경사선로에서의 차륜과 레일간 상호작용에 따른 마모 현상 연구

문태선†·서보필*·최정흠**·한동철*

The research on wear simulation between wheel and rail at inclined of Korea High Speed Railway

Tai-Seon, Moon, Bo-Pil, Seo, Jeung-Hum, Choi and Dong-Chul Han

Key Words: Sliding wear(미끄럼 마모), Archard wear equation(아차드 마모식), Wear coefficient (마모계수), Longitudinal creep(종방향 크립), Lateral creep(횡방향 크립), Spin creep (회전 크립), Hertz contact(헤르쯔 접촉)

Abstract

The purpose of this work is to general approach to numerically simulating wear in rolling and sliding contact area between wheel and rail interface based on the analysis of dynamics with general MBS package. A simulation scheme is developed that calculates the wear at a detailed level. The estimation of material removal follows Archard's wear equation which states that the reduction of volume is linearly proportional to the sliding distance, the normal applied load and the wear coefficient and inverse proportional to hardness. The main research application is the wheel-rail contact of Korea High Speed Railway.

기호설명

τ_{ij} : shear stress of element
v_x : longitudinal creepage
v_y : lateral creepage
ϕ : spin creepage (m)
x, y : local coordinate
$\tau_{\max ij}$: maximum transferable shear stress
$p_{\max}$: maximum normal pressure
μ : friction coefficient
K : wear coefficient
$V_{vehicle}$: speed of truck

† 서울대학교 기계항공공학부
E-mail :moon_sun@amed.snu.ac.kr
TEL : (02)880-1682 FAX : (02)885-8804
* 서울대학교 기계항공공학부
** 서울대학교 정밀기계설계연구소

1. 서 론

철도는 여타 다른 교통수단에 비하여 여객 수송 및 에너지 효율성 증대, 공해 물질 배출량 감소라는 측면에서 많은 장점이 있다. 상대적으로 비대칭적이게 발전해 왔던 한국의 운송 체계에서는 앞으로 약 2020년에 철도는 양적으로나 질적으로 획기적인 변화를 보일 것이라는 호의적 전망이 예측된다. 열차가 안전성을 보장하고 승차감을 확보한 상태에서 주행하기 위해서는 항상 양호한 상태로 유지·보수되지 않으면 안된다. 그러나 철도는 과격한 차량 하중과 기상작용 및 상대 운동에 의해 늘 마모, 파손을 받고 있는 것이 보통이다. 이러한 차량 및 궤도의 손상에 대해서 신뢰성을 유지할 수 있는 방법을 유지하여 안전한 운행을 보장할 수 있도록 하는 기준을 제시하고 유지 관리하는 것이 필요하다. 유지·보수 작업에서 차량 운행 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 부분이 차량의 차륜 및 레일의

마모, 손상 부분이다. 따라서 우리는 보다 안전하고 유지 보수에의 비용 절감 및 차량 진단의 기술 확보 측면에서 실질적이고 보다 정확한 해석의 필요성을 갖게 된다. 바퀴와 레일의 접촉과 마모 문제는 차량의 유지 보수, 정비, 안정성, 승차감 등에 영향을 미치는 주요 인자로서 고속전철 차량의 동적 특성에 대한 명확한 이해를 바탕으로 바퀴 및 레일의 보수 및 교체 시기를 예측할 필요가 있으며, 바퀴 및 레일의 신뢰성 및 내구성에 대한 기준이 마련되어야 한다.

본 연구는 한국형 고속철도 차량의 동력차, 동력객차, 객차의 3량을 연결시켜 작성한 모델과 동적 거동 해석 자료를 기초로 주어진 트랙 조건에 대해 차량의 차륜에 발생하는 마모를 wear simulation을 통해 예측해 봄으로써 차량의 마모 발생 및 유지·보수에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

2. Dynamic Analysis

2.1 차량 모델링

본 연구에서는 동력차, 동력객차, 객차의 3량으로 구성된 열차를 사용하여 동역학적 모델링과 해석을 하였다. 모델의 해석을 위하여 상용 다물체 동역학 해석 프로그램(general MBS package)을 사용하였다.

Fig.1은 전체 차량의 모델링이며 좌표계는 차량 진행방향이 x, 좌우방향이 y, 높이 방향이 z이며, track의 시작점을 원점으로 설정하였다. 모델링에 사용된 질량요소의 질량중심과 질량은 실차량으로부터 구했다. 질량중심은 각 질량요소에 대한 국부 좌표계에서 구했다.

