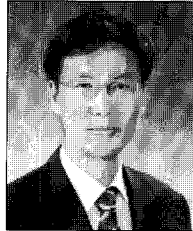
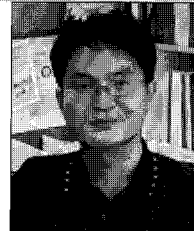


차륜/레일 접촉손상 해석기법

Analysis Method of Damage Induced by Wheel-Rail Contact



전 현 규*



이 동 형**



문 형 석***

* 한국철도기술연구원 차륜레도연구실 선임연구원
 ** 한국철도기술연구원 차륜레도연구실 선임연구원
 *** 한국철도기술연구원 차륜레도연구실 선임연구원

1. 개 요

차륜과 레일의 반복적인 접촉은 레일표면에서의 손상을 야기하며, 차량의 고속화에 따른 전인력의 증가와 운송효율화를 위한 축중의 증가로 인하여 이러한 현상은 점차 가중되고 있다. 레일의 손상은 레일의 파괴와 더불어 탈선과 같은 심각한 열차사고를 일으킬 수 있으며, 경미한 경우라도 승차감 저하, 소음발생, 차륜손상, 주행안정성 저하 등 여러 가지의 악영향을 줄 수 있으므로 다양한 분야에서 수많은 연구^{1)~7)}가 수행되고 있으나, 손상의 형태사 매우 다양하여 모든 손상 발생 및 진전에 대한 명확한 해석모델은 제시되어 있지 않은 상태이다.

차륜과 레일의 손상은 열차의 이동에 따라 반복적인 구름접촉에 의해 발생하는 손상으로 구름접촉피로(rolling contact fatigue : 이하 RCF)라 정의하고 있다. 과거에는 레일내부의 기공, 불균일, 각종 개재물 등의 결함이 레일손상의 원인이 되었으나, 현재는 소재의 결함보다는 레일표면에서의 높은 접촉하중으로부터의 손상이 원인이 되고 있다. 현재 중요하게 다루어지는 대표적인 레일표면손상은 헤드체크(head check)와 스퀫트(squat)⁸⁾ 등이 있다.

레일의 손상을 원천적으로 방지하는 것은 손상을 일으키

는 인자(축중, 윤활, 차량속도, 재료특성 등)를 원천적으로 방지해야 하므로 열차운행의 특성상 불가능하며, 현재는 레일의 손상을 저감하는 방향으로의 연구가 수행되고 있다. 대표적으로 주기적인 또는 손상발생시의 레일삭정(rail grinding)⁹⁾, 차륜 및 레일형상 관리(profile management)¹⁰⁾, 윤활(lubrication)¹¹⁾, 내마모·피로소재 및 열처리기술 개발¹²⁾ 등이 있다. 그중 주기적인 레일삭정을 통한 손상의 관리가 가장 실용적이며 효과적인 것으로 알려져 있다.

차륜/레일의 접촉손상에 관한 연구는 유럽^{13)~15)}을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며 최근에는 일본,^{16),17)} 중국 등에서도 연구가 수행되고 있다. 유럽의 연구는 ERRI, RSSB 등의 예산지원으로 학계, 연구소, 산업체 등이 컨소시엄을 이루어 수행하고 있으며, 지속적인 연구개발에 대한 투자로 꾸준한 연구가 수행될 수 있도록 하고 있다. 접촉손상분야에 관한 대표적인 연구기관으로는 스웨덴의 Charnec, 네덜란드 TU Delft, 영국 Birmingham, Manchester Metropolitan, Newcastle, Sheffield대학이 있으며, 산업체 및 연구기관으로는 AEA Technology, Corus Railway Technology, DB, SNCF 등이 있다. 미국에서는 Volpe센터를 중심으로 TTCI 등에서 연구를 수행하고 있으며, 아시아에서는 중국의 CARS, 일본의 RTRI 등에서 연구를 수행하고 있다.

국내에서 차륜과 레일의 구름접촉피로에 대한 연구는 차량과 궤도사이의 인터페이스 문제로서 차륜의 피로수명 및 레일의 피로수명, 차륜-레일의 마모 등으로 구분되어 진행되었다. 차륜의 구름접촉 피로수명에 관한 연구로는 고속전철용 레일-휠 접촉에 대한 유한요소해석 및 레일의 설치기울기에 따른 접촉응력 또는 변위량의 변화 해석,¹⁸⁾ 차륜의 잔류응력의 변화를 고려한 수명평가와 잔류응력이 수명에 미치는 영향 평가,¹⁹⁾ 표면조직 검사, 파괴역학 특성 및 현차시험을 통한 고속철도 차륜 답면에 발생하는 손상의 특성 분석²⁰⁾ 등이 있다.

레일의 피로수명에 관한 연구로는 단일 및 혼합모드하중하에서 레일강의 파괴조건 및 균열진전거동,²¹⁾ 궤도구조 및 궤도상태를 고려한 노후레일 저부의 피로수명 평가²²⁾ 등이 있다. 레일의 구름접촉 피로수명에 관한 연구는 레일 두부 상면과 게이지 코너 및 측면에 대한 미세조직 관찰, 경도변화 등을 고려한 고속철도 레일의 연마 주기 제안,²³⁾ 연속체 손상역학과 유한요소법을 이용한 레일 상단면의 셸링(shelling) 피로손상 해석,²⁴⁾ 차륜-레일 구름접촉에 의한 라체팅 현상 모델링²⁵⁾ 등 많은 연구가 진행되고 있다.

이밖에 차륜-레일 구름접촉에 의한 마모에 관한 연구로는 고속철도의 주행거리에 따른 차륜마모 측정 및 분석,²⁶⁾ 동적거동해석 자료를 기초로 한 차륜 마모 시뮬레이션,²⁷⁾ 곡선부 주행시 차륜 플랜지 마모 특성에 관한 수치해석적 연구^{28),29)} 등 차륜의 마모에 대한 연구와 도시철도 차량의 운전모드에 의한 가감속 변화율에 따른 레일마모 현상 분석 등 레일의 마모에 대한 연구³⁰⁾가 있다.

2. 차륜/레일 접촉손상 종류

차륜과 레일사이의 높은 접촉응력은 레일 표면에서의 소성변형을 야기하며 소성변형이 누적되어 재료가 견딜 수 있는 한계를 넘으면 마모/균열 등의 손상이 발생한다. 발생한 손상은 열차운행에 따라 점차 성장하는 모습을 보이며, 발생부의 형상, 하중이력 및 환경 등의 조건에 따라 다양한 형태로 발전⁸⁾한다.

2.1 마모손상의 종류

차륜/레일 접촉에 의해 발생하는 손상은 대표적으로 마찰 및 마모, 피로 현상으로 나타난다. 차륜과 레일사이의 접촉에 의한 마모손상은 여러 가지 메커니즘(물리적, 화학적)이 동시에 작용하여 발생한다. 차륜/레일 마모손상은 마

모형상별로 레일측면(gauge corner)과 차륜플랜지(wheel flange)의 직립마모, 레일두부(rail head) 및 차륜 답면(wheel thread)의 마모, 레일 파상마모(rail corrugation)등으로 구분되며, 마모 메커니즘별로 응착마모(adhesive wear)와 박리마모(delamination wear) 등으로 구분된다.

레일 측면과 차륜 플랜지 마모는 Fig. 1(a)와 같이 차륜 플랜지와 레일의 측면이 접촉할 때 주로 발생하며, 박리마모가 주를 이룬다. 측면접촉은 곡선부에서 차량의 전부(leading) 바깥측 차륜과 바깥측 레일 사이에 발생한다. 레일 측면과 차륜 플랜지 마모는 가장 중요한 마모종 하나이며, 많은 양의 소성변형이 동반된다.

레일 두부에는 높은 접촉압력(1300~1700 MPa)과 상대적으로 낮은 상대 슬립(relative slippage)(0.01~0.015)이 작용한다. 이 환경에서는 크고 얇은 금속 조각(크기 1000 μ m, 두께 3 μ m)의 경마모(mild wear) 및 점착마모가 두드러지게 나타나며, 이는 레일 두부 및 차륜 답면 마모의 주요 특징이다. 이와 같은 마모는 접촉표면으로부터 얇은 조각의 분리 횟수 및 성분에 의해 마모율이 달라지며, 직선구간 또는 분기구 근처에서 발생한다.

차륜 플랜지의 마모는 초기에 급격하게 발생하며 초기 마모영역(run in period)이후에는 감소하는 반면, 차륜 답면 마모는 시간에 따라 거의 일정한 마모율을 나타낸다. 대부분의 차륜 마모는 비동력차보다 동력차의 차륜에서 더 크게 나타난다.

레일 파상마모는 Fig. 1(b)와 같이 한쪽 혹은 양쪽 레일 표면에서 발생하는 주기적 표면 손상이다. 주요특징은 곡선 혹은 직선 선로에서 처음에는 한 쪽 레일에서 발생하고 이후 양쪽 레일로 전파된다. 레일 파상마모는 레일 제조 혹은 레일 연결부, 용접, 다른 접촉 피로 결함 등에 의한 레일 두부 불균일에 의해 발생하며 레일 체결장치의 느슨해짐, 미끄러짐, 도상 열화(ballast deterioration) 및 다른 궤도 요소상의 문제를 유발한다. 이와 같은 마모는 철도 차량의 주행 성능 및 승차감 등에 나쁜 영향을 미친다. 파상마모는 피치

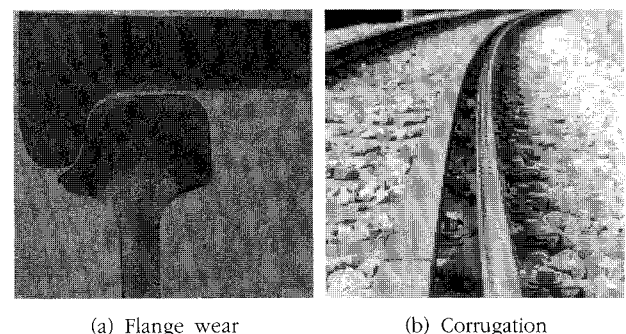


Fig. 1 Wear damage at rail

가 30~80mm인 단파장 파상마모(short wave corrugation), 피치가 200~600mm인 중파장(medium wave) 파상마모, 피치가 약 1.5m인 장파장(long wave) 마모로 구분된다.

2.2 피로손상의 종류

피로에 의한 손상의 형태는 레일의 운행조건, 재료특성, 환경조건 등 여러 가지의 영향인자에 따라 다르게 나타나며, 현재 레일 표면 및 내부에서 문제시되고 있는 손상은 Tache Ovale, Squat 및 Head check 등이 있다.

Tache Ovale는 레일제조시 발생된 기공 또는 개재물 결합이 내부에서 수직으로 성장하여 레일을 파괴시키는 균열로써 1980년대 이전에는 레일 파손원인의 약 15%를 차지할 정도로 빈번하였으나, 레일제조기술의 발전 및 균열 탐상장비의 발전으로 인하여 균열이 발생되더라도 임계균열로 성장하기 전에 쉽게 감지할 수 있으므로 적절한 유지보수가 수행되는 한 현재는 거의 문제시 되지 않는다고 보고되고 있다.

Squat은 차륜과 레일이 접촉하는 크라운 부분의 내부에서 발생하여 레일표면을 따라 성장하다 마침내 레일표면이 뜯겨져 나가는 스펀링(spalling) 또는 레일내부로 침투하는 수직균열 형태로 성장하는 손상으로 레일손상 원인의 약 45%를 차지할 정도로 중요한 손상이다. Squat은 작용하중, 균열형상 및 크기 등의 조건에 따라 수평에서 수직으로 분기하는 시점이 다르며 수평으로 성장하다 스펀링 형태로 나타나는 것은 비교적 쉽게 제거할 수 있으므로 문제가 되지 않으나 수직으로 성장하는 것은 상대적으로 균열을 받

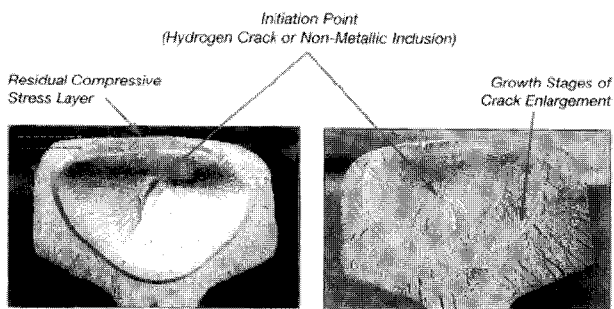


Fig. 2 Rail failure by a tache ovale defect

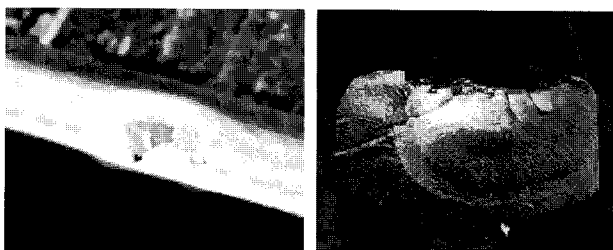


Fig. 3 Rail failure by a squat defect

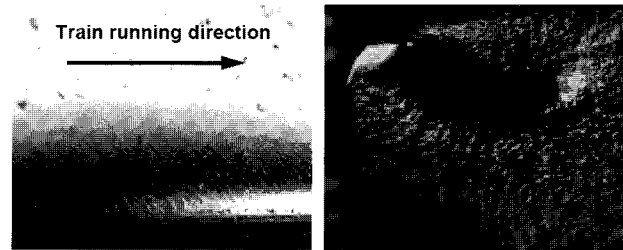


Fig. 4 Rail failure by a head check defect

견하기 어렵기 때문에 크게 성장할 수 있고, 이는 레일파괴를 야기할 수 있기 때문에 주의 깊게 다루어져야 한다. Squat은 파상마모(corrugation), 용접 및 차륜표면의 요철이 주요 발생원인으로 간주되고 있으나 아직까지 완벽하게 밝혀지지 않고 있다.

Head check은 게이지코너에 0.5~7mm간격으로 발생된 균열로 반경 1,000~1,500m 곡선부의 레일에서 주로 발생된다. Head check는 레일표면에서 약 30°경사로 평행하게 균열을 이루며 발생하므로 초음파를 이용한 탐상시 균열간의 간섭으로 인하여 상대적으로 큰 균열이 발견되지 않을 가능성도 있으므로 주의 깊게 다루어져야 한다. 1995년까지는 발생이 드물었으나, 현재는 매우 중요한 균열타입으로 간주되고 있다.

3. 접촉손상 해석절차

3.1 레일손상인자

차륜레일의 접촉손상에 영향을 주는 영향인자는 Fig. 5와 같이 차륜/레일 형상(profile), 소재의 재료물성치(material properties), 윤활(lubrication)조건, 차량속도(vehicle speed), 마모(wear), 열차선형에 의한 궤도높임(track elevation), 마찰(friction), 접촉영역 크기 및 형상(contact area and shape)

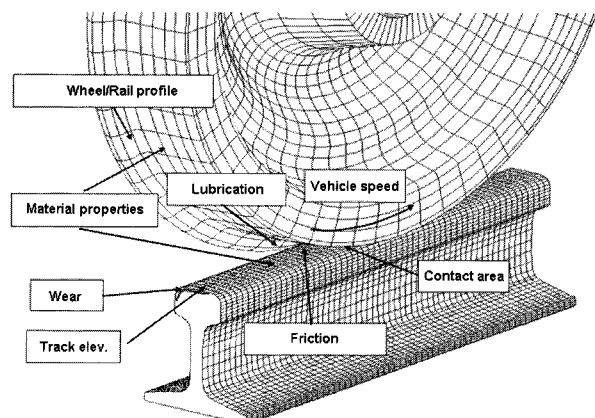


Fig. 5 Wheel rail contact affective parameters

등 여러 가지가 있다. 따라서 각각의 영향인자를 모델링하고 이를 시뮬레이션하기 위해서는 여러 단계의 접촉손상해석 프로세스를 거칠 필요가 있다.

3.2 접촉손상해석 프로세스

접촉손상해석은 차륜과 레일의 접촉에 의해 차륜표면 및 레일표면에 발생한 응력분포를 예측하고, 이를 바탕으로 마모, 피로손상을 해석하는 것으로 이를 위해서는 열차의 주행에 따라 접촉위치 및 작용하중을 계산하기 위한 차량동역학 해석, 레일 및 하부구조물의 동적특성해석, 차륜/레일의 접촉응력해석, 피로·마모손상의 발생 및 진전예측을 위한 손상해석 프로세스가 필요하다. 한편 해석적인 방법으로 예측이 불가능한 파라미터는 실험적접촉시험을 통해 측정하며 따라서 접촉손상해석을 위해서는 Fig. 6과 같이 각각의 프로세스를 서로 연계하여 사용하고 있다.

3.3 차량동역학 모델

차량동역학 모델은 철도차량을 이루는 요소들 즉, 구체(carbody), 대차(bogie), 휠셋(wheelset) 등과 스프링(spring), 부시(bush), 댐퍼(damper) 등의 서스펜션 컴포넌트들의 관계를 수학적인 모델로 표현하고 레일형상, 표면불규칙도 등의 레일조건을 입력한 후 차량이 레일 위를 주행함으로써 발생하는 접촉하중을 계산하기 위한 것이다. 대표적인 철도차량 동역학 시뮬레이션 소프트웨어로는 VAMPIRE, GENSYS, SIMPACK, VI-Rail(ADAMS), NUCARS 등이 있다.

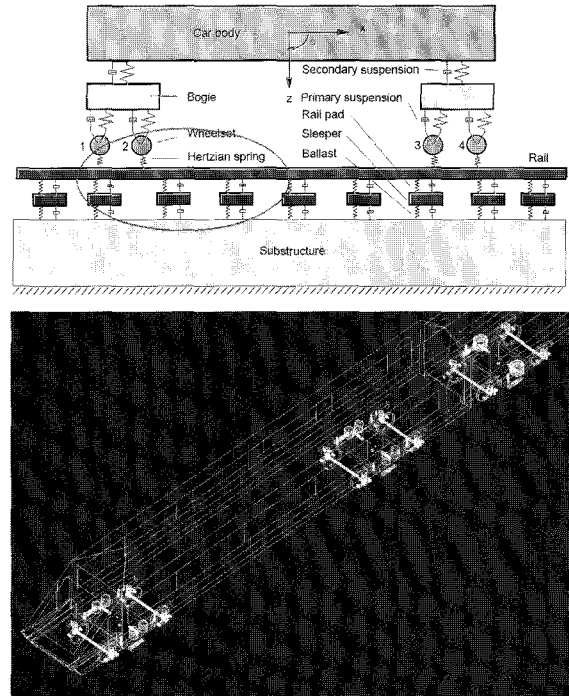


Fig. 7 A railway vehicle dynamic model developed using the VI-Rail program

3.4 궤도해석모델

궤도를 이루고 있는 레일, 슬리퍼(Sleeper), 패드(Pad), 발라스트(Ballast) 등은 강체가 아니며 각기 고유한 강성을 가지고 차량으로부터 가해지는 하중 및 진동을 흡수한다. 따라서 차륜과 레일의 접촉상태를 해석하기 위해서는 차량 하부구조물에 대한 모델을 만들고 시뮬레이션함으로써 좀

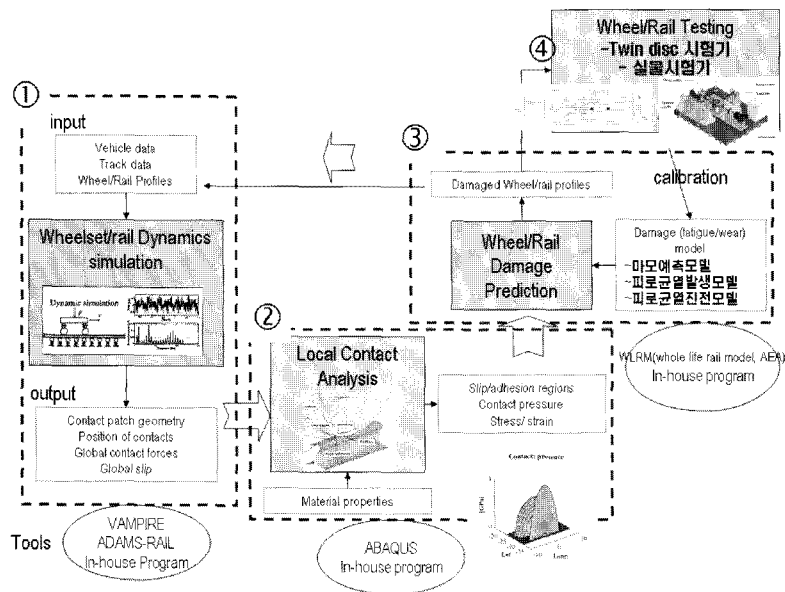
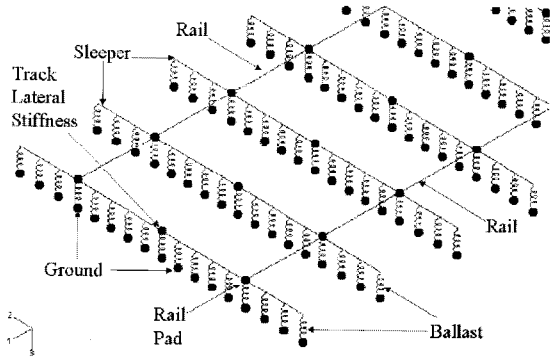
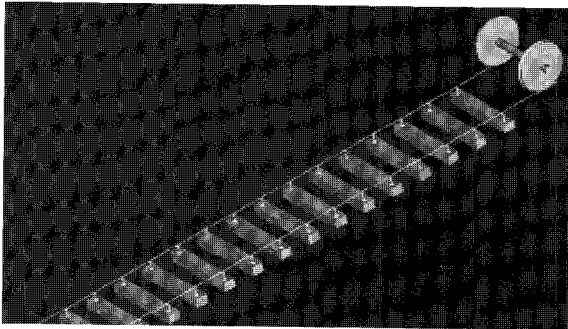


Fig. 6 Typical wheel rail contact damage prediction process



(a) A track model developed using ABAQUS



(b) A track model developed using ADAMS/Rail

Fig. 8 A typical track dynamic analysis model

더 실제 열차거동에 가까운 값을 계산할 수 있다. 또한 보다 정밀한 해석을 위해서는 레일과 침목 그리고 침목과 도상의 구속상태를 부싱(bushing)의 연결요소를 사용하고 모델링하여 운행 중 레일의 동적 특성을 분석하게 된다.

3.5 접촉해석모델

유연체(flexible body) 접촉모델에 관한 연구는 Hertz(1882)³²⁾에 의해 시작되었으며, 이후 Cattaneo (1938), Mindlin (1949), K.L. Johnson(1958)³³⁾에 의해 업그레이드되었다. 한편 차륜과 레일의 접촉과 같이 견인력이 존재하는 구름접촉에 관한 연구는 Carter(1926)³⁴⁾에 의해 시작되었으며, K.L. Johnson (1975)³⁵⁾에 의해 원추도(conicity)의 제한없이 구름접촉문제를 풀 수 있는 Non-Hertz 모델로 개선되었다. 한편 Kalker (1973)³⁶⁾는 구름접촉시 미끄러지는 크리피지(creepage) 개념을 도입하여 차륜과 레일의 접촉모델을 제시하였다.

Hertz 접촉모델은 등방성(isotropic), 동질(homogeneous) 및 선형탄성(linear elastic)거동을 하며, 수직하중이 작용하고 마찰력이 없는 두 원통 및 구체의 접촉을 모델링한 것이다. 하중 P 를 받는 반지름 R_1, R_2 인 두 원통이 접촉할 때 접촉영역의 반경, a , 접촉부 변형량, δ 및 최대압력 p_0 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$a = \sqrt{\frac{3PR}{4E^*}} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \sqrt{\frac{9P^2}{16RE^{*2}}} \quad (2)$$

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi a^2} = \sqrt[3]{\frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2}} \quad (3)$$

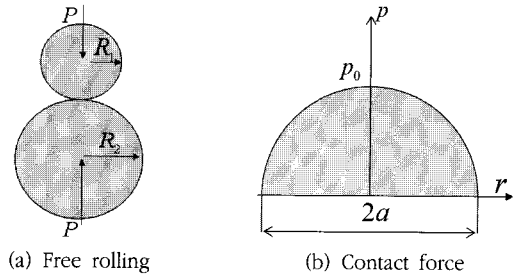


Fig. 9 Hertz's contact model

그러나 차륜과 레일의 접촉과 같이 견인력을 전달해야 하는 구름접촉은 수직하중만을 고려한 Hertz 접촉모델과는 다르다. Fig. 10은 견인력을 고려한 Carter³⁴⁾의 접촉모델로써 접촉부에서는 stick/slip이 공존하며, 접촉하중의 분포는 Fig. 10(b)와 같다.

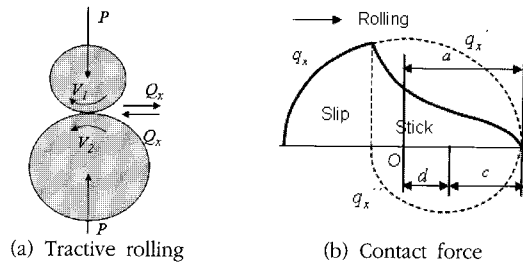


Fig. 10 Carter's contact model

Carter 모델에서의 접촉영역의 반경 a , 최대하중 p_0 , 하중 분포, p 및 응착(adhesion)너비, c 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$a = \sqrt{\frac{4PR}{\pi E^*}} \quad (4)$$

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a}, \quad p = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (5)$$

$$c = a \sqrt{1 - \frac{Q_x}{\mu P}} \quad (6)$$

이때의 총 견인력 q_x 는 다음과 같다.

$$q_x = \dot{q}_x + \ddot{q}_x \quad (7)$$

$$\dot{q}_x = \mu p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \quad -a \leq x \leq a$$

$$\ddot{q}_x = -\mu p_0 \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x-d}{c}\right)^2}, \quad a-2c \leq x \leq a$$

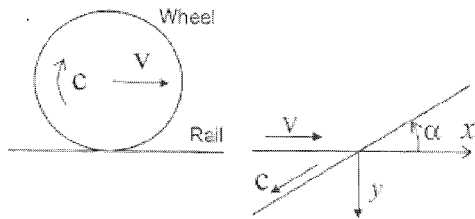
한편, 차륜과 레일의 접촉에서는 높은 견인력을 전달해야 하기 때문에 stick/slip 운동의 영향으로 인하여 접촉부에서의 선속도가 일치하지 않는 크리피지(creepage) 현상이 발생한다. 여기서 길이방향(longitudinal) 크리피지, ξ_x 와 수평(lateral)방향 크리피지, ξ_y 는 실전방향/수평방향속도(actual forward/lateral velocity)에서 순수구름전방향/수평방향속도(pure rolling forward/lateral velocity)를 뺀 값을 전방향속도(forward velocity)로 나눈 값으로 각각 정의되며, 회전(spin)방향 크리피지, ϕ 는 접촉부에 수직인 각속도, Ω 를 전방향속도로 나눈 값으로 정의된다.

$$\xi_x = (|V - |C_x|) / V \quad (8)$$

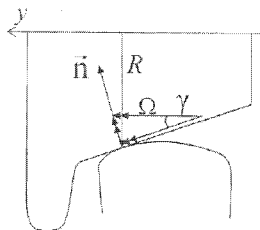
$$\xi_y = \alpha \quad (9)$$

$$\phi = \frac{\Omega \sin \gamma}{v} \approx \frac{\sin \gamma}{R_{wheel}} \approx \frac{\gamma}{R_{wheel}} \quad (10)$$

2D 해석모델의 경우 실제 차륜 및 레일형상을 단순화하고 하중을 단순화함으로써 해석을 수행하기 때문에 차륜레



(a) Longitudinal/lateral creepage



(b) Spin creepage

Fig. 11 Kalker's wheel rail contact model

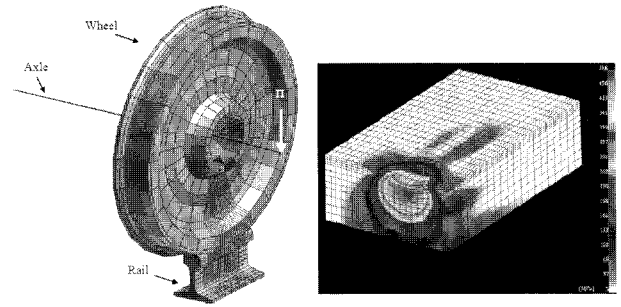


Fig. 12 Wheel rail contact analysis applying 3D finite element method

일형상의 특성을 정확히 반영하지 못하며, 또한 횡압, 공격각(attack angle), 접촉각(contact angle) 등도 시뮬레이션하지 못한다. 따라서 이러한 파라미터를 고려하기 위해서 최근에는 3D 유한요소해석이 적용되고 있다.

4. 마모손상 해석기법

차륜/레일 마모를 예측하는 절차는 Fig. 6의 접촉손상 해석 프로세스와 같이 차량/궤도 다물체 동역학 해석, 차륜/레일 접촉문제 해석, 마모해석 등으로 구분할 수 있다. 마모 예측의 차이점은 마모된 차륜/레일 형상을 업데이트하고 이를 이용하여 동일한 해석 프로세스를 매번 반복적으로 수행하여야 한다는 것이다. 마모해석에서 사용되는 마모예측 모델은 크게 에너지전달 모델(Energy transfer models)과 미끄럼모델(Sliding models)로 구분된다. 에너지전달 모델은 마모가 접촉영역에서 발생되는 에너지의 함수로 가정하는 것이고, 미끄럼모델은 마모가 미끄럼 거리, 수직 하중, 경도의 조합에 영향을 미친다는 모델이다.

4.1 에너지 전달 마모 모델

영국의 철도 연구소(BR Research)는 차륜/레일 마모 거동을 이해하고 모델링하기 위하여 많은 연구를 수행하였다. 그 결과 마모율은 차륜/레일 접촉에서 크리피지(creepage; 차륜과 레일 사이의 상대속도를 차륜의 주행방향 이동속도로 나눈 값)로 나타내는 마찰 에너지와 관계가 있다고 결론을 내렸다. 즉 다음 식과 같이 마모는 길이 방향 및 횡방향 각각의 크립력(creep forces) T 와 크리피지 r 의 곱의 합으로 표현한다. 대부분의 경우 스핀(spin) 항목은 기여도가 작기 때문에 무시한다.

$$Wear Number = T\gamma = T_x \gamma_x + T_y \gamma_y \quad (11)$$

Table 1. Comparison of wear rate on rolling condition

Rolling condition	Regime	T γ (N)	Wear rate (mm ² /km rolled)
Dry	Mild	<100	0.25T γ /D
Dry	Mild Plateau	>100 and <200	25.0/D
Dry	Severe	>200	(1.19T γ -154)/D
Lubricated	Mild	<500	3.0/D
Lubricated	Severe	>500	(1.19T γ -154)/D

무윤활 상태에서 이 값이 200N보다 작으면 경마모 영역(응착 마모), 400N보다 클 경우 가혹마모(severe wear)영역(박리 마모)이고, 200N과 400N사이 일 경우 두 가지 현상이 모두 발생한다. 실험결과로 얻은 각 영역별 마모율에 대한 수식은 Table 1과 같고, 여기에서 *D*는 차륜 직경(mm)을 나타낸다.

4.2 미끄럼 마모 모델

미끄럼 마모 모델은 구름 및 미끄럼 접촉 때문에 발생하는 마모를 모델링하기 위하여 트라이볼로지 분야에서 많이 사용되고 있는 Archard 마모 모델이다. Archard 마모 모델의 경우 마모량은 수직력과 미끄럼 거리에 비례하고 재료 물성치인 경도에 반비례한다는 것이며, 다음 식과 같다.

$$V_{wear} = k \frac{Ps}{H} \quad (12)$$

여기에서 V_{wear} 는 마모량(m³), *s*는 미끄럼 거리(m), *P*는 수직력(N), *H*는 경한 재료의 경도(N/m²), *k*는 마모상수이다. Archard 마모 모델은 접촉면의 응착 영역(adhesion zone)에서는 미끄럼 거리가 0이기 때문에 마모가 발생하지 않는다. 또한, 이 모델에서 중요한 것은 마모상수의 결정이며, 마모

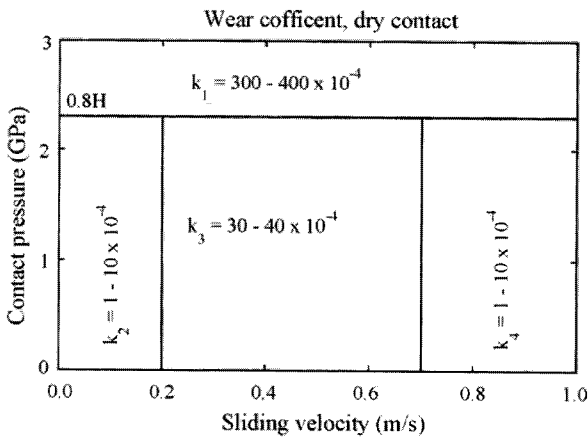


Fig. 13 Wear coefficient in dry contact condition

상수는 이물질 및 윤활, 환경적 영향 등에 따라 다르므로 실험실 시험을 통하여 구할 수 있다. 차륜/레일 재질을 이용하여 많은 실험으로 구한 접촉압력과 상대 미끄럼속도의 변화에 따른 마모상수의 변화는 Fig. 13과 같다.

5. 피로손상 해석기법

5.1 피로손상 발생해석

반복하중을 받는 재료의 거동은 완전탄성(perfectly elastic), 탄성 셰이크다운(elastic shakedown), 소성 셰이크다운(plastic shakedown) 및 라체팅(ratchetting)으로 나눌 수 있다. 따라서 재료거동에 따라 각기 다른 피로손상 발생모델을 적용해야 한다.

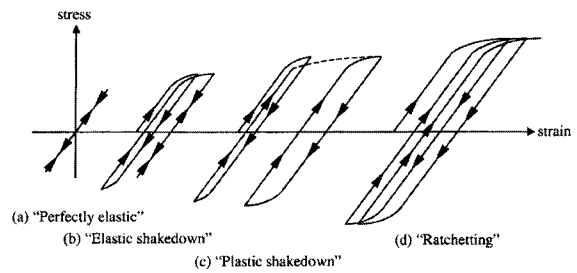


Fig. 14 Schematic diagram of material response to cyclic loading

5.1.1 탄성 셰이크다운 모델

탄성 셰이크다운 모델은 작용하중이 비교적 작은 경우로 고주기피로에 의한 손상이 발생한다고 가정한다. 즉, 레일에 가해지는 하중진폭이 레일의 피로한도를 초과하는 경우 손상이 발생한다고 가정하며 다음 식에 의해 손상의 발생 여부를 판단한다.

$$\begin{aligned} \tau_a(t) + \alpha_{DV} \sigma_h(t) &> \tau_e \\ \tau_a(t) - \alpha_{DV} \sigma_h(t) &\leftarrow \tau_e \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\tau_a(t)$ 는 전단응력진폭(shear stress amplitude)이며, $\sigma_h(t)$ 는 정응력(hydrostatic stress)이며, τ_e 는 순수전단(pure shear)상태에서의 피로한도(fatigue limit)이다.

5.1.2 소성 셰이크다운 모델

한편, 소성 셰이크다운 모델은 저주기피로에 의한 손상 발생으로 Miner의 누적피로손상모델에 의해 누적손상(accumulated damage), *D*=1이 되면 손상이 발생한다고 가정하며 다음 식에 의해 손상의 발생 여부를 판단한다.

Coffin-Manson relation

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\tau_f}{G} (2N_f)^b + \gamma_f' (2N_f)^c \quad (14)$$

여기서 $\Delta\gamma/2$ 는 전단변형률범위(shear strain range)이며, τ_f 와 γ_f' 는 각각 전단피로강도(shear fatigue strength)와 전단 피로연성계수(shear fatigue ductility coefficient)이며 b와 c는 피로강도와 피로연성지수이다. 또한 G는 전단탄성계수이며 N_f 는 균열발생시까지의 사이클이다.

5.1.3 라체팅 모델

라체팅 모델은 누적변형률(accumulated strain)이 임계변형률(critical strain), ϵ_c 에 도달하면 손상이 발생했다고 판단하는 것으로 다음 식에 의해 손상의 발생여부를 판단한다.

$$N_f = \frac{\epsilon_c}{\Delta\epsilon_r}, \Delta\epsilon_r = \sqrt{(\Delta\tilde{\epsilon})^2 + (\Delta\tilde{\gamma}/\sqrt{3})^2} \quad (15)$$

여기서 $\Delta\epsilon_r$ 은 사이클당 등가 라체팅 소성변형률로써 사이클당 축방향으로의 라체팅량, $\Delta\epsilon$ 과 전단방향으로의 라체팅량, $\Delta\gamma/\sqrt{3}$ 으로부터 계산할 수 있다.

5.2 피로손상 진전해석

5.2.1 피로손상 진전프로세스

차륜과 레일의 접촉에 의한 손상의 성장은 균열성장 매커니즘에 따라 Fig. 15와 같이 균열발생, 경사균열성장, 수직균열성장의 3단계로 나뉜다.

균열발생단계는 앞서의 손상발생조건에 따라 균열이 생

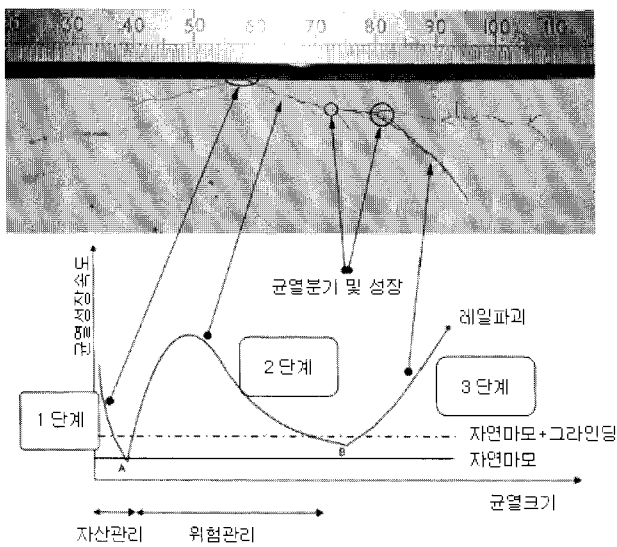


Fig. 15 Schematic diagram of crack propagation rate

성되는 단계이다. 차륜과 레일의 접촉은 매우 작은 접촉부에서 발생하므로 매우 큰 하중이 매우 작은 접촉면에 집중되어 소성변형이 발생하며, 차량의 통과에 따라 이러한 하중이 레일에 지속적으로 가해지면 라체팅(ratcheting)현상이 발생하는데 라체팅 현상이 누적되어 재료가 견딜 수 있는 최대 변형률인 임계전단변형률(critical shear strain)에 도달하면 재료가 손상을 입게 된다. 균열의 생성은 결정립 크기에서 이루어지므로 균열발생 시점을 정의하기는 매우 어렵다. 일반적으로 마이크로 스케일에서 초기 균열의 크기는 결정립 크기의 5~10배로 정의하므로 펄라이트 레일소재의 경우에는 약 0.1mm~0.5mm에 해당한다. 그러나 실제 차륜과 레일의 접촉시 결정립은 심하게 찌그러지므로 초기 균열의 길이는 이보다 훨씬 작을 수도 있다.

경상균열 성장단계는 견인력에 의한 전단응력에 의해 균열이 성장하는 단계로 균열의 성장속도는 선형탄성파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM)을 이용하여 예측할 수 있으며, 이때 균열의 성장속도는 균열 열림방향(Model I)과 균열 미끄러짐방향(Model II)이 혼합된 모드이다. 견인력에 의한 접촉응력은 레일 표면에서 가장 크게 나타나며 깊이가 깊어질수록 점차 작아진다. 따라서 초기 단계에서 균열의 성장속도는 빠르지만 균열이 성장함에 따라 성장속도는 점차 느려진다. 2단계의 균열성장수명이 전체 균열성장수명에서 차지하는 비율은 매우 크다. 이때 발생한 균열의 성장속도가 차륜과 레일의 접촉에 따른 마모속도(자연마모+그라인딩 마모)보다 크면 균열은 성장하며 반대로 마모속도가 크면 균열은 소멸된다.

수직균열성장단계는 균열이 점차 성장하여 레일의 굽힘하중이 지배적이 되는 영역에 도달하여 굽힘하중의 영향을 받아 수직방향으로 분기하는 단계이며, 이때 균열은 굽힘하중 뿐만 아니라 잔류응력, CWR(Continuous Welded Rail)에 의한 인장응력의 영향을 받는다. 3단계에서 균열의 성장속도는 매우 빠르므로 레일 파괴 시까지의 잔여수명은 상대적으로 매우 작다.

5.2.2 균열성장해석

구조물에 발생된 균열은 반복적인 작용하중에 따라 지속적으로 성장하므로 Fig. 16과 같이 매 하중주기에 대해 균열성장량을 계산하여 평가해야 한다. 레일표면에 발생한 미소 균열의 진전속도 및 진전량을 계산하기 위해서는 초기균열길이, a_0 에 대해 1회 구름접촉에 의한 응력확대계수 진폭, ΔK 를 계산하고, Paris 법칙에 의해 균열성장량, Δa 를 계산한 후, 누적균열길이, a 를 계산하여 불안정균열성장 가능성을 평가한다. 이때 불안정 균열성장가능성이 없으면 누적균열길이, a 에 다시 1회의 구름접촉하중을 부하하고

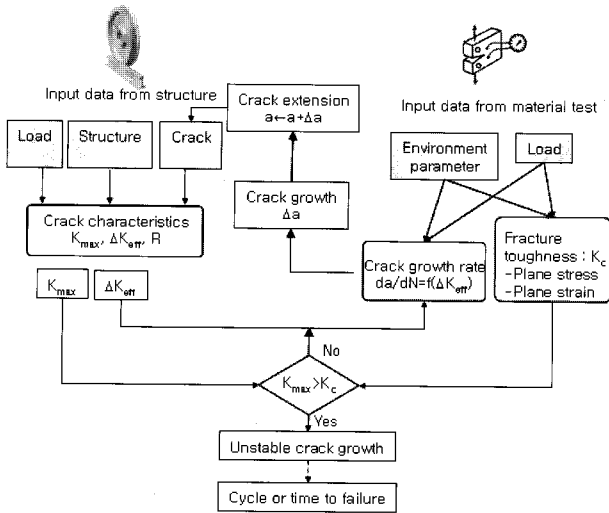


Fig. 16 Schematic diagram of crack propagation rate estimation

균열성장량을 다시 계산하고 평가를 수행하는 일련의 작업을 모든 하중주기에 대해 반복적으로 수행해야 한다. Paris의 균열성장식은 다음과 같다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{16}$$

6. 결 언

차륜/레일 구름접촉에 의한 레일의 손상은 차량의 고속화 및 축중의 증가로 인해 가속화될 것으로 예상되며, 레일에 손상이 발생할 경우 승차감, 소음, 차륜 손상, 주행안정성의 저하는 물론 적절한 유지보수가 수행되지 않을 경우 레일의 파괴를 불러올 수 있다. 레일의 손상은 레일 그라인딩 및 갱환 등을 레일의 보수작업을 발생시키며 이는 철도 운영사에 상당한 비용요소를 작용한다. 따라서 레일의 건전성을 유지하며 레일의 유지보수비용을 줄이기 위해서는 지속적인 연구를 통해 구름접촉에 의한 레일손상을 저감시킬 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다. 또한, 차륜과 레일의 인터페이스에 의한 구름접촉손상은 피로와 마모 메커니즘 사이의 상호작용에 의해 발생하므로 상호작용에 의한 손상을 최소화하기 위하여 피로와 마모 메커니즘의 제어 및 관리, 피로와 마모 메커니즘 사이의 균형 유지 등에 관한 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Rail Safety & Standards Board, "Management and understanding of rolling contact fatigue", 2006

2. J. Jaiswal, S. Blair and S. Iwnicki, "A system approach to evaluating rail life", <http://www.railtechnologyunit.com>

3. D.Y. Jeong, "Analytical modelling of rail defects and its applications to rail defect management", U.S. Dept. of Transportation, 2003

4. J.W. Ringsberg, "Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation", International Journal of Fatigue, vol.23, 2001, pp.575~586

5. M.C. Bustow, A.S. Watson and M. Beagles, "Simulation of rail wear and rolling contact fatigue using the whole life rail model", Railway Engineering, 2003

6. D.Y. Jeong, "Progress in rail integrity research", U.S. Dept of Transportation, 2001

7. T. Deshimaru, H. Kataoka and N. Abe, "Estimation of service life of aged continuous welded rail", QR of RTRI, vol, 47, No. 4, 2006

8. UIC Code 712, "Rail defects", International Union of Railway, 2002

9. S. Fukagai, T.Ban, M. Ogata, M. Ishida, A.Namura, "Development of wheel/rail friction moderating system(FRIMOS)", QR of RTRI, vol. 49, No. 1, 2008

10. E. Magel and J. Kalousek, "The application of contact mechanics to rail profile design and grinding", Wear, vol. 253, pp.308~316, 2002

11. D.I. Fletcher and J.H. Beynon, "The effect of intermittent lubrication on the fatigue life of pearlitic rail steel in rolling-sliding contact", Proc. Instn Mech Engrs, vol. 214 Part F, pp.145~158, 2000

12. M. Hiensch, "Two-material rail combats rolling contact fatigue", Railway Gazette International, Sept. 2003


13. W.R. Tyfour, H.H. Beynon, A.Kapoor, "The steady state wear behavior of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions", Wear, vol. 197, 1996, pp.79~89

14. CHERMEC, "Trenial report 2006", Chalmers University of Technology, 2006

15. D.I. Fletcher, J.H. Beynon, "Equilibrium of crack growth and wear rates during unlubricated rolling-sliding contact of pearlitic rail steel", IMechE, 2000, pp.93~105

16. H.Chen, T.Ban, M.Ishida, T. Nakahara, "Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions", Institute of Material Engineering Austral asia, 2006

17. M. Ishida and Y. Satoh, "Development of rail/wheel high speed contact fatigue testing machine and experimental

- results”, QR of RTRI, vol.2, No.5, 1988
18. 김청균, 김기환, “고속전철용 레일 - 휠 접촉에서 응력분포에 관한 유한요소해석”, 한국윤활학회지 제13권 제3호, 1997. 9, pp.93~101
 19. 서정원, 구병춘, 최재봉, 김영진, “잔류응력 변화를 고려한 철도차량 차륜의 접촉피로 수명평가”, 대한기계학회논문집 A권 제28권 제9호, 2004. 9, pp.1391~1398
 20. 권석진, 이동형, 서정원, 권성태, “비파괴적 표면조직검사법과 파괴역학 특성에 따른 고속철도용 차륜 답면의 손상평가”, 대한기계학회논문집 A권 제31권 제7호, 2007. 7, pp.756~763
 21. 김정규, 이종선, 김철수, “단일 및 혼합모드 하중하에서의 레일강의 파괴조건 및 피로균열진전거동”, 대한기계학회 논문집 A권 제23권 제6호, 1999. 6, pp.1039~1047
 22. 박용걸, 성덕룡, 박흥기, 공신용, “현장측정을 통한 노후레일의 휨 피로수명 평가”, 한국철도학회 논문집 제11권 제3호, 2008. 6, pp.317~325
 23. 김만철, 강태구, “레일유지관리 효율화를 위한 경부 고속선 레일 연마 기준(안)”, 한국철도학회 논문집 제11권 제3호, 2008. 6, pp.272~279
 24. 강성수, “손상역학에 의한 레일의 구름접촉피로 연구”, 한국마린엔지니어링학회지 제32권 제6호, 2008. 9, pp.931~937
 25. 구병춘, “차륜-레일 구름접촉에 의한 라체팅 모델링”, 한국철도학회 논문집 제11권 제3호, 2008. 6, pp.311~316
 26. 허현무, 유원희, “고속철도 차륜답면의 마모 특성에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집 제8권 제5호, 2005. 10, pp.477~482
 27. 최정흠, 문태선, 김기환, 한동철(2003), “고속철도 차량의 차륜과 레일간의 마모예측”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.369~376
 28. 이희성, 강부병(2006), “고속열차 차륜 플랜지 마모”, 한국윤활학회 논문집, Vol.22, No.1 Feb. 2006, pp.33~39
 29. 이희성, 곡선부 주행 차량의 마모특성에 관한 연구, 한국철도학회 논문집 제10권 제6호, 2007. 12, pp.772~778
 30. 하관용, 김희식, “가속도/감속도 변화율에 따른 레일마모 현상에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집 제10권 제5호, 2007. 10, pp.607~612
 31. 이희성, “차륜/레일 시스템 인터페이스”, 한국철도학회지 제8권 제3호, 2005. 9, pp.40~44
 32. H. Hertz, “On the contact of elastic solids”, J. reine und angewandte Mathematik, vol. 92, pp.156~171, 1882
 33. K.L. Johnson, “The effect of a tangential contact force upon the rolling motion of an elastic sphere on a plane”, Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics, vol. 25, p.339, 1958
 34. F.W. Carter, “On the action of a locomotive driving wheel”, Proceedings of Royal Society, A112, p.151, 1926
 35. K.L. Johnson, “Non-Hertzian contact of elastic spheres”, In. The Mechanics of Contact between Deformable Bodies, Eds. de Pater & kalker, p.26, 1975
 36. J.J. Kalker, “Simplified theory of rolling contact”, Delft progress report, series, 1973 

[담당 : 김만철, 편집위원]