

휠-레일 접촉 해석을 통한 협궤용 전동차 차륜 디자인 분석 Study on wheel profile for railway vehicle with narrow gauge by profile contact analysis

양현석* 이원상* 남학기*
Yang, Hun-Suk Lee, Won-Sang Nam, Hak-Gi

ABSTRACT

Main parameters of wheel-rail combination are investigated by profile analysis. A rolling radius difference is one of the main characteristics that describe a contact between wheelset and railway track, which in turn defines the dynamic behavior of a wheelset. This paper describes functional relation between lateral wheelset displacement and rolling radius difference or conicity on new/worn wheel of existing narrow gauge vehicle. Information about curving behavior and running stability are given by this both relations. The optimal wheel profile for railway vehicle with narrow gauge is adopted through this analysis. And, the applicable limit value of conicity which is used in order to do dynamic simulation of vehicle is presented.

1. 서론

구름 반경 차(Rolling Radius Difference)는 차륜과 레일의 접촉현상을 설명할 수 있는 주요 특성으로서 차량 윤축(Wheelset)의 동적 거동에 큰 영향을 미친다. [1]

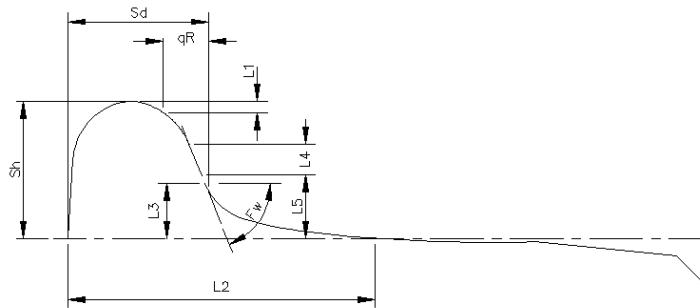
본 연구는 차량의 동적 거동 및 주행 성능에 영향을 주는 차륜 답면의 최적 선정을 위해, 윤축의 횡방향 거동에 따른 차륜의 구름 반경 차 및 답면 구배(Conicity) 해석 등 차륜-레일 접촉 해석을 기준 협궤용 차량의 차륜에 대하여 실시하였다. 이를 통해 협궤용 준고속 전동차 개발 대차에 적용될 차륜 답면 형상을 선정하였으며, 또한 주행거리에 따른 답면 구배 변화를 분석함으로서 차량의 동특성 해석에 적용될 답면 구배의 한계 값을 확인할 수 있었다.

* (주)로템 주행장치개발팀. 비회원

2. 차륜 담면형상 분석

차륜/레일의 적합성 판단을 위해 담면 형상 분석 및 차륜/레일 접촉 핵석이 요구된다. 담면 형상 분석을 위해 필요한 변수를 정의하고 실제 운행중인 협궤용 차량의 차륜 담면에 적용하여 윤축의 횡방향 변위에 따른 Rolling radius difference 와 Conicity에 대한 분석을 실시하였다. 이는 차량의 주행성능에 영향을 주는 주요 설계 고려 대상으로 차륜 형상을 결정짓는 중요 지침으로 활용된다.

차륜 담면 형상 분석을 위해 차륜 및 레일 담면 형상의 다른 변수가 요구된다. Fig 1.에 차륜 담면 형상 분석에 있어 필요한 변수들을 정의하였다.



Sd	Flange thickness	(L2, L3)
Sh	Flange height	(L2)
qR	Measure of flange	(L1, L2, L3)
Fw	Flange angle	(L2, L4, L5)

그림 1 Wheel parameter

현재 적용중인 2종(Case 1 & Case 2)의 협궤용 차량의 훨 담면 형상에 대하여 S_d , Sh , qR , Fw 을 정의하기 위해 필요한 입력 값들은 L_2 를 제외하고는 모두 값이 사용된다. 여기서, L_2 는 좌우 차륜간의 Taping line distance를 정의하기 위한 변수로서 활용된다.

