알 수 있다. Fig. 8은 차륜내면거리에 따른 등가담면구배의 영향을 나타낸다. 등가담면구배 산출시 평균(m)은 0, 표준편차(σ)는 1.5 혹은 2.5로 하여 2σ 까지 산출하였다. 등가담면구배 산정영역을 $\pm 3mm$ 혹은 $\pm 5mm$ 로 함에 따라 결과가 다소 차이는 있으나 내면거리 증가에 따라 등가담면구배도 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이는 앞서 접촉점 분포가 게이지코너부로 이동함에 따라 좌우 차륜반경차가 커짐에 기인한다고 할 수 있다.



(a) flange-back distance: 1350mm



(b) flange-back distance: 1356mm



(c) flange-back distance: 1360mm

Fig. 4. Contact points distribution according to the variation of flange-back distance(gage 1435mm)

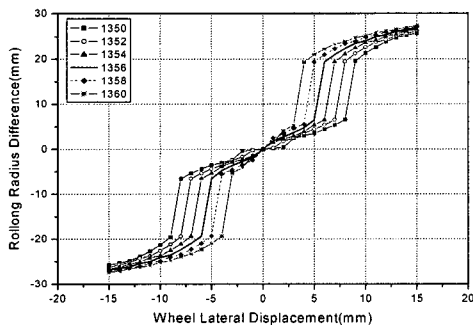


Fig. 5. Rolling radius differences according to the flange-back distance

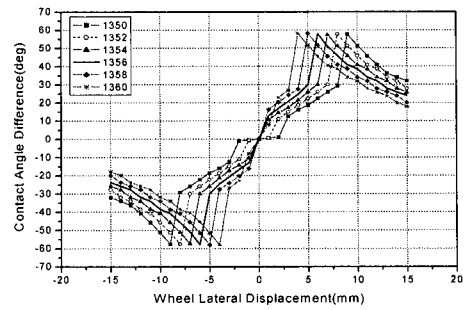


Fig. 6. Contact angle differences according to the flange-back distance

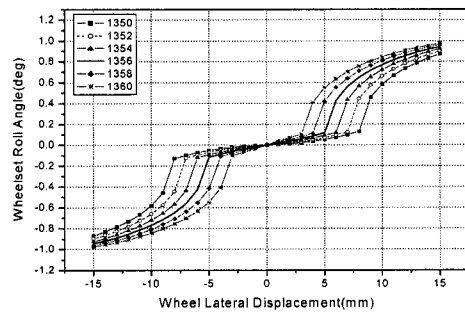


Fig. 7. Wheelset roll angles according to the flange-back distance

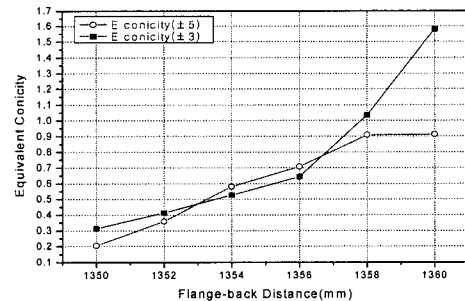
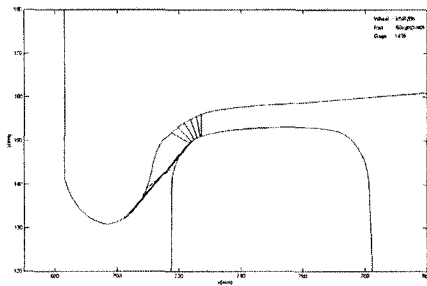


Fig. 8. The influence of the flange-back distance on the equivalent conicity

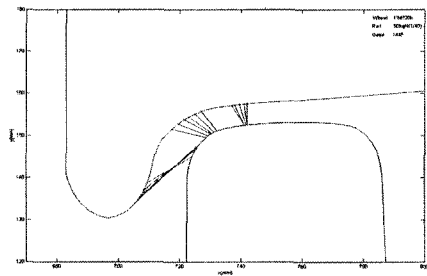
2.3 궤간의 영향

차륜내면거리가 1,356mm인 윤축에 대하여 레일경좌 1/40인 레일의 궤간을 1,430~1,445mm의 범위 내에서 궤간 치수를 변화시켜 차륜/레일 접촉시 기하학적 접촉특성을 분석하였다.

Fig. 9는 궤간의 치수 변화에 대하여 차륜/레일 기하학적 접촉해석을 수행하여 구한 접촉점 분포를 나타낸다. 표준궤간 치수인 1,435보다 작은 경우를 가정한 Fig. 9(a)의 궤간 1430mm일 경우를 보면 궤간이 작아짐에 따라 차륜플랜지



(a) gage: 1430



(a) gage: 1440

Fig. 9. Contact points distribution according to the gage (flange-back distance 1,356mm)

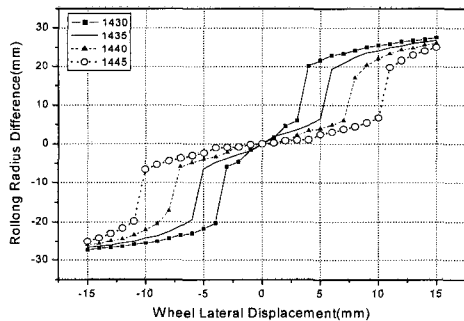


Fig. 10. Rolling radius differences according to the gage

와 레일간의 유간이 작아지며 따라서 윤축 횡변위에 따른 차륜/레일 접촉점은 차륜플랜지와 레일게이지코너부로 분포됨을 알 수 있다. 반면 Fig. 9(b)와 같이 궤간 치수가 증가할 경우를 가정한 궤간 1440mm의 경우에는 차륜플랜지와 레일간의 유간은 커져서 접촉점은 차륜담면부와 레일두정면으로 이동하여 분포하게 된다.

따라서, 궤간의 감소는 Fig. 10과 같이 차륜/레일 접촉시 윤축의 횡방향 이동에 따른 차륜의 구름반경차의 기울기를 크게 한다. 이는 차륜내면거리 증가와 유사한 기하학적 접

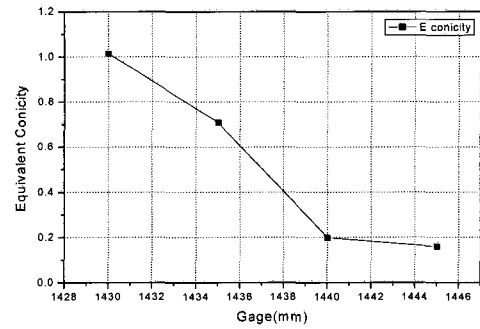


Fig. 11. The influence of the gage on the equivalent conicity

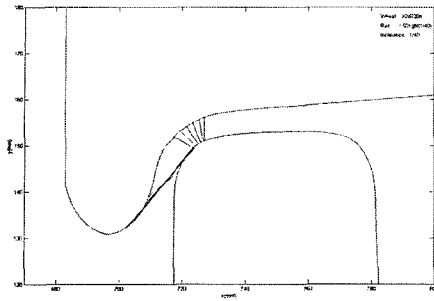
촉특성을 보이며, 결국 등가담면구배를 증가시키는 요인으로 작용한다. Fig. 11은 궤간의 치수 변화에 따른 등가담면구배의 영향을 나타내며 궤간의 증가에 따라 등가담면구배는 감소하는 경향을 나타낸다.

2.4 레일경좌의 영향

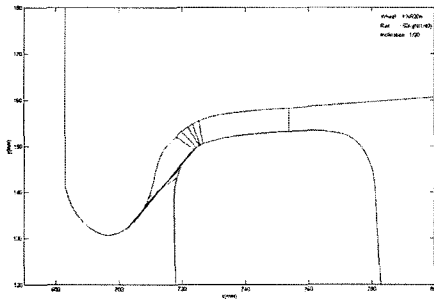
레일경좌는 레일 부설시 침묵에 대한 레일의 기울기로 국내 기존철도에서는 1/40 구배가 부여되어 있고 UIC60레일이 부설된 고속철도 고속선 구간에서는 1/20 구배로 되어 있다. 따라서 레일부설기 기울기에 의한 차륜/레일 기하학적 접촉특성을 분석하고자 레일경좌에 의한 영향 분석을 수행하였다.