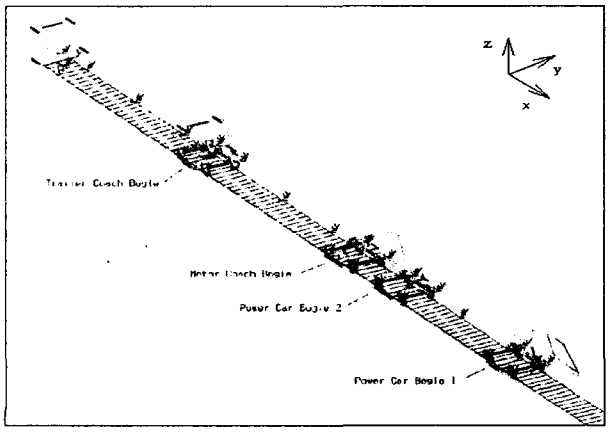


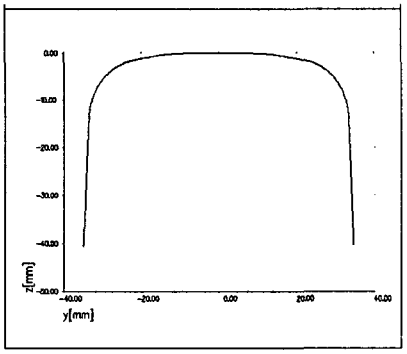
Fig.1 Dynamic model of high speed rolling stock

기본 차량의 질량 요소에 대한 거리와 중심을 모델링 한 뒤에 각 차량에 대한 1, 2차 현가 장치의 특성을 포함 할 수 있도록 보다 세밀하게 모델링 하였다. 장치내의 각 댐퍼 및 스프링, 차량의 coupling, center pivot등의 비선형 요소에 대해서는 각 모델에 적합한 비선형적 재료의 특성을 입력받을 수 있도록 설계하였다.

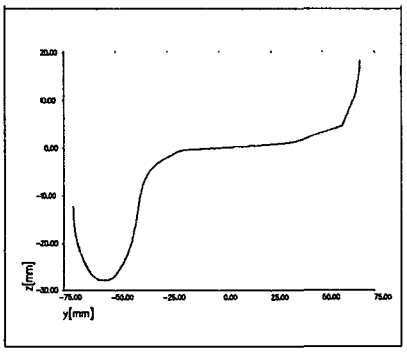
2.2 차륜과 레일의 표면 형상 모델링

고속전철은 차륜과 레일의 접촉력에 의해 추진되고 차륜의 답면경사와 플랜지에 의하여 안내, 유도되면서 궤도상에 고정된 레일을 따라 주행한다.

레일과 차륜의 상호 작용은 차량을 지지하고 안내하는 일차적인 수단이 되고 이 특성이 대차로부터 차체에 전달되는 진동수준과 선로에 전달하는 힘의 수준을 결정하는 기본이 된다. 그러므로 차륜과 레일의 형상은 동역학적 거동에 중요한 영향을 끼치게 된다. 현재 차륜은



(a) Rail profile (UIC 60)



(b) Wheel profile (NFF 01-112)

Fig.2 Base wheel/Rail profile

NFF 01-112에서 제안하는 차륜 형상을 사용하며, 선로는 UIC60이 사용된다. Fig.2는 MBS package에서 사용된 차륜과 레일의 형상(profile)을 나타낸 것이다.

2.3 레일의 불규칙성

레일 틀림에는 궤간(guage) 틀림, 정렬(alignment) 어긋남, 면(cross level) 틀림, 고저(vertical) 틀림 등이 있다. 정렬 어긋남, 면틀림 궤간 틀림은 고속전철의 횡방향 운동에 영향을 주며, 면틀림, 고저틀림은 수직방향 운동에 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

궤도 특성은 1999년 후반기 경부고속철도건설공단 검측자료를 동특성 검토용으로 변환한 값으로 동서울역 기점 86km지점에서 143.2 km 지점까지 총 57.2km이며, 최대구배 15 , 최소 곡선반경 7000m를 갖는 것으로 나타났다. 캔트의 경우 7000R의 곡선구간에서 캔트는 최대 140mm이며, 좌우방향틀림은 ±4mm, 고저틀림은 ±2mm, 궤간틀림은 3mm가 넓혀져 있고 ±3mm 변동을 갖는 것으로 나타났다. 실측 자료를 근간으로 track irregularity를 함수로 가정하여 동적 거동의 해석에 사용하였다. Fig.3에 위의 설명에 따른 해석시 사용된 트랙의 형상이 제시되어 있다.

