

차륜/레일 기하학적 접촉 시뮬레이션 프로그램 개발

Development of a Wheel/Rail Geometric Contact Simulation Program

한형석* 이은호* 김재철**
Hyung-Suk Han En-Ho Lee Jae-Chul Kim

ABSTRACT

Wheel/Rail geometric constraint relationships, such as effective conicity and gravitational stiffness, strongly influence the lateral dynamics of railway vehicles. In general, these geometric contact characteristics are nonlinear functions of the wheelset lateral displacement. There is a need to develop a wheel/rail contact simulation program for wheels and rails with arbitrary profiles for the prediction of the dynamic behavior of railway vehicles. An algorithm to simulate any combination of wheels and rails is employed and a GUI for easy analysis is constructed. The simulation program is applied to KTX which will run on both KTX and conventional rails, two rail standards having different rail profiles. The results show that the two rail systems have different geometric contact characteristic

1. 서론

차륜과 레일의 형상에 따른 차륜/레일 기하학적 접촉 특성은 철도차량의 동적 거동과 궤도의 유지보수에 지배적인 영향을 미친다. 접촉 특성에 따라 차량의 임계속도, 안전성 및 레일에 작용하는 횡방향 하중이 직접적으로 영향을 받는다. 그러므로 임의의 차륜, 레일 형상에 대한 접촉 특성 시뮬레이션이 필요하다.

현재 건설중인 KTX는 이미 접촉 특성 분석이 이루어졌을 것으로 사료된다. 그러나 영업운전에 따른 형상 변화시의 차륜/레일의 접촉 특성을 고찰할 필요가 있다. 또한 KTX는 전용선뿐만이 아니라 기존선을 겸용 운행할 예정이다. 기존선의 레일 형상은 KTX 전용선과 형상이 달라 접촉 특성도 KTX의 전용선과 다를 것으로 예상된다. 기존선에는 또한 분기구간, 교차구간이 전용선에 비하여 빈도가 높다. KTX도 시간에 따라 차륜의 형상이 변화될 것이다. 그러므로 KTX의 다양한 차륜, 레일 형상에 따른 접촉 특성을 기본적으로 검토할 필요가 있는 것이다. 향후에는 물론 기하학적 접촉뿐만이 아니라 실제적인 하중을 고려할 필요도 있다. 그러므로 KTX를 비롯하여 임의의 차륜, 레일 형상에 대한 접촉 특성 검토 방법과 검토를 위한 전용 시뮬레이션 프로그램이 필요하다.

차륜/레일의 기본적 접촉 특성 해석 기술은 이미 개발되어 새로운 것은 아니라 할 수 있다. 물론 고도화된 접촉 특성을 계산하기 위한 알고리즘이 연구되고 있기도 한다[1-3]. 현재 차륜/레일의 기본적 특성을 해석하기 위하여는 ADAMS/RAIL[4], RecurDyn[5], SIMPACK[6], VAMPIRE[7]와 같은 상용 철도차량 동역학 해석 프로그램을 이용할 수 있다. 그러나 이러한 상용 프로그램들은 차륜/레일의 접촉만을 위한 것이 아니고 범용 동역학 해석이 목적인 프로그램이기 때문에 고가이며

* 한국기계연구원 선임연구원, 정희원

* 한국기계연구원 위촉선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

기능이 많아 사용하기 번거롭다고 할 수 있다. 누구나 쉽게 차륜/레일 접촉 특성 검토할 수 있는 프로그램이 필요하다.

본 논문에서는 임의의 형상을 갖는 차륜/레일의 접촉 특성을 쉽게 시뮬레이션 할 수 있는 전용 프로그램을 개발하는데 목적이 있다. 접촉 해석 알고리즘은 비선형, 비대칭 차륜/레일 형상의 접촉을 해석할 수 있는 미국 FRA의 알고리즘[8]에 기본을 두었고 GUI를 자체 개발하여 연계시킨다. 개발된 프로그램을 이용하여 KTX의 차륜과 KTX 전용선의 레일 UIC60, 기존선 레일의 하나인 KS50N에 적용하여 각 레일에 대한 접촉 특성을 해석하였다. 결과적으로 본 프로그램은 쉽게 임의의 차륜/레일 형상 조합에 대한 접촉 특성을 해석할 수 있는 장점을 갖는다.