- L1 2 mm
- L2 65 mm (Case 1) & 70 mm (Case 2)
- L3 10 mm
- L4 5 mm
- L5 13 mm

윤축이 좌우 레일의 중심에 위치 할 경우 양 차륜의 구름 반경 r_1 및 r_2 는 같다. 즉,

$$r_1 = r_2 = r$$

윤축의 횡방향 변위가 발생함에 따라 좌우 차륜의 구름 반경 차이가 발생하는데, 이를 Rolling radius difference로 정의한다. 즉,

$$\Delta r = r_1 - r_2$$

원추 담면에 대한 Rolling radius difference는 그림 2에 나타나 있다. 일반적으로 차륜 단면의 Rolling

radius difference는 윤축의 횡방향 거동에 따라 비선형성을 가진다. 이는 차륜의 마모로 인하여 차륜 단면 형상이 왜곡되며 결과적으로 Δr 은 그림 2와 같이 비선형성을 나타낸다. 원추 단면에서 차륜의 마모가 진행될수록 윤축의 횡방향 변위에 따라 Rolling radius difference의 변화를 크게 나타내며, 이로 인하여 Conicity가 마모 차륜 담면에서 큰 값을 나타낸다. Rolling radius difference는 차륜과 레일의 접촉 거동을 설명할 수 있는 주요 특성 중 하나이다. 차륜과 레일의 접촉 유형은 윤축의 동적 거동을 결정짓는 주요 요인

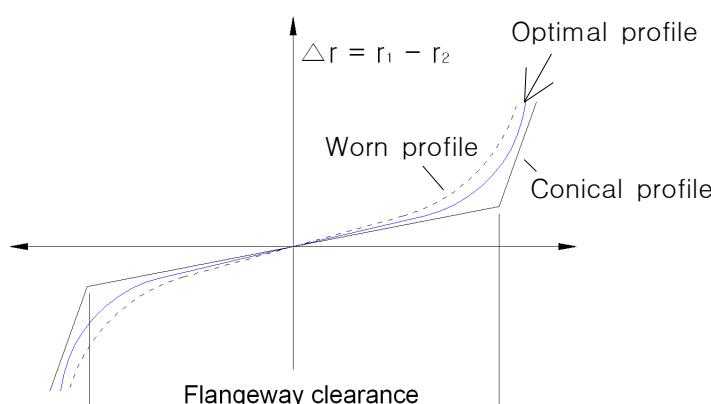


그림 2 윤축 거동에 따른 Rolling radius difference

이며, 나아가 차량의 동적 거동에 큰 영향을 미친다.

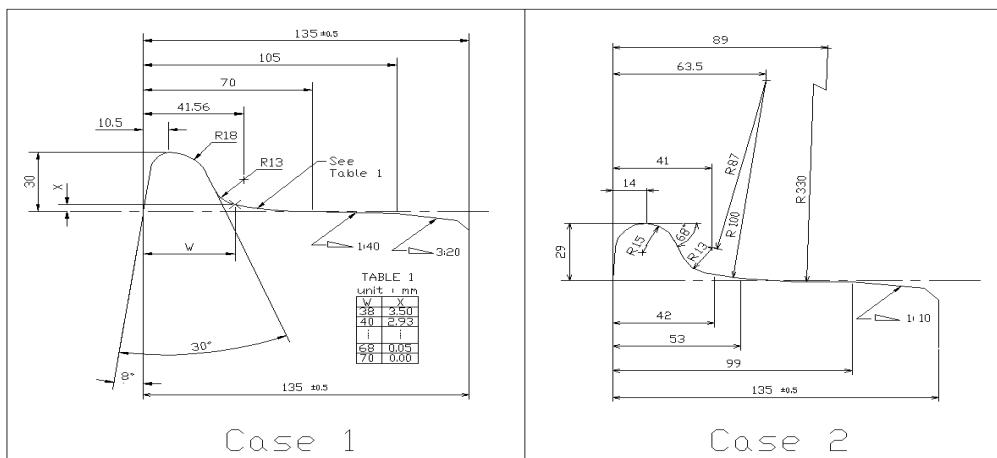


그림 3 Theoretical wheel profile drawing Case 1 and Case 2

실제 운행중인 협궤용 차량에 사용된 신조 차륜 단면 형상이 그림 3에 나타나 있다. 차륜 단면 모두 135mm의 두께를 가지며, Case 1 형상은 원추 단면과, Case 2는 원호 단면과 유사한 형상을 보여주고 있다.