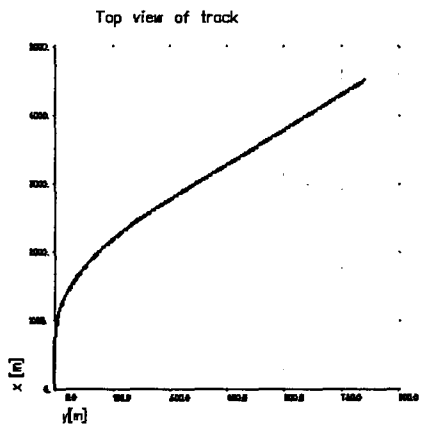


Fig.3 Track modelling

3. Wear Simulation

3.1 기본 이론

철도 차량에서 차륜과 레일 사이의 접촉면에서의 마모는 여러 가지 메카니즘이 복합적으로 발생하나

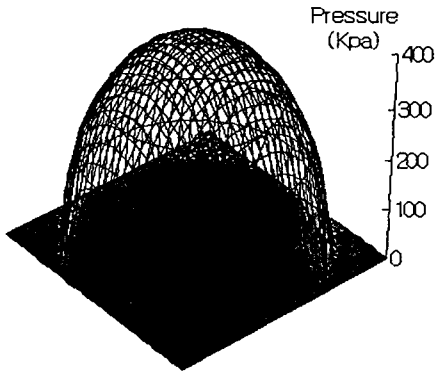


Fig.4 Pressure distribution at contact area

가장 주요한 요인으로는 미끄럼과 구름에 의한 미끄럼 마모와 구름에 의한 피로 파괴 마모, 부식 등에 의한 기타 마모가 언급된다.

본 연구에서는 미끄럼에 의한 마모 예측을 수행하였다. 미끄럼 마모는 크게 연삭과 응착에 의한 세부 마모 발생 요인으로 나눌 수 있으며 이를 예측하는 공식은 여러 가지가 있으나, 가장 널리 인정받고 사용되는 Archard 마모 공식을 사용하였다. 이 공식은 마모량은 하중과 재료의 미끄럼 거리에 비례하고 재료의 표면 경도에는 반비례한다는 것으로써 (1)과 같이 작성할 수 있다.

$$V = K\frac{L \cdot x}{p} \qquad (1)$$

접촉면에서 Archard 마모식을 사용하기 위하여 해석적으로 사용가능한 Hertz 접촉상태를 가정하였으며, 접촉면의 수직 응력은 Fig.4와 같다.

3.2 마모 예측

앞 절에서 언급한 가정을 근거로 접촉면을 미소요소로 나누고 각 요소에 작용하는 전단응력과 수직 작용력을 비교하여 응착과 미끄럼 상태를 판단하고 미끄럼 부위에서만 발생하는 각 요소별 마모량을 구간에 대하여 적분하여 마모 발생량을 구한다. wear simulation에서 사용한 선로의 조건은 table. 1과 같다.

Table 1. Condition of railway (bogie1 wheelset 1)

구간	곡선주로
캔트량	일정 (135mm)
곡선반경	R7000m
불규칙성	있음

헤르쯔 가정에 의하여 접촉면의 각 요소에서 발생하는 수직 작용력은 식(2)와 같다.

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{v_x}{L_x} - \frac{v_\varphi}{L_\varphi} x_{ij} \\ \frac{v_y}{L_y} + \frac{v_\varphi}{L_\varphi} y_{ij} \end{bmatrix} (x_{ij} - \overline{x}_i) \quad (2)$$

전단응력은 아래의 식(3)으로 표시할 수 있다.

$$\tau_{\max,ij} = \mu \cdot p_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{x_{ij}}{a}\right)^2 - \left(\frac{y_{ij}}{b}\right)^2} \quad (3)$$