2. 차륜/레일 기하학적 접촉

2.1 개요

Fig. 1은 차륜/레일의 기본적인 접촉 파라미터 7개를 보여주고 있다. 7개의 파라미터는 2개의 독립변수 즉 윤축의 횡변위 x_w , 윤축 요각(yaw angle) θ_w 의 함수로 표현할 수 있다. 그러나 일반적으로 θ_w 는 접촉 파라미터에 2차적인 영향을 미친다. 결과적으로 모든 접촉 특성 파라미터는 x_w 만의 함수로 표시할 수 있다. 만일 요각의 영향이 무시할 수 없는 접촉 조건이라면 요각을 고려한 3차원적 접촉 파라미터 특성을 검토할 필요가 있을 것이다. 기본적인 파라미터 7종은 다음과 같다.

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1) r_L : 좌측 차륜의 순간 회전 반경 | 2) r_R : 우측차륜의 순간 회전 반경 |
| 3) y_L : 좌측 레일에서의 순간 접촉점 높이 | 4) y_R : 우측 레일에서의 순간 접촉점 높이 |
| 5) δ_L : 좌측 접촉각 | 6) δ_R : 우측 접촉각 |
| 7) ϕ_w : 윤축 롤 각 | |

3. 접촉시뮬레이션 프로그램 개발

3.1 접촉해석 알고리즘

Fig. 2는 차륜/레일의 접촉 해석을 위한 좌표계를 보여주고 있다. 모든 형상 데이터는 Fig. 2의 좌표계로 정의 된다. 본 논문에서 적용하는 접촉 시뮬레이션 알고리즘의 과정은 Fig. 3과 같다. 접촉 해석 알고리즘은 4단계로 구성된다. 1)단계는 형상 데이터를 읽어서 4차 다항식으로 근사화시키는 것이다. 4차 다항식을 적용한 이유는 비선형 차륜/레일 형상을 근사화시키면서도 수학적으로 단순하여 형상의 기울기를 쉽게 구할 수 있기 때문이다. 여기서 주어진 형상 데이터를 여러 개의 부 구간으로 나눈 후 부 구간과 부 구간사이에는 3개의 점을 중첩시켜 연속성을 만족하도록 한다. 2)단계는 반복적 비선형 방정식 해법을 이용하여 3종류의 구속 조건을 만족하는 접촉점 위치를 찾는 것이다. 첫째로는 강체 구속 조건이다. 강체 구속임으로 차륜과 레일의 접촉에 있어서 침투는 발생하지 않는다는 조건이다. 둘째로는 차륜과 레일 축에서 형상의 기울기가 같다는 것이다. 셋째로는 공간상에서의 접촉점의 위치가 차륜과 레일 축에서 같다는 조건으로 다음과 같은 조건식으로 구성된다.

$$a_r + x_{r_r} = x_w + (a_w + x_{w_r}) \cos \phi_w - r_R \sin \phi_w \quad (1)$$

$$a_r + x_{r_l} = x_w + (a_w + x_{w_l}) \cos \phi_w + r_L \sin \phi_w \quad (2)$$

$$h_{right\ wheel} = -r_R \cos \phi_w - (a_w + x_{w_r}) \sin \phi_w \quad (3)$$

$$h_{left\ wheel} = -r_L \cos \phi_w - (a_w + x_{w_l}) \sin \phi_w \quad (4)$$

$$h_{right rail} = y_R + x_{r_R} \sin \beta_R \quad (5)$$

$$h_{left rail} = y_L + x_{r_L} \sin \beta_L \quad (6)$$

윤축의 횡변위 변화에 따른 상기의 구속식을 만족하는 접촉점 위치를 반복법으로 찾게 된다. 3) 단계는 2)단계에서 구해진 접촉점을 이용하여 기본 접촉 파라미터 7개와 기본 파라미터의 조합을 계산하게 된다. 결과적으로 12종의 파라미터를 계산한다.

(1) 회전 반경과 레일 높이

r_R, y_R, r_L, y_L 은 형상 근사 곡선으로부터 계산된다.

(2) 접촉 각

$$\delta_R = \arctan \left[\frac{d}{dx_{w_R}(r_R)} \right], \quad \delta_L = \arctan \left[\frac{d}{dx_{w_L}(r_L)} \right] \quad (7)$$

(3) 정규화된 회전반경 차이

$$\Delta r = \frac{r_L - r_R}{2a_r} \quad (8)$$

(4) 정규화된 접촉각 차이

$$\Delta \delta = \frac{\delta_L - \delta_R}{2} \quad (9)$$

(5) 롤각

$$\phi_w = \arctan \frac{(y_L - y_R) + x_{r_L} \sin \beta_L - x_{r_R} \sin \beta_R + (r_L - r_R) \cos \phi_w}{(2a_w + x_{w_R} + x_{w_L}) \cos \phi_w} \quad (10)$$