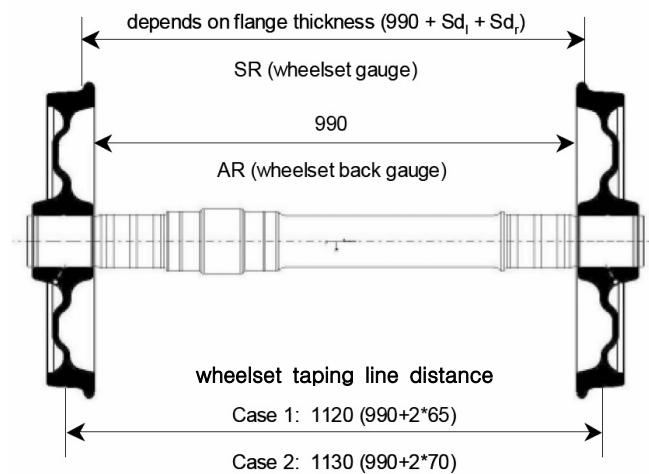


그림 4 Wheelset parameter

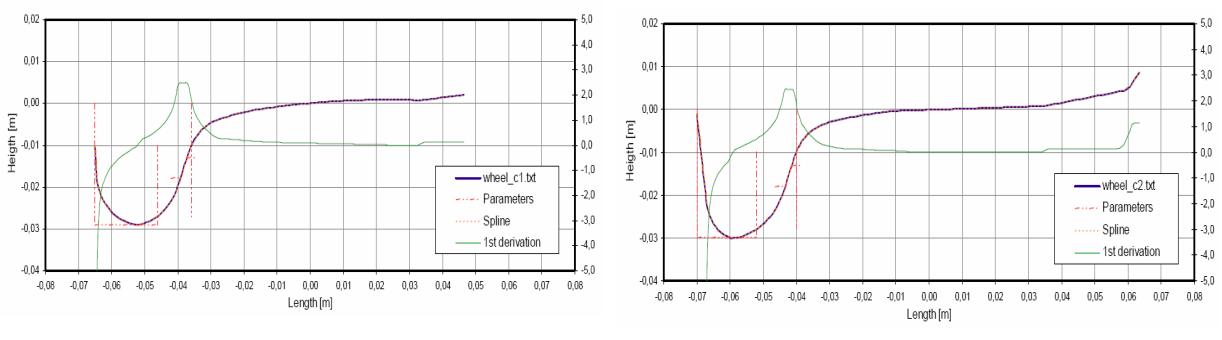
고 있다. 단면 형상에 대한 1차 미분값을 통하여 단면 형상 곡선에 대한 품질 확인이 가능하며 단면 접촉 해석시 필요한 데이터를 제공하여 준다.

차륜-레일 접촉 해석을 위해 필요한 윤축에 대한 변수가 그림 4에 나타나 있다. 또한 필요한 레일에 대한 정보는 레일의 설치 경사(1/40)와 궤간으로 요약된다. 궤간은 레일 상면으로부터 14mm 아래에서 측정되어 진다. 실제 협궤용 차량이 운행중인 협궤 궤간은 1,067mm이다.

Taping line distance는 차륜간 내면 거리, AR 과 L2의 합으로 표현된다. Taping line distance는 차량의 동특성 해석에 있어 필요한 변수로서 윤축의 중립 상태에서의 양쪽 차륜에 대한 차륜-레일 접촉점 거리를 일컫는 의미로 사용되어진다.