각 접촉요소에서 발생하는 미끄럼 속도는 차량의 속도에 각 요소별의 크립피지를 고려하여 (4)와 같이 연산할 수 있다. 연산 과정중 탄성에 의한 두 재료의 미끄럼 속도는 무시하므로 항의 마지막은 0으로 가정한다.

$$\overline{v}_{slip} = \overline{V}_{vehicle} \left[\begin{pmatrix} v_x - v_\phi y \\ v_y + v_\phi x \end{pmatrix} - \frac{\partial \overline{u}(x,y)}{\partial x} \right] \quad (4)$$

점착영역에서의 미끄럼 거리는 0이므로 미끄럼 영역에서 발생하는 각 요소별 마모량은 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\Delta z = K \frac{|s| p}{H} \quad (5)$$

계산과정 중 사용하는 마모 계수는 주변 환경 및 접촉 상황에 따라 큰 영향을 받으므로 현실화되어 측정되어야 하지만 우리나라의 고속 철도 차량의 경우 아직 측정 자료가 없으므로 가장 유사한 재료로 수행되었던 선행연구의 자료 5)를 이용하였다. (Fig.5 참조)

일반적으로 마모 계수는 표면 접촉압과 미끄럼 속도와의 함수로 나타낼 수 있으며 표면 접촉압력이 접촉 재료 중 상대적으로 경도가 낮은 재료의 0.8H가 넘으면 크게 증가하는 것으로 알려져 있다.

자세한 연산과정은 Fig. 6 나타내었으며 계산과정 중 사용되는 입력값은 Table. 2에 언급하였다.

주어진 선로 및 차량의 조건에서 수행한 wear simulation의 결과는 Fig.7에 제시되어 있다.

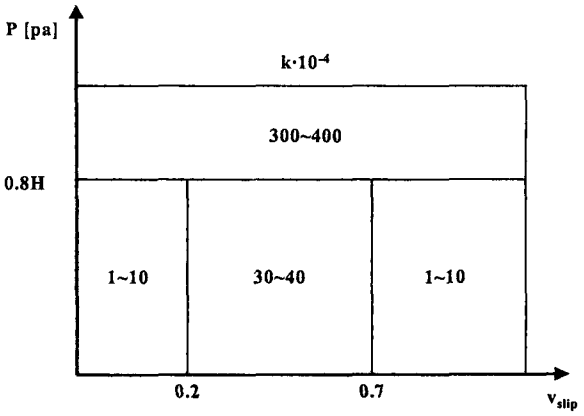


Fig.5 Wear coefficient map

Table.2 Input data of wear simulation

A marker	Input data(HSR)
Hardness of Wheel	300 (Gpa)
Friction Coefficient	0.25
Vehicle Speed	200 (Km/h)
Poisson's ratio	0.3
Young's modulus (wheel/rail)	200 (Gpa)
Shear Module of Wheel	76.9 (Gpa)

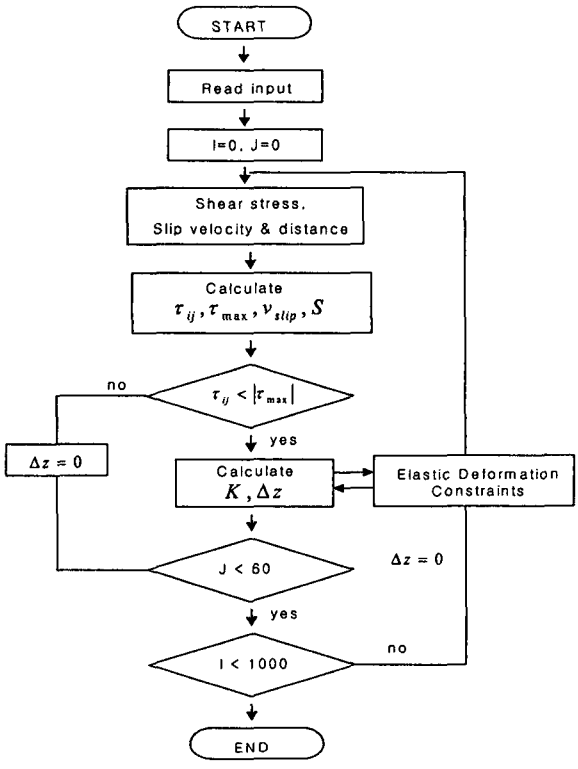
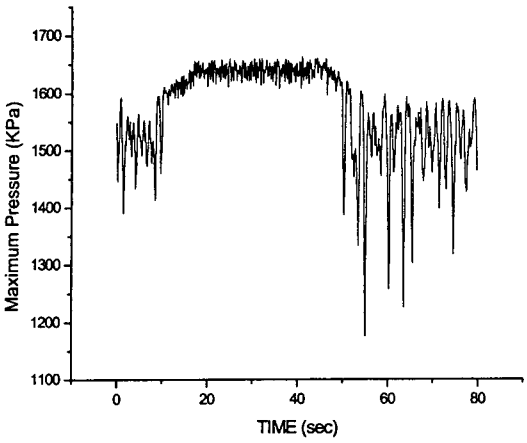
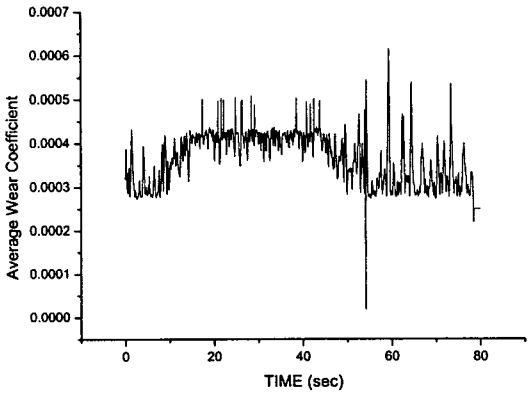