(6) 윤축 질량중심 변위

$$y_{cg} = 1/2 [y_L + y_R + x_{r_L} \sin \beta_L + x_{r_R} \sin \beta_R + (r_L + r_R) \cos \phi_w] - 1/2 [y_L + y_R + x_{r_L} \sin \beta_L + x_{r_R} \sin \beta_R + (r_L + r_R) \cos \phi_w]_{x_w=0} \quad (11)$$

(5) 형상 곡률 반경

$$R_{wheel} = \frac{[1 + (\frac{d}{dx_{w_R}}(r_R))^2]^{3/2}}{\frac{d^2}{dx_{w_R}^2}(r_R)}, \quad L_{wheel} = -\frac{[1 + (\frac{d}{dx_{r_L}}(y_L))^2]^{3/2}}{\frac{d^2}{dx_{r_L}^2}(y_L)} \quad (12)$$

4)단계는 $\Delta r, \Delta \delta, \phi$ 에 대한 준 선형화이다. 선형화 하고자 하는 함수 $f(x)$ 의 준 선형화 공식은 식(13)과 같이 정의된다. 그러므로 4)단계에서 방정식 (13)을 이용하여 선형화된 $\Delta r, \Delta \delta, \phi$ 을 계산함으로써 한 윤축의 횡변위에 대한 차륜/레일 접촉 특성을 모두 구한 후 윤축 횡변위를 증가시켜서 상기의 4단계를 반복하게 된다.

$$Y_q = \frac{4}{\phi A^2} \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2} \left(\sin^{-1} \frac{X_2}{A} - \sin^{-1} \frac{X_1}{A} \right) + \frac{f(x_2) + f(x_3)}{2} \left(\sin^{-1} \frac{X_3}{A} - \sin^{-1} \frac{X_2}{A} \right) + \frac{f(x_1) + f(x_{n-1})}{2} \left(\sin^{-1} \frac{X_n}{A} - \sin^{-1} \frac{X_{n-1}}{A} \right) \quad (13)$$

여기서, $x_1 = 0, x_n = A$

상기에서 설명한 차륜/레일 접촉 특성 계산 알고리즘을 이용하여 접촉해석 프로그램과 GUI를 개발하였다.

3.2 GUI 개발

3.1에서 설명한 차륜/레일 접촉 시뮬레이션 프로그램을 이용하기 위하여 차륜/레일 접촉 시뮬레이션 전용 GUI를 개발하였다. 본 프로그램의 특징은 구조가 간단하며 차륜/레일 전용으로 사용하기 쉬운 장점을 가진다는 것이다. Fig. 4는 프로그램의 구조를 보여주고 있다. 크게 3 부분으로 Compute 부분은 차륜 형상, 레일형상, 캔트, 궤간와 수치계산에 필요한 상수들을 입력하여 접촉 해석을 수행하는 기능을 갖는다. Result View and analysis는 계산된 접촉 특성 값을 그래프와 2차원 애니메이션으로 결과를 가시화하는 기능을 수행한다. 여기서 좌우측 차륜의 접촉 애니메이션과 동시에 그래프에서의 위치를 표시하여 사용자가 가시적으로 접촉 특성을 분석할 수 있도록 한다. Multi result view and analysis는 3종류까지의 상이한 형상의 접촉 특성을 비교하는 기능을 가진다. Fig. 5는 결과 분석 화면으로 그래프 영역, 애니메이션 영역, 특성 값 표시 영역으로 구분되어 있다. 현재 12종의 접촉 파라메타 값을 표시한다.

- (1) Wheel contact position (2) Rail contact position (3) Wheel rolling radii
- (4) Rail head profile height (5) Wheelset contact angle (6) Wheel rolling curvature
- (7) Normalized rolling radii difference (8) Normalized contact angle difference
- (9) Wheelset roll angle (10) Wheelset vertical displacement (11) Wheel transverse curvature
- (12) Rail transverse curvature