그림 5는 차륜 단면 Case 1 과 Case 2에 대한 단면 형상 해석을 수행한 결과를 보여주

며, 차륜 단면 형상 곡선에 대한 품질 확인이 가능하며 단면 접촉 해석시 필요한 데이터를 제공하여 준다.



(a) Case 1 wheel profile

(b) Case 2 wheel profile

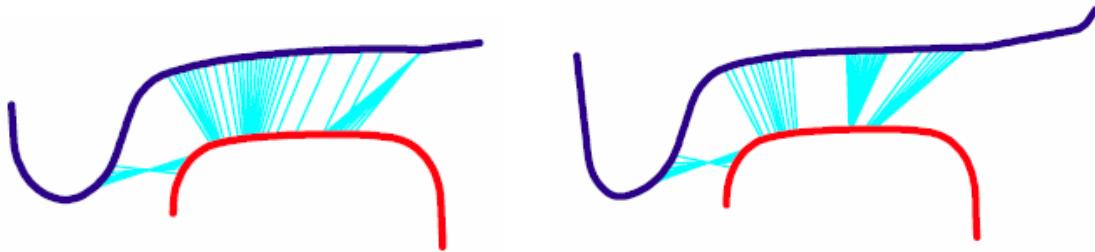
그림 5 Wheel profile analysis

Parameter	Case 1	Case 2
Sd	29.2 mm	29.9 mm
Sh	29.0 mm	29.9 mm
qR	10.3 mm	11.9 mm
Fw	68.0 °	68.0 °
Sr	1048.4 mm	1049.8 mm
AR	990.0 mm	

표 1 신조 차륜의 차륜 형상 변수

의 위험이 증가하는 경향을 나타낸다. [2]

윤축의 횡방향 변위에 따른 차륜-레일간 접촉점의 변화가 그림 6에 나타나 있다. 윤축의 횡방향 변위에 따라 접촉점이 급격히 이동하는 경우 좌우 차륜의 구름 반경의 차이가 크게 나타난다. 결과적으로 윤축의 횡방향 변위에 따라 Rolling radius difference가 큰 변화를 보인다. 이는 윤축의 불안정한 거동의 요인으로 작용 한다. 그림 6에서 보듯이 Case 2의 차륜-레일 접촉 현상이 Case 1에 비해 Tread 부분에에서의 접촉점이 집중되는 현상을 보여주고 있다. 이는 주행중 윤축의 거동에 따른 차륜 마모와 윤축의 동적 거동에 좋지 않은 영향을 준다. 특히, 차륜과 레일의 접촉점이 특정 부근에서 집중될 경우 편마모 현상을 초래 할 수 있다.