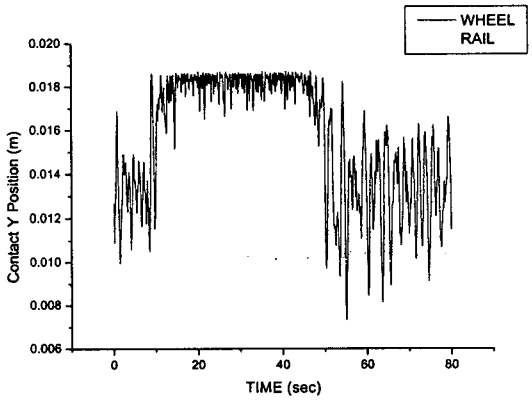
Fig 6. Flowchart of wear simulation



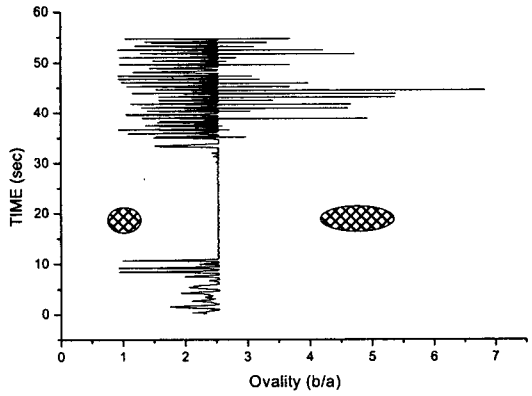
(a) Maximum pressure distribution vs. time



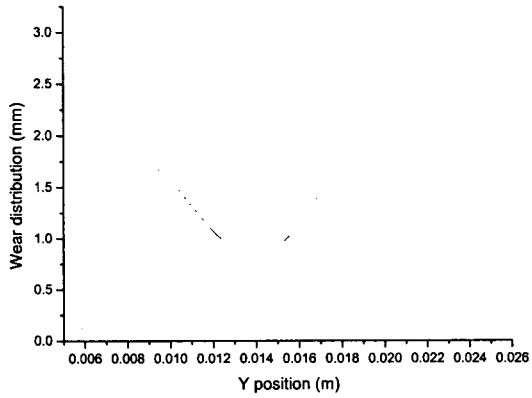
(b) Average wear coefficient vs. time



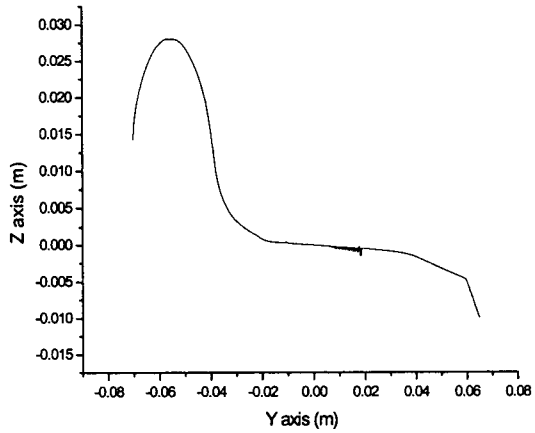
(c) Variation of contact position vs. time