4. KTX 접촉 특성 분석

3장에서 개발한 차륜/레일 접촉 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 KTX의 차륜/레일 접촉 특성을 해석하였다. KTX의 차륜은 윤축 내면거리 1356 mm의 NFF0112이며 레일은 KTX 전용궤도의 캔트 1/20 UIC60과 기존선의 레일 중 하나인 캔트 1/40 KS50N이다. 차륜/레일 형상은 Fig. 6에서 보는바와 같고 큰 차이는 KS50N의 레일 헤드 폭이 UIC60에 비하여 좁다는 것이다. 해석 결과 중 차량의 임계속도에 영향을 주는 정규화된 차륜회전반경 차이가 Fig. 7에 나타나 있다. 특히 사항으로는 선형구간이 KS50N에서는 좁고 기울기가 급하다는 것이다. 반면에 UIC60에서는 선형구간이 넓다. 그러므로 임계속도 측면에서 볼 때 기존선에서의 임계속도가 KTX 전용선에 비하여 작을 것으로 예상된다. 플랜지 접촉은 UIC60은 약 7 mm에서 발생하고 KS50N은 UIC60에 비하여 4~5 mm 후에 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 정규화된 접촉각 차이를 보여주고 있다. 보는 바와 같이 약 3 mm 까지는 두 형상 모두 0 값을 갖으나 그 이후부터는 다른 경향을 보이고 있다. UIC60은 6.4 mm까지 음의 값을 나타내다 증가하고 있으나 KS50N은 3 mm부터 증가하기 시작한다. 이는 KS50N이 UIC60에 비하여 접촉각 차이가 먼저 발생 즉 횡방향 하중차이가 미리 발생하기 시작하는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 KTX가 전용선과 기존선을 겸용 운행할 때 차륜/레일의 인터페이스 즉 접촉 특성이 다른 것을 확인 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 임의의 차륜/레일의 접촉 시뮬레이션 프로그램 개발 결과를 소개하였다. 접촉 해석 알고리즘은 임의의 비대칭, 비선형 형상을 고려할 수 있으며 전용 GUI 개발로 쉽게 사용할 수 있다. 그 결과를 이용하여 KTX에 적용하여 KTX 전용선과 기존선에서의 접촉 특성을 검토할 수 있었다. 검토결과 기존선에서의 플랜지 접촉이 전용선에 비하여 윤축 횡변위로 약 4 mm 차이를 보이고 12개 접촉 파라메타가 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 동적 거동에서 다른 결과를 나타낼 것임을 예상할 수 있게 한다. 본 해석 프로그램은 임의의 형상을 고

려할 수 있으므로 마모차륜, 마모 레일 및 분기구간과 같은 특이 구간에서의 접촉 특성 해석도 가능하게 된다. 결과적으로 본 논문의 결과를 활용한다면 다수의 사용자가 쉽게 차륜/레일 접촉 해석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Burton, T. D. and Whitman, A.M., "Nonlinear Kinematics of Wheel-Rail Contact," J. of Applied Mechanics, Vol. 45, pp.664-668, 1978.
2. 박정훈, 임진수, 황요하, 김창호, "차륜/레일간의 접촉력 계산을 위한 접촉점 해석 알고리즘", 한국철도학회논문집, 제2권 제3호, pp.1-8, 1999.
3. Grag, V. K., 1, "Dynamics of Railway Vehicle Systems," Academic Press, 1984.
4. <http://www.adams.com/>
5. <http://www.functionbay.com/>
6. <http://www.simpack.de/>
7. BR Research, "VAMPIRE User Manual," 1997.
8. Cooperrider, N. K., Law, E. H., Hull, P. S., Kadala, P. S. and Tuten, J. M., "Analytical and Experimental Determination of Nonlinear Wheel/Rail Geometric Constraints," Report No. FRA-OR & D, 1975.

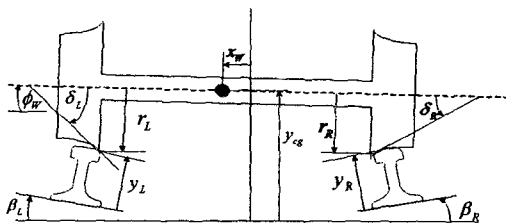


Fig. 1 Wheel/rail parameters

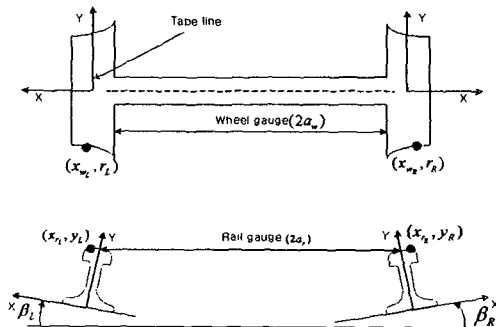


Fig. 2 Wheel/rail coordinate system

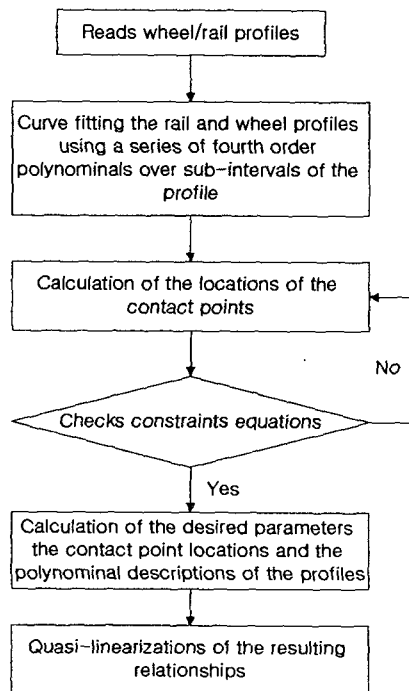


Fig. 3 Computational procedure for the wheel/rail contact analysis

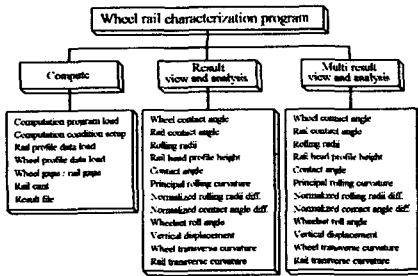


Fig. 4 Structure of GUI

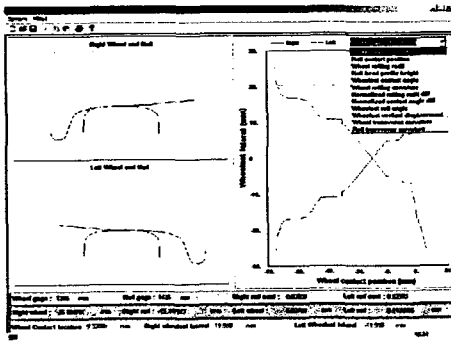


Fig. 5 GUI for Wheel/Rail contact simulation

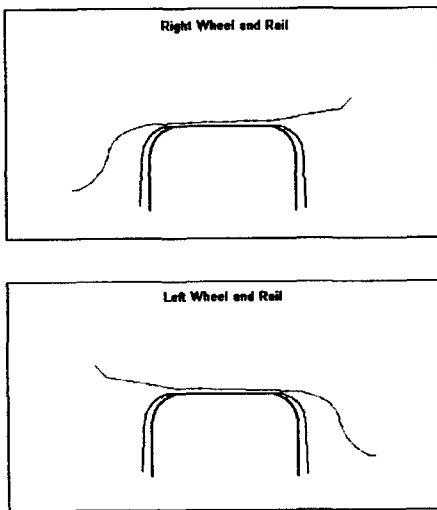


Fig. 6 Wheel/Rail profiles

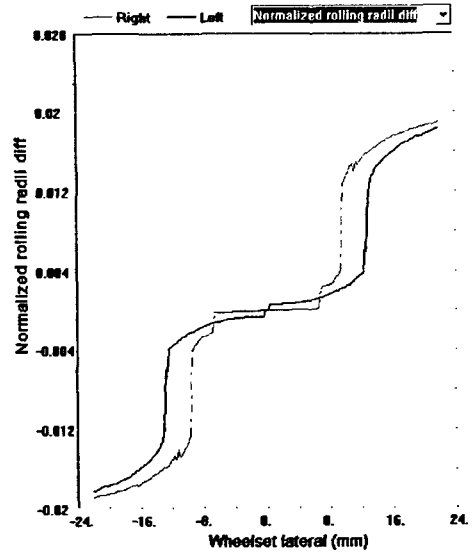


Fig. 7 Normalized rolling radii difference

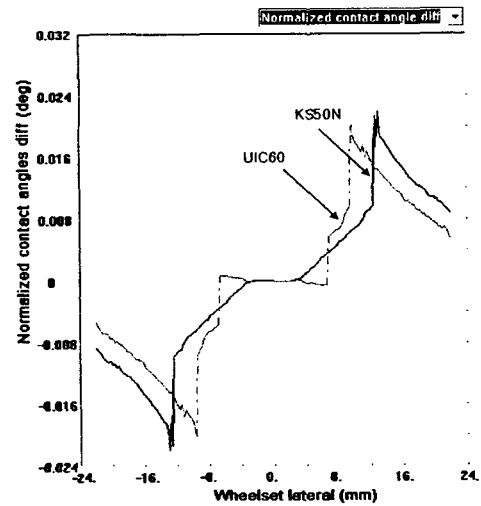


Fig. 8 Normalized contact angle difference