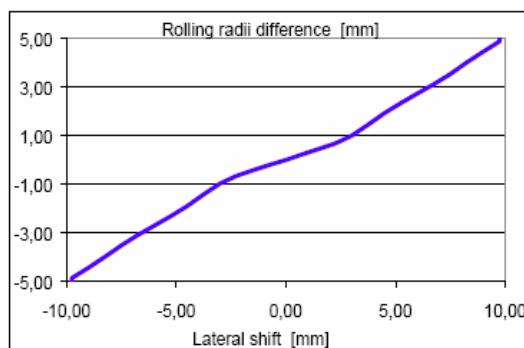


(a) Wheel-rail contact of Case 1

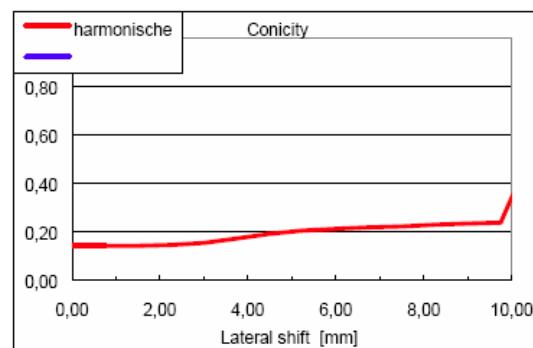
(b) Wheel-rail contact of Case 2

그림 6 Wheel-rail contact

그림 7에 나타난 차륜-레일 접촉 해석 결과는 차량 시스템에 의한 영향을 제외한 차륜의 형상에 기인한 차량의 동적 거동을 분석할 수 있는 지표로서 활용이 가능하다. 그림 (a)와 (c)는 윤축의 횡방향 변위에 따른 Rolling radius difference 해석 결과 보여주고 있다. Case 2 차륜에 대한 윤축의 ±2mm 이동 범위에서의 Rolling radius difference 변화가 Case 1 보다 심한 현상을 보여주고 있다. 이는 주행시 윤축의 안정적 거동에 영향을 미친다.

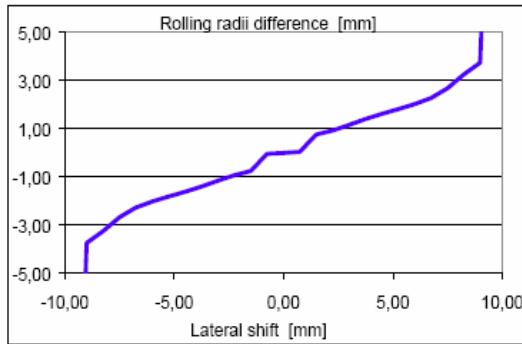


(a) Rolling radius difference of Case 1

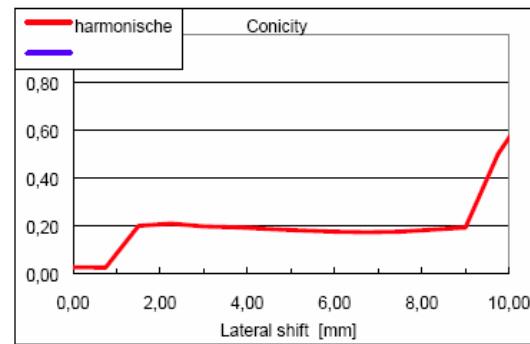


(b) Conicity of Case 1

협궤용 차량의 신조 차륜에 대하여 계산된 차륜 형상 변수를 정리하면 표 1과 같다. Case 1 과 Case 2 차륜에 대한 차륜 형상 변수의 계산 결과 Flange thickness와 height 및 Taping line distance에서 주요 차이를 보여주고 있다. Flange thickness, Sd는 차륜의 플랜지에 대한 마모량을 정의하는 변수로서 신조 및 마모 차륜 사이의 플랜지 두께 차이가 곡선 주행에 의해 발생한 플랜지 마모량을 나타낸다. 플랜지 angle, Fw는 차량의 틸선에 영향을 주는 변수로 플랜지 angle이 감소함에 따라 Flange-Climb 탈선



(c) Rolling radius difference of Case 2



(d) Conicity of Case 2

그림 7 Wheel-rail contact analysis result

윤축의 횡방향 거동에 따른 Rolling radius difference 결과를 통행 차륜 플랜지와 레일간의 거리를 확인 할 수 있다. 즉, Rolling radius difference의 급격한 값 변화가 일어나는 지점에서의 윤축 횡변위가 차륜 플랜지와 레일 내면간의 거리를 나타낸다. Case 1의 경우 약 9.7mm, Case 2는 약 9.0mm의 플랜지-레일 내면간 거리를 가진다.

그림 7의 (b)와 (d)는 윤축의 횡방향 변위에 따른 각 차륜에 대한 Conicity의 계산 결과를 보여준다. Conicity는 윤축의 횡방향 변위에 대한 접촉점에서의 좌우 차륜의 회전 반경 변화율로서 차량의 주행 안전성에 영향을 준다. Conicity가 큰 값을 가질 경우 곡선 주행성능이 향상되는 반면 직선에서의 주행 안정성이 떨어진다. 반대로, Conicity가 작은 값을 가질 경우 곡선 주행에서의 충분한 steering force를 위한 Rolling radius difference가 발생하지 않아 곡선 추종성이 떨어지는 반면 직선에서의 주행 안전성이 향상되는 특성을 보여준다.

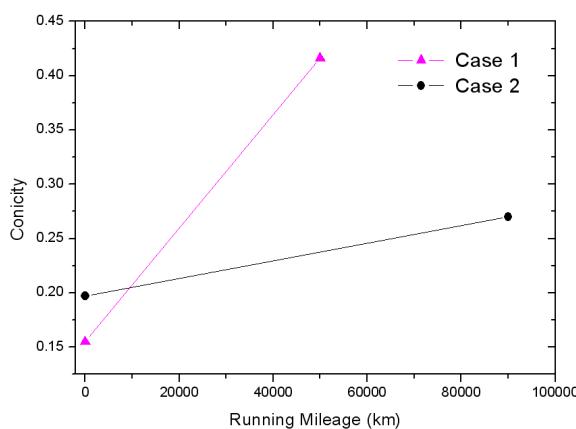


그림 8 Running Mileage vs Conicity

였으며 이는 곧 Conicity 값의 변화에 영향이 Conicity는 주행거리가 증가함에 따라 즉, 마모가 진행됨에 따라 초기 약 0.155 정도인 Conicity 값이 0.416 정도로 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 반면 Case 2의 경우 신조 차륜에서의 0.194 정도인 Conicity는 주행거리의 증가에 따라 0.27정도로 Case 1보다 적은 증가폭을 보여주고 있다. 실제로 Case 2의 차륜(R8T) 경도가 Case 1 차륜(R7T)보다 높은 재질을 사용함으로서 주행 거리에 따라 마모정도의 차이가 발생하였다. 결론적으로 주행성능을 고려하여 선정한 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다. 협궤용 차량의 주행 안정성 평가를 위한 시뮬레이션 해석시 필요한 차륜의 Conicity는 0.15 ~ 0.45 범위내에서 적용하는 것이 적당함을 알 수 있다.

3. 결론

윤축의 횡방향 변위에 대한 Rolling radius difference와 Conicity 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 차륜-레일 접촉 해석을 통한 협궤용 차량의 차륜 단면 형상 분석
- ② 윤축의 횡방향 거동에 따른 Rolling radius difference 분석

Case 2 차륜의 Rolling radius difference가 심하게 변하는 영역에서는 Conicity 또한 심한 값 변화를 나타내고 있다. 이는 차량의 곡선 및 직선 주행 성능을 저하시키는 요인으로 작용한다.

Case 1의 경우 주행 거리의 증가로 인하여 차륜의 마모가 진행됨에 따라 초기 약 0.155 정도인 Conicity 값이 0.416 정도로 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 반면 Case 2의 경우 신조 차륜에서의 0.194 정도인 Conicity는 주행거리의 증가에 따라 0.27정도로 Case 1보다 적은 증가폭을 보여주고 있다. 실제로 Case 2의 차륜(R8T) 경도가 Case 1 차륜(R7T)보다 높은 재질을 사용함으로서 주행 거리에 따라 마모정도의 차이가 발생하였다. 결론적으로 주행성능을 고려하여 선정한 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다. 협궤용 차량의 주행 안정성 평가를 위한 시뮬레이션 해석시 필요한 차륜의 Conicity는 0.15 ~ 0.45 범위내에서 적용하는 것이 적당함을 알 수 있다.

③ 차륜 형상 및 주행 거리에 따른 Conicity 변화 확인

향후 차량의 동적 특성 및 마모에 대한 분석을 통하여 선정된 차륜 형상에 대한 적합성의 검증 작업이 필요하며 이러한 과정을 거쳐 협궤용 차량에 적합한 차륜 형상이 결정 될 것이다.

참고문헌

1. I.Y.Shevtssov, V.L.Markine, C.Esveld "Optimal design of wheel profile for railway vehicles", CM2003, 2003
2. Kevin J. Sawley, "Wear/Rail Profile maintenance", 2001
3. 허현무, 이찬우, "기존선 차륜답면형상의 마모패턴 분석", 한국철도학회 학술대회, 2003