해석조건은 차륜내면거리가 1,356mm인 윤축, 궤간 1,435mm인 레일의 조합일 경우, 레일경좌가 변화함에 따른 차륜/레일 접촉시 기하학적 특성을 분석하였다. Fig. 12(a)는 레일경좌 1/40인 경우의 접촉점 분포를 나타내며, Fig. 12(b)는 레일경좌 1/20인 경우의 접촉점 분포를 나타낸다. 차륜/레일 접촉시의 접촉점 분포를 살펴보면, 레일경좌 1/20인 경우가 레일경좌 1/40인 경우에 비하여 접촉점 분포가 차륜플랜지부와 레일게이지코너의 측부로 이동함을 알 수 있다. 이는 차륜과 레일의 접촉시 레일의 부설 기울기에 따라서 기하학적 접촉특성이 변화하여 Fig. 13과 같이 등가담면구배 해석 영역인 $\pm 5\text{mm}$ 이내 영역에 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 14는 레일경좌 변화에 대한 등가담면구배의 영향을 나타낸 선도이다. 레일경좌의 기울기가 작을수록 즉, 레일경좌 1/40이 경좌1/20에 비하여 내면거리 변화에 따른 등가담면구배 변화가 작음을 알 수 있다. 이는 레일경좌의 기울기가 클수록 차륜/레일 접촉시 등가담면구배 해석영역에서 민감한 형상변화를 유발하고, 이는 차륜의 구름반경차 기울기를 크게 하여 등가담면구배를 증가시키게 하는 기하학적 요인으로 작용함을 알 수 있다.



(a) rail inclination 1/40



(b) rail inclination 1/20

Fig. 12. Contact points distribution according to the rail inclination

3. 결론

차륜, 레일의 기하학적 인자인 차륜내면거리, 꺾간, 레일 경좌의 변화에 따라 차량의 동적 안정성과 관련된 등가담면구배 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 국내 기존철도에 적용중인 차륜과 레일의 담면형상을 대상으로 각 인자의 치수 변화에 따른 기하학적 접촉특성 분석 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 차륜내면거리가 증가하거나 꺾간이 감소하면 윤축의 횡방향 이동시 차륜과 레일의 접촉점 분포는 차륜플랜지부, 레일헤이지코너부로 집중 분포하게 되어 좌우차륜의 구름반경차, 접촉각차, 윤축롤각의 증가를 유발하여 등가담면구배를 증가시키는 경향을 나타낸다.
- (2) 레일경좌의 기울기가 클수록 즉, 레일경좌 1/20이 경좌 1/40에 비하여 차륜내면거리 변화에 따른 등가담면구배 변화를 크게 하는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

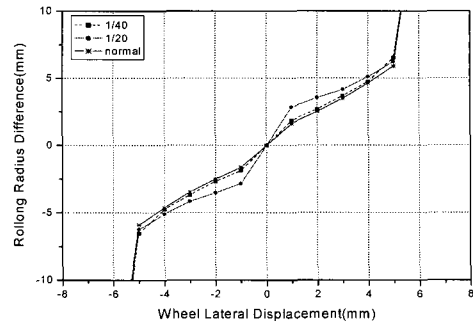


Fig. 13. Rolling radius differences according to the rail inclination

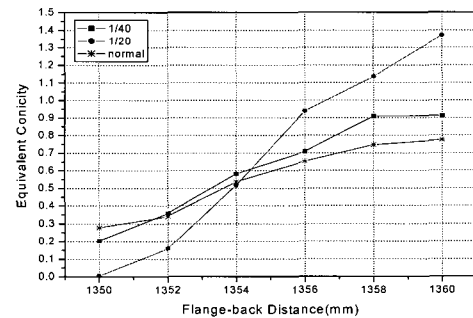


Fig. 14. The influence of the rail inclination on the equivalent conicity

상기한 바와 같이 차륜/레일간 기하학적 인자의 수치 변화에 대한 기하학적 접촉특성은 민감하게 변화하는 특성을 보이고 있음을 파악할 수 있다. 따라서 차량의 안정된 동적 거동 확보 측면에서 철도시스템 계획 초기 단계에서부터 기하학적 인자에 대한 적합성 검토가 선행되어야 할 것으로 사료되며, 이와 더불어 향후 차륜/레일간 인터페이스 분야에 대한 최적화 연구가 지속적으로 수반되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Nefzger, "Development of the S1002 Wheel Profiles on the DB Network", ERI Report DT81(C116)E
2. R. Heller, N.K. Cooperrider, "Users Manual for Asymmetric Wheel/Rail Contact Characterization Program", 1977
3. "Calculation of Equivalent Conicities for the S1002 Wheel Profile on UIC60 Rails", ERI Report DT54/E
4. 허연무 외, "경제적 차륜담면관리기술 개발 3차년도 최종보고서", 철도청, 2004