(d) Contact area ovality($\frac{b}{a}$)



(e) Wear distribution through wheel contact position



(f) Changed wheel profile

Fig.7 Characteristics of PC bogie 1 wheelset 1 right (curved & irregulated & 200 km/h)

차륜의 플랜지가 레일의 헤드부분에서 게이지 부분으로 가까이 갈수록 높은 접촉 압력의 형태를 보이며 접촉이 많이 발생하는 부분에 마모량이 집중됨을 알 수 있다. 또한 타원도가 0으로 가까이 접근한다. 게이지부로 갈수록 접촉 영역에 평균적으로 발생하는 마모 계수값이 커지며 이상마모를 발생할 가능성이 높아짐을 추측해 볼 수 있다. 캔트량이 속도에 따른 이론치보다 적게 주어짐으로써 마모가 우측 부분에 집중되어 발생하는 것도 관찰해 볼 수 있다. 휠의 마모 발생량은 약 200,000km 주행시 최대 약 2mm 정도 되며, 이는 선행연구 결과 및 실제 양과도 매우 좋은 결과적 일치를 보인다. 마모 발생 분포량을 휠의 프로파일에 고려하여 연산한 결과는 (e)에 나타나 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 한국형 고속철도의 동적 거동 모델링을 근간으로 general MBS package를 이용하여 해석하였으며, 이를 근간으로 하여 특정 조건의 차량 운행 조건에 대하여 차륜에서의 마모 해석을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 한국형 고속철도에서 동력차, 동력객차, 객차의 3량이 연결된 모델을 근간으로 MBS package를 이용하여 차량의 동적 거동을 해석할 수 있었다.

(2) 캔트량이 속도에 대해 설계된 값보다 적게 주어짐으로써 마모 발생이 우측에 집중되어 발생됨을 결과를 통해 확인해 볼 수 있다.

(3) 차륜의 답면이 레일의 게이지에 가까이 접근할 수록 높은 수직압과 마모 계수가 발생하고 타원도가 낮아짐을 알 수 있었다.

(4) 차량의 접촉점에서 마모 발생량이 집중됨을 알 수 있으며 이상 마모가 발생될 수 있는 위험이 있는 지점에서 큰 마모가 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다.

(5) 차량이 곡선구간을 200km/h의 속도를 가지고 불규칙 레일을 통과했을 경우 약 200,000km 운행을 기준으로 최대 약 2mm정도의 마모가 휠에 예측됨을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Kalker J. J., 1967, 'on the rolling contact of two elastic bodies in hte presence of dry friction', Ph.D. Thesis.

(2) Archard J. F., 1953, 'Contact and rubbing of flat surfaces', Journal of Applied Physics, Vol. 24, pp. 981-988.

(3) Kalker J. J., 1982, 'A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact', Vehicle Sstem Dynamics, Vol. 11,pp. 1-13.

(4) Bolton P. J., Clayton P., 1984, 'Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels', Wear, Vol. 93, pp. 145-165.

(5) Olofsson U., Telliskivi T., 2003, 'Wear, friction and plastic deformation of two rail steels-Full scale test and laboratory study', Wear, Vol. 254, pp. 80-93.

(6) Tanel T., 'Simulation of Wear in a Rolling -Sliding Contact by a Semi-Wrinkler Model and the Archard's Wear Law',

(7) 박찬경, 김영국, 배대성, 박태원, 2001, '경부고속철도 시험선 구간에서 G7 고속전철 차량의 동특성 검토', 한국철도학회 논문집, 제 4권, 제 4호, pp. 131-137.

(8) 박찬경, 김기환, one, two, 1998, "Vampire를 이용한 경부고속철도 차량의 동적 안정성 해석', 철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 510-516.

(9) Tomas Jendel, 2002, "Prediction of Wheel profile wear-comparisons with field measurements', Wear, vol. 253, pp. 89-99.

(10) Kalker J. J., 1990, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 'Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact'

(11) Hamrock, Brewe, 1983, 'Simplified Solution for Stresses and Deformation', Journal of Lubrication, Vol. 105., No. 171., pp.
-not yet-

(12) Kalker J. J., 1990, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 'Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact'