

차륜-레일 구름접촉에 의한 피로손상 연구동향

| 전현규 · 이동형 · 서정원 · 권석진 |
한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

1. 개요

구름접촉피로(rolling contact fatigue: 이하 RCF)는 열차의 이동에 따라 차륜과 레일의 반복적인 접촉에 의해 발생하는 피로현상으로 정의되며, 차량의 고속화에 따른 견인력 및 축중의 증가로 인하여 손상의 발생빈도가 점차 높아지고 있다.

레일의 손상은 승차감, 소음, 차륜 손상, 주행안정성 등을 저하시킬 뿐만 아니라 적절한 유지보수가 수행되지 않을 경우 레일의 파괴를 야기시킬 수 있기 때문에 매우 중요하게 다루어지고 있다.

RCF에 의한 피로손상은 과거에는 크게 중요하지 않게 생각되어 왔다. 그 이유는 축중 및 견인력이 현재에 비해 상대적으로 작았기 때문에 대부분의 손상이 발생된 이후 진진하지 못하고 자연마모 또는 주기적인 그라인딩에 의해 제거되었기 때문이다. 그러나 축중 및 견인력이 커질수록 균열의 성장속도가 커지며 그 결과 자연마모와 주기적인 그라인딩으로 제거되지 않은 균열이 존재하게 되고 계속적으로 성장함으로써 레일파괴에 이를 가능성도 높아지게 되었다.

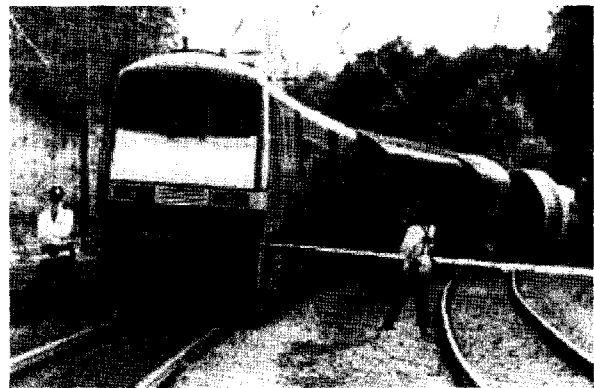
RCF가 주목을 받기 시작한 것은 2000년 10월 영국 Hatfield에서 발생한 열차사고¹⁾가 계기가 되었으며 이후 유럽을 중심으로 다양한 연구가 수행되어 오고 있다.

2. RCF 레일손상형태

차륜과 레일사이의 높은 접촉응력은 레일 표면에서의 소성변형을 야기하며 소성변형이 누적되어 재료가 견딜 수 있는 한계를 넘으면 균열이 발생한다. 발생한 균열은 레일탐상장비로 발견하여 제거되기 전까지 점차 성장하는 모습을 보인다. 균열의 성장은 균열발생부의 형상, 하중이력 및 환경 등의 조건에 따라 다양한 형태로 발전한다. RCF에 의한 대표적인 손상형태는 Tache Oval, Squats 및 Head Check가 있다.

Hatfield 열차사고¹⁾

Hatfield 열차사고는 2000.10.17일 영국 Hatfield에서 발생한 사고로 4명이 사망하고 약 100여명의 승객이 부상



Hatfield 열차사고현장

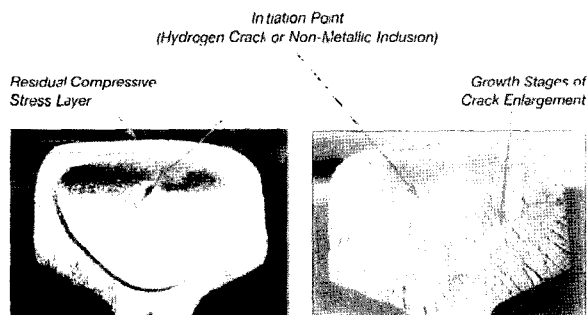


그림 1. Tache oval에 의한 레일파괴²⁾

당한 열차사고이다. 사고의 원인은 반복적인 RCF에 의해 레일에 균열이 발생하였음에도 불구하고 선로 운영사인 Railtrack에서 적절한 조치를 취하지 않았음으로써 균열이 진전하여 레일이 파괴되는 것으로부터 기인하였다. 사고 조사도중 다른 부분에서도 위험한 수준에 도달한 균열이 300여개 이상 발견되었으며, 이는 철도민영화를 주도했던 영국 전역에 경각심을 일깨웠다. 비록 다른 열차사고에 비해 사상자수는 많지 않지만, 이후 레일관리에 대한 필요성을 일깨운 사고로서 RCF 연구가 본격적으로 시작되는 계기가 된 만큼 중요한 의미를 갖는다.

2.1. Tache Oval

Tache Oval은 레일제조시 발생된 기공 또는 개재물 결합이 내부에서 수직으로 성장하여 레일을 파괴시키는 균열로써 1980년대 이전에는 레일 파손원인의 약 15%를 차지하였으나, 레일소재 제조기술의 발전 및 균열 탐상장비의 발전으로 인하여 균열이 발생되더라도 임계균열로 성장하기 전에 쉽게 감지할 수 있으므로 현재는 거의 문제시 되지 않는다고 보고되고 있다.

2.2. Squats

Squats은 RCF 형태의 손상으로 보고된 최초의 결함으로 차륜과 레일이 접촉하는 크라운 부분의 내부에서 발생하여 레일표면을 따라 성장하다 마침내 레일표면이 뜯겨져 나가는 spalling 형태로 성장한다. 한편 squats은 작용하중, 균열형상 및 크기 등의 조건에 따라 수평으로 성장하다 수직으로 분기할 수 있는데 수평으로 성장하다 spalling 형태로 나타나는 것은 비교적 쉽게 제거할 수 있으므로 문제

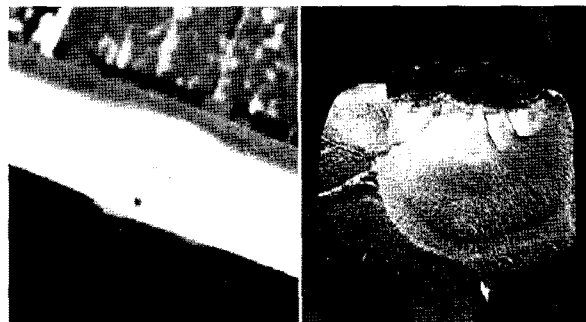


그림 2. Squats에 의한 레일파괴³⁾

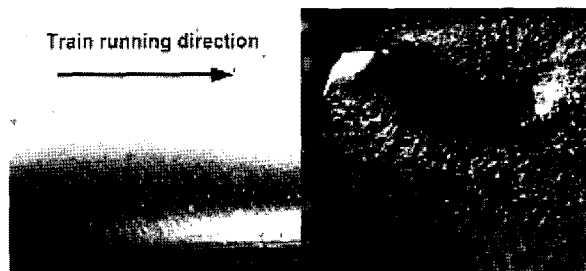


그림 3. Head check에 의한 레일파괴³⁾

가 되지 않는데 수직으로 성장하는 것은 상대적으로 균열을 발견하기 어렵기 때문에 크게 성장할 수 있으며 이는 레일파괴를 야기할 수 있기 때문에 주의 깊게 다루어져야 한다. Squats은 파상마모(corrugation), 용접 및 차륜표면의 요철에 의해 발생한다.

2.3. Head Check

Head check은 게이지코너에 0.5-7mm 간격으로 발생된 균열로 반경 1,000-1,500m 곡선부의 레일에서 발생된다. Head check는 레일표면에서 약 30° 경사로 평행하게 균집을 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. RCF 손상메카니즘 및 연구현황

3.1. RCF 손상발생 메카니즘

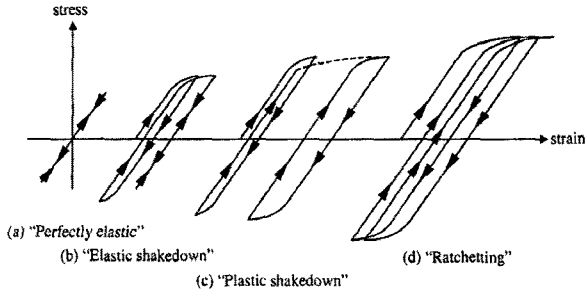


그림 4 반복하중하에서의 재료거동⁴⁾

반복하중을 받는 재료의 거동은 완전탄성(perfectly elastic), 탄성 셰이크다운(elastic shakedown), 소성 셰이크다운(plastic shakedown) 및 라체팅(ratchetting)으로 나눌 수 있다⁴⁾.

레일의 손상은 탄성 셰이크다운, 소성 셰이크다운 및 라체팅 상태에서 각각의 메카니즘에 의해 발생할 수 있다.

탄성 셰이크다운 모델⁵⁾은 고주기피로에 의한 손상발생으로 다음 손상조건에 의해 균열발생을 판단한다.

$$\begin{aligned} \tau_a(t) + \alpha_{DV} \sigma_h(t) &> \tau_c \\ \tau_a(t) - \alpha_{DV} \sigma_h(t) &< -\tau_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\tau_a(t)$ 는 전단응력진폭(shear stress amplitude)이며, $\sigma_h(t)$ 는 정응력(hydrostatic stress)이며, τ_c 는 순수전단(pure shear)상태에서의 피로한도(fatigue limit)이다. 따라서 전단응력진폭과 정응력의 합이 재료의 피로한도보다 크면 피로가 누적되고 마침내 피로손상이 발생한다.

한편, 소성 셰이크다운 모델⁶⁾은 저주기피로에 의한 손상발생으로 다음 손상조건에 의해 균열발생을 판단한다.

Coffin-Manson relation

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

여기서 $\frac{\Delta\gamma}{2}$ 는 전단변형률범위(shear strain range)이며,

τ_f 와 γ_f' 는 각각 전단피로강도(shear fatigue strength)와 전단피로연성계수(shear fatigue ductility coefficient)이며 b 와 c 는 피로강도와 피로연성지수이다. 또한 G 는 전단탄성계수이며 N_f 는 균열발생시까지의 사이클이다.

라체팅 모델⁷⁾은 누적변형률이 임계변형률, 에 도달하면 손상이 발생했다고 판단하는 것으로 다음 손상조건에 의해 균열발생을 판단한다.

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

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

3.2. 피로손상진전 메카니즘

RCF에 의한 균열의 발생 및 성장단계는 균열성장메카니즘에 따라 그림 5와 같이 3단계로 나뉜다⁸⁾. 1단계는 균열의 생성 및 초기 진전 단계로 균열의 크기가 매우 작기 때문에 육안으로 손상을 관찰하기는 어려우며, 2단계는 균열이 레일표면과 약 30°의 경사를 이루며 성장하는 단계로 접촉응력과 균열부에 갇힌 유체의 정압에 의해 성장한다. 3단계는 균열이 분할하여 수직으로 성장하는 단계로 레일의 굽힘모멘트에 의해 성장하며 성장속도가 빠르기 때문에 적절한 조치를 취하지 않으면 레일의 파괴를 야기할 수 있다.

1 단계(균열발생단계):

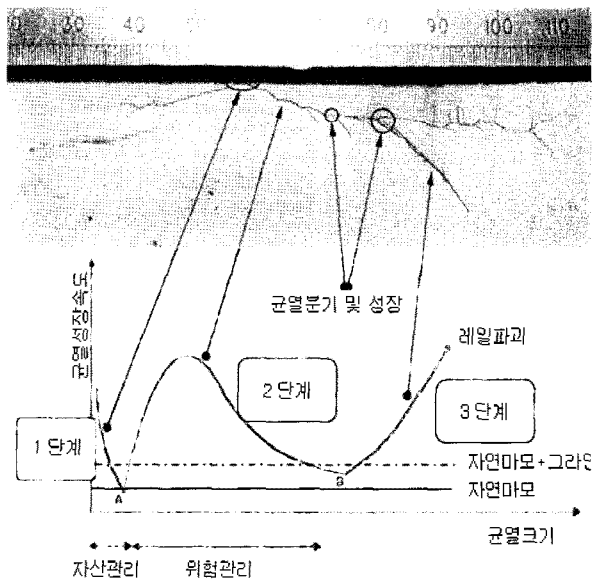


그림 5. RCF에 의한 균열성장 단계⁸⁾

차륜과 레일의 접촉면적은 약 100-150 mm²으로 상대적으로 매우 작으며 따라서 매우 큰 하중이 접촉면에 집중되므로 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 균열발생시점을 정의하기는 매우 어렵다. 일반적으로 마이크로 스케일에서 초기 균열의 크기는 결정립 크기의 5-10배로 정의하므로 펄라이트 레일소재의 경우에는 약 0.1 mm - 0.5 mm에 해당한다. 그러나 실제 차륜과 레일의 접촉시 결정립은 심하게 찌그러지므로 초기 균열의 길이는 이보다 훨씬 작을 수도 있다.

2 단계(경사균열 성장단계):

앞서 단계에서 생성된 균열은 축중 및 견인력에 의해 점차 성장한다. 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 균열의 성장함에 따라 성장속도는 점차 느려진다. 2단계의 균열성장수명이 전체 균열성장수명에서 차지하는 비율은 매우 크다. 이때 발생한 균열의 성장속도가 차륜과 레일의 접촉에 따른 마모속도(자연마모+그라잉팅 마모)보다 크면 균열은 성장하며 반대로 마모속도가 크면 균열은 소멸된다.

3 단계(수직균열성장단계):

균열이 점차 성장하면 레일의 굽힘하중이 지배적이 되는 영역에 도달하며 균열은 굽힘하중의 영향을 받아 수직 방향으로 분기한다. 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.

3.3. RCF 국외연구동향

RCF에 관한 연구는 유럽을 중심으로 하여 활발하게 이루어지고 있으며 최근에는 일본, 중국 등에서도 연구가 수행되고 있다. 유럽의 연구는 ERRI, RSSB 등의 예산지원으로 학계, 연구소, 산업체 등의 컨소시엄의 형태를 이루어 수행되고 있으며, 지속적인 연구개발에 대한 투자로 꾸준한 연구가 수행될 수 있도록 하고 있다. RCF 분야에 대표적인 연구기관으로는 스웨덴의 Charmec, 네델란드 TU Delft, 영국 Birmingham, Manchester Metropolitan, Newcastle, Sheffield 대학이 있으며, 산업체 및 연구기관으로는 AEA Technology, Corus Railway Technology, DB, SNCF 등이 있다. 미국에서는 Volpe 센터를 중심으로 TTCI 등에서 연구를 수행하고 있으며, 아시아에서는 CARS, RTRI 등에서 연구를 수행하고 있다.

유럽에서는 UIC/WEC를 중심으로 1997년 “Rail Defect Management” 프로젝트를 시작하였고, 1997년 FRA, Volpe가 참여하였으며 이후 AAR, TTCI, China Railways, China Academy of Railway Science, East Japan Railways, ERRI, India Railway Research Designs and Standards Organization, Queensland Rail(Australia), RTRI, Russian Railway Research Institute, Spoornet (South Africa), FRA, Volpe 등이 참여하고 있어 레일손상에 관한 심도 있는 연구를 수행하였다.

스웨덴 Chalmers 대학에서는 “Charmec research” 프로젝트⁹⁾로 차륜/레일 접촉피로, 레일의 파상마모, 비원형 차륜

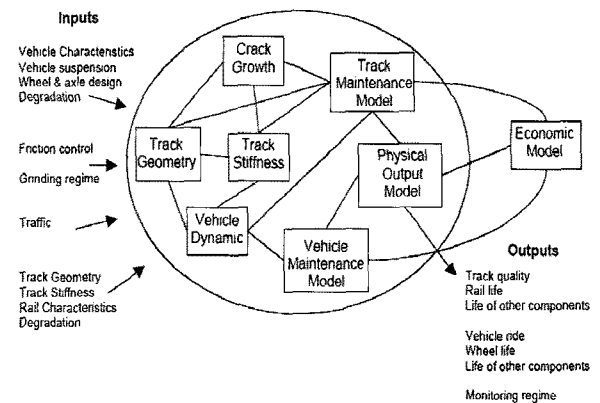


그림 6. WRISA의 VTISM의 개념도¹⁰⁾

등에 대한 연구를 1995년부터 체계적으로 수행하고 있다.

영국에서는 Hatfield에서 발생한 탈선사고를 계기로 하여 RCF 현상에 대한 연구를 RSSB를 중심으로 하여 본격적으로 수행하였다. RSSB의 지원하에 WRISA Technical Sub-group¹⁰⁾에서는 차량궤도 인터페이스 해석을 위한 전략 모델(Vehicle Track Interface Strategic Model: VTISM)을 수립하였으며, VTISM 모델은 차량특성, 궤도특성 및 유지보수활동을 최적화함으로써 전체 운행비용의 절감 및 차량 및 궤도의 서비스시스템의 변화가 상위시스템에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. VTISM 모델은 차량특성, 차량 서스펜션, 차륜 및 차축설계, 열화, 마찰제어, 그라인딩 정책, 교통량, 궤도형상, 궤도강성, 레일특성, 열화 등을 입력하고 차량/궤도 상호작용, 균열 발생 및 성장, 궤도유지보수 등의 프로그램을 이용하여 종합적인 해석을 수행함으로써 궤도 및 레일의 수명, 차량승차감, 차륜수명 및 모니터링 정책 등 실제 차량 및 궤도의 운영에 필요한 필수적인 정보를 제시하고 있다. 현재 VTISM 모델의 개발은 WRISA를 주관으로 하여 AEA-Technology rail, Interfleet technology, Serco assurance, CANADA NRC, US TCI, Mehchester Metropolitan Univ. Birmingham Univ., Newcastle Univ. 및 Loughborough Univ.에서 컨소시엄 형태로 수행하고 있다.

Whole Life Rail Model(WLRM)¹¹⁾은 RSSB의 지원 하에 AEA Technology Rail에서 개발하고 있는 레일에서의 손상 발생 및 진전예측 모델로서, 결함의 발생, 성장에 대해 단계별 진전을 예측할 수 있다. 초기에는 해석의 어려움으로 인하여 실제 레일에서 발생하는 현상을 측정된 실험데이터를 회귀분석하여 모델식으로 이용하였으나, 최근에는 수학적, 해석적 방법을 이용하여 모델의 정확성을 높이고

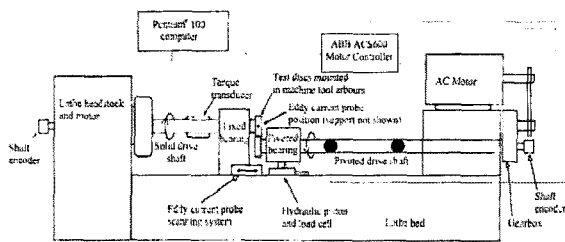


그림 7. Twin disc를 이용한 접촉피로시험기 개요도

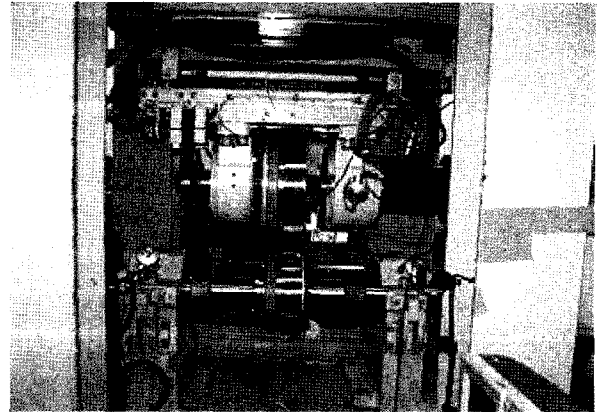


그림 8. RTRI RCF 시험 장비 및 마모시험 장비

있다.

Sheffield 대학에서는 차륜과 레일의 마모, RCF, 점착력 특성시험을 통하여 비운할 접촉상태에서의 균열성장 및 마모특성에 대한 연구¹²⁾등을 수행하고 있다.

미국에서는 FRA, AAR을 중심으로 하여 연구를 수행하고 있으며, 균열발생보다는 균열진전 메커니즘 분석 및 레일 안전성 평가에 관한 연구¹³⁾를 수행하였다. TTCI에서는 균열이 발생된 레일로 이루어진 시험노선에 시험차량을 지속적으로 운행함으로써 누적통과톤수에 따른 균열성장량 및 성장패턴을 측정하고 있으며, 또한 비파괴장비를 통한 균열탐지성을 평가함으로써 미처 발견되지 않은 균열에 의한 레일파괴가능성도 평가하였다. 이러한 결과를 바탕으로 하여 균열발생 및 성장에 관한 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

일본 RTRI에서는 Ishida 등이 Roller rig 시험기를 이용하여 윤활, 표면조도, 잔류응력 등이 레일손상에 미치는 영향을 분석¹⁴⁾, 레일의 파상마모를 줄이기 위하여 마찰완화제를 사용하는 방안 연구¹⁵⁾, 노후된 레일의 피로굽힘시험을 통한 CWR(continuous welded rail)의 사용수명예측에 대한 연구¹⁶⁾를 수행하고 있다. 또한 RTRI와 JR EAST를 중심으로 차륜-레일 접촉시험기를 활용한 차륜과 레일의 마모 특성 분석을 위한 실험을 지속적으로 수행¹⁷⁾하고 있으며, 차륜플랜지와 곡선부에서의 레일의 마모에 대한 공격각과 레일재료의 경도의 영향을 정량적으로 평가¹⁸⁾, 현장실험을 통하여 레일마모의 진행이 횡압과 공격각에 미치는 영

향을 분석¹⁹⁾ 등을 바탕으로 레일마모형상이 차량운동특성에 미치는 영향을 차량수행 시뮬레이션으로 평가하는 기법과 아울러 차륜과 레일의 마모진행을 예측하는 모델을 개발하고 있다.

3.4 국내 연구동향

차륜과 레일의 구름접촉에 의한 손상은 여러 가지 메커니즘(물리적, 화학적)이 동시에 작용하며, 현재까지 이론적으로 완전하게 해명되지 않은 마찰 및 마모, 피로현상에 의해 발생한다.

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 설치 기울기에 따른 접촉응력 또는 변위량의 변화 해석^{20,21)}, 차륜의 잔류응력의 변화를 고려한 수명평가와 잔류응력이 수명에 미치는 영향 평가²²⁾, 표면조직 검사, 파괴역학적 특성 및 현차시험을 통한 고속철도 차륜 담면에 발생하는 손상의 특성 분석²³⁾ 등이 있다.

레일의 피로수명에 관한 연구로는 단일 및 혼합모드하중하에서 레일강의 파괴조건 및 균열진전거동²⁴⁾, 일정폭 및 실제 하중이력에 준한 변동하중하에서 레일강의 피로수명 및 특성 평가²⁵⁾, 레일 용접부 피로수명 예측²⁶⁾, 궤도 구조 및 궤도상태를 고려한 노후레일 저부의 피로수명 평가²⁷⁾ 등이 있다. 레일의 구름접촉 피로수명에 관한 연구는, 레일 두부 상면과 게이지 코너 및 측면에 대한 미세조직 관찰, 경도변화 등을 고려한 고속철도 레일의 연마주기 제한²⁸⁾, 연속체 손상역학과 유한요소법을 이용한 레일 상단면의 셸링(shelling) 피로손상 해석²⁹⁾, 레일 표면균열의 응력확대계수 계산³⁰⁾, 차륜-레일 구름접촉에 의한 라체팅 현상 모델링³¹⁾ 등 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.

이밖에 차륜-레일 구름접촉에 의해 피로와 함께 발생하는 마모에 관한 연구로는 고속철도의 주행거리에 따른 차륜마모 측정 및 분석³²⁾, 동적거동해석 자료를 기초로 한 차륜 마모 시뮬레이션³³⁾, 곡선부주행시 차륜 플랜지 마모 특

성에 관한 수치해석적 연구^{34, 35)} 등 차륜의 마모에 대한 연구와 도시철도 차량의 운전모드에 의한 가감속 변화율에 따른 레일마모 현상 분석 등 레일의 마모에 대한 연구³⁶⁾가 있다.

4. 결론

RCF에 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 비용요소로 작용한다. 따라서 레일의 건전성을 유지하며 레일의 유지보수비용을 줄이기 위해서는 지속적인 연구를 통해 RCF에 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 등²⁶⁾에 관한 많은 연구가 수행되어야 할 필요가 있다. ♪

♣ 참고 문헌

1. Health and Safety Executive, "Train derailment at Hatfield - 17 October 2000 Second HSE interim report", Office of Rail Regulation, 2001.
2. Rail Safety & Standards Board, "Management and understanding of rolling contact fatigue", 2006.
3. UIC Code 712, "Rail defects", International Union of Railway, 2002.
4. J.W. Ringsberg, "Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation", International Journal of Fatigue, vol.23, 2001, pp.575-586.
5. K. Dang Van, G. Cailletet, B.F. Flavenot et al, "Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading", Biaxial and Multiaxial Fatigue, 1989, pp.459-478.
6. J.A. Bannantine, J.J. Comer, "Fundamentals of metal fatigue analysis", Prentice Hall, 1990.

7. 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.
8. D.Y. Jeong, "Analytical modelling of rail defects and its applications to rail defect management", U.S. Dept. of Transportation, 2003.
9. CHERMEC, "Trennial report 2006", Chalmers University of Technology, 2006.
10. J. Jaiswal, S. Blair and S. Iwnicki, "A system approach to evaluating rail life", <http://www.railtechnologyunit.com>
11. 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.
12. 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.
13. D.Y. Jeong, "Progress in rail integrity research", U.S. Dept of Transportation, 2001.
14. H. Chen, M. Ishida, "Influence of rail surface roughness formed by rail grinding on rolling contact fatigue", *QR of RTRI*, Vol. 47, No. 4, 2006.
15. 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.
16. T. Deshimaru, H. Kataoka and N. Abe, "Estimation of service life of aged continuous welded rail", *QR of RTRI*, vol. 47, No. 4, 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. M. Takikawa, Y. Iriya, "Laboratory simulations with tein-disc machine on head check", *Institute of Material Engineering Austral asia*, 2006
20. 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
21. 김청균, 김기환, "고속전철용 레일-휠 접촉에서 응력분포에 관한 유한요소해석", *한국윤활학회지* 제13권 제3호, 1997. 9, pp. 93 ~ 101
22. 김청균, "레일-휠의 접촉면 경사도에 따른 응력-변위량의 거동특성에 관한 연구", *한국철도학회지* 제7권 제3호, 2004. 9, pp. 70 ~ 76
23. 서정원, 구병춘, 최재봉, 김영진, "잔류응력 변화를 고려한 철도차량 차륜의 접촉피로 수명평가", *대한기계학회논문집 A권* 제28권 제9호, 2004. 9, pp. 1391 ~ 1398
24. 권석진, 이동형, 서정원, 권성대, "비파괴적 표면조각검사법과 파괴역학 특성 에 따른 고속철도용 차륜 담면의 손상 평가", *대한기계학회논문집A권* 제31권 제7호, 2007. 7, pp. 756 ~ 763
25. 김정규 · 이종선 · 김철수, "단일 및 혼합모드 하중하에서의 레일강의 파괴 조건 및 피로균열진전거동", *대한기계학회논문집A권* 제23권 제6호, 1999. 6, pp. 1039 ~ 1047
26. 김철수 · 김정규, "일정 및 변동하중하의 레일강이 피로특성" *대한기계학회 논문집A권* 제25권 제4호, 2001. 4, pp. 654 ~ 661
27. 김만철, 김진성, 한상철, "슬래브계도상의 레일 용접부 피로수명 예측", *한국 철도학회지* 제4권 제4호, 2001. 12, pp. 62 ~ 70
28. 박용걸, 성덕룡, 박홍기, 공선용, "현장측정을 통한 노후레일의 휨 피로수명 평가", *한국철도학회 논문집* 제11권 제3호, 2008. 6, pp. 317 ~ 325
29. 김만철, 강태구, "레일유지관리 효율화를 위한 경부 고속선 레일 연마 기준 (안)", *한국철도학회 논문집* 제11권 제3호, 2008. 6, pp. 272 ~ 279
30. 강성수, "손상역학에 의한 레일의 구름접촉피로 연구", *한국마린엔지니어링 학회지* 제32권 제6호, 2008. 9, pp. 931 ~ 937
31. 전현규, 유원희, "RCF에 의한 횡방향균열 응력확대계수 계산", *한국자동차공 학회* 2007년 춘계학술대회 논문집 Volume IV, 2007. 6, pp. 1977 ~ 1983
32. 구병춘, "차륜-레일 구름접촉에 의한 라체팅 모델링", *한국철도학회 논문집* 제 11권 제3호, 2008. 6, pp. 311 ~ 316
33. 허현무, 유원희, "고속철도 차륜담면의 마모 특성에 관한 연구", *한국철도학회 논문집* 제8권 제5호, 2005. 10, pp. 477 ~ 482
34. 최정훈, 문태선, 김기환, *한동철(2003)*, "고속철도 차량의 차륜과 레일간의 마 모예측," *한국철도학회 추계학술대회논문집*, pp.369-376.
35. 이희성, 강부병(2006), "고속열차 차륜 플랜지 마모," *한국윤활학회 논문집*, Vol.22, No.1 Feb. 2006, pp.33-39.
36. 이희성, 곡선부 주행 차량의 마모특성에 관한 연구, *한국철도학회 논문집* 제 10권 제6호, 2007. 12, pp. 772 ~ 778
37. 하관용, 김희식, "가속도/감속도 변화율에 따른 레일마모 현상에 관한 연구", *한국철도학회 논문집* 제10권 제5호, 2007. 10, pp. 607 ~ 612
38. 이희성, "차륜/레일 시스템 인터페이스", *한국철도학회지* 제8권 제3호, 2005. 9, pp. 40 ~ 44