

# 레일손상에 의한 윤중증가를 고려한 표면균열 성장예측

## Prediction of Surface Crack Growth Considering the Wheel Load Increment Due to Rail Defect

전현규<sup>1,✉</sup>, 최진유<sup>1</sup>, 나성훈<sup>2</sup>, 유원희<sup>3</sup>  
 Hyun Kyu Jun<sup>1,✉</sup>, Jin Yu Choi<sup>1</sup>, Sung Hoon Na<sup>2</sup> and Won Hee You<sup>3</sup>

1 한국철도기술연구원 기술전략실 (R&D Strategy Division, Korea Railroad Research Institute)

2 한국철도기술연구원 감사실 (Audit & Inspection Division, Korea Railroad Research Institute)

3 한국철도기술연구원, 고속철도인터페이스연구실 (High Speed Railroad Interface Research Division, KRRI)

✉ Corresponding author: hkjun@krri.re.kr, Tel: 031-460-5228

Manuscript received: 2011.4.26 / Accepted: 2011.6.15

*Prediction of a minimum crack size for growth, which is defined as a crack size that grows fast enough to keep ahead of its removal by contact wear and periodic grinding, is the most demanding work to prevent rail from fatigue failure and develop cost effective railway maintenance strategy. In this study, we investigated the wheel load increment due to a rail defect during a train ran over it, and its effect on the minimum crack size for growth. For this purpose, we developed simulation software based on the Fletcher and Kapoor's "2.5D" model and measured wheel load increment during a train passed over a defect. A maximum contact pressure and contact patch size were calculated by 3D FEM and crack growth analyses were performed by varying two of dominant contact contributors; surface friction coefficient(0.1, 0.2, 0.3 and 0.4) and crack aspect ratio. The minimum crack sizes for growth were calculated from 0.29 to 1.44mm depending on the contact conditions. They were decreasing with increasing surface friction coefficient and decreasing with crack aspect ratio(a/b).*

Key Words: Rolling Contact Fatigue (구름접촉피로), Rail Surface Inclined Crack (레일표면경사균열), Crack Growth (균열 성장), Fracture Mechanics (파괴역학), Green's Function (그린함수)

### 기호설명

$a_c$  = critical minimum crack size for growth in depth  
 $c_x, c_y$  = Hertzian elliptical contact long and short axis half-length  
 $da_c$  = crack growth rate per loading cycle  
 $da/dN$  = crack growth rate  
 $da_w$  = wear rate per loading cycle  
 $g_N^f(X)$  = crack line Green's functions  
 $p(x)$  = Hertzian contact normal pressure distribution  
 $q(x)$  = Hertzian contact tangential traction distribution

$\text{sgn}(\tau)$  = sign function = 1 if  $\tau > 0$ , = 0 if  $\tau = 0$  and = -1 if  $\tau < 0$   
 $\Delta K_{th}$  = threshold stress intensity factor range  
 $\theta$  = angle between the crack and the normal to the edge  
 $\zeta$  = local coordinate normal to the crack plane  
 $\eta$  = local coordinate tangential to the crack plane  
 $\mu_c$  = crack face friction coefficient  
 $\mu_s$  = surface friction coefficient  
 $\sigma_{cwt}$  = thermal stress from temperature difference of continuous welded rail  
 $\sigma_{x,y,z}$  = distribution of stress along the coordinates  
 $\sigma_c(\eta, \theta, e)$  = distribution of stress normal to the crack

- $\sigma_{\text{eff}}$  = effective normal stress to the crack line
- $\tau_{\text{eff}}$  = shear stress along the crack face
- $\tau_{\eta c}(\eta, \theta, e)$  = distribution of shear stress to the crack
- $\tau_{\eta c \text{eff}}$  = effective shear stress along the crack face

### 1. 서론

철도레일유지보수업무에서 최소조치(minimum action)는 레일에서 손상이 발견될 경우 관리자가 차량의 주행안전성 확보를 위해 취해야 하는 속도 제한, 레일보수 또는 교체 등 적어도 반드시 수행해야 하는 최소한의 행위로 정의된다. 철도레일은 육안, 초음파 또는 와전류탐상 등의 비파괴 장비로 정기적인 검사가 이루어지고 있으며, 손상이 발견되면 즉시 유지보수를 수행해야 하는 상황인지, 향후 손상의 진전 상황을 모니터링 하며 유지보수를 수행해도 되는 상황인지 판단 후 유지보수 계획을 수립하고 있다. 이를 위하여 각국에서는 최소조치규칙(minimum action rule: MAR)<sup>1</sup>에 대한 기준을 만들고 이에 따라 조치를 취하고 있으나, 이러한 MAR 은 오랜 운행경험에 의존하여 각 철도 운영회사에서 자체적으로 만든 것으로 동일한 레일손상에 대해 서로 다른 수준의 조치를 요구하고 있다. 이러한 배경은 MAR 을 수립할 때 손상진전예측을 위한 이론적 해석 및 실험적 연구가 진행되지 않았기 때문이며, 이를 위한 연구가 최근에 들어 수행되고 있다.

구름접촉피로(rolling contact fatigue: RCF)에 의한 피로손상<sup>2,3</sup>은 레일표면에서 빈번히 발생하는 손상으로 차륜과 레일의 접촉, 마모, 윤활, 운행환경, 주기적 그라인딩 등 다양한 파라미터에 영향을 받기 때문에 일정한 실험조건을 유지하기 어렵고, 또한, 오랜 기간에 걸쳐 진행되기 때문에 실험적 방법을 이용하기 어렵다. 따라서 해석적 방법의 연구가 수행되고 있으나, 아직까지 명확한 해석모델이 제시되어 있지 않은 상황이다. 국외에서는 Kaneta<sup>4</sup> 등이 체적력(body force)법을 이용하여 구름접촉하에서 경사균열이 존재하는 반 무한판에서의 응력확대계수(stress intensity factor: SIF) 사이클을 계산한 바 있다. 이를 위하여 균열형상의 요소망을 만들고 요소망에서의 응력을 계산한 후 그린함수를 이용하여 수치적분을 하였다. Bogdanski<sup>5</sup> 등은 3차원 유한요소모델(finite element model)을 이용하여 레일면에 발생하는 스쿼트(squat) 균열에 대한 SIF 사

이클을 계산하여 2 차원 해석보다 실제 레일의 조건에 가까운 해석결과를 얻은 바 있다. 한편 국내에서는 김병수<sup>6</sup> 등이 균열면의 마찰을 고려하여 무한평판에 존재하는 수직균열에 대한 모드 II 균열진전해석을 수행한 바 있으며, 최하영<sup>7</sup> 등은 차축의 변형이 차륜/레일의 접촉에 미치는 영향을 분석하기 위하여 3 차원 유한요소모델을 이용하여 접촉해석을 수행한 바 있다.

Fig. 1 은 균열성장을 고려한 유지보수활동을 나타낸 개념도로써 균열은 발생 후 일정한 크기가 되어야 발견되며, 이 시점에서부터 안전여유를 고려한 최대허용균열(maximum allowable crack)까지 성장하는 시간이 유지보수를 수행할 수 있는 허용시간(action timescale)으로 주어진다. 이러한 허용시간의 크기는 비용적으로 유리한 유지보수전략을 수립하는데 중요하며, 이를 위해서는 균열의 성장속도를 정확히 예측하는 것이 필요하다. 미소 균열이 발생하면 균열의 성장속도와 마모속도(접촉마모+그라인딩 마모)는 서로 경쟁관계에 놓인다. 균열성장속도가 크면 균열은 계속적으로 성장하게 되나, 반대로 마모속도가 크면 균열은 제거된다. 따라서 이러한 일련의 과정을 모델링하여 균열의 성장을 예측할 필요가 있다. RCF 에 의한 균열의 발생 및 성장은 3 단계<sup>3</sup>로 나뉜다. 1 단계는 지속적인 소성변형으로 인한 라체팅(ratcheting) 현상으로 균열이 생성되는 단계이나 균열의 크기(0.1 mm 이하)가 매우 작기 때문에 실제 균열성장속도를 측정하기는 어렵다. 2 단계는 주로 접촉하중에 의해서 균열이 레일표면과 약 30°의 경사를 이루며 성장(0.1->10~20 mm)하는 단계로 레일의 유지보수 관점에서 중요한 단계이다. 3 단계는 레일의 굽힘모멘트에 의해 균열이 수직으로 분기하여 성장하는 단계로 성장속도가 빠르기 때문에 레일보강 또는 교체가 필요한 단계이다.

본 연구는 2 단계 균열성장속도를 예측하기 위한 것으로 초기 균열을 가정한 후 균열에 가해지는 하중을 모델링하여, 향후 균열이 얼마나 빨리 성장할 것인가를 예측하는데 목적이 있다. 이를 위해서 Fletcher<sup>8</sup> 등이 제안한 “2.5D” 모델을 바탕으로 균열성장 소프트웨어를 개발하였으며, 표면마찰계수, 균열 형상비에 대해 파라미터 해석을 수행하고 지속적인 균열의 성장이 시작되는 최소균열크기를 계산하였다. 또한 열차운행 시나리오를 정의하고 시나리오에 따른 허용시간을 계산하였다.

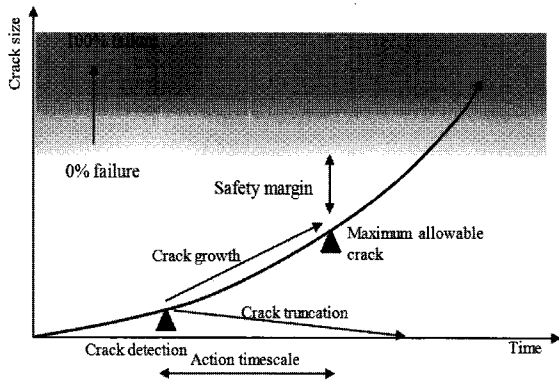


Fig. 1 Schematic of crack growth and the effect of minimum actions<sup>1</sup>

## 2. 이론적 배경

### 2.1 접촉피로에 의한 균열성장모델

Fig. 2 는 차륜/레일 접촉손상 해석을 위한 모델로써 균열성장해석에 영향을 주는 여러 인자들 중 상대적으로 지배적인 영향을 미치는 인자들을 나타낸 것이다. 레일표면에는 차륜과 레일의 접촉에 의한 수직력 및 견인력이 작용하며, 레일의 제조 및 사용과정에서 발생하는 잔류응력, 장대레일의 운행온도와 부설온도의 차이에서 발생하는 열응력이 작용한다. 균열은 반원 또는 반타원 형태로 레일 표면에 존재하며 표면과 30°의 경사를 이루고 있다.

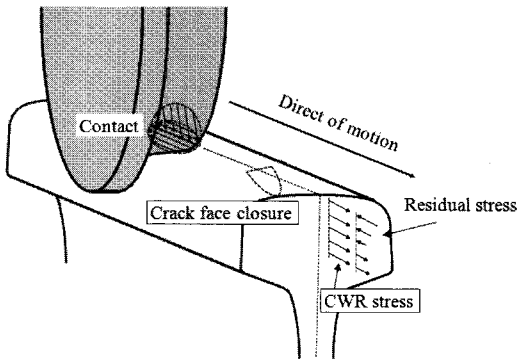


Fig. 2 Wheel and rail contact during a wheel passes over a cracked rail

Li<sup>9</sup> 등의 연구에 의하면 선형탄성파괴역학 (Linear Elastic Fracture Mechanics: LEFM)이 적용가능한 균열의 크기는 약 0.1 mm 이상으로 본 연구에

서 대상으로 하는 균열크기는 이보다 크므로 LEFM 의 적용이 가능하다고 판단하였으며, 균열 성장 예측에 LEFM 을 적용하였다. RCF 에 의한 균열의 진전은 균열 열림모드(opening mode)와 균열 미끄러짐 모드(sliding mode)가 혼합된 모드로 나타난다. RCF 하에서의 SIF 사이클은 균열의 성장을 계산하기 위하여 필요하며, 체적력(body force)법,<sup>4</sup> 유한요소법(finite element method),<sup>5</sup> 그린함수법(Green's function method),<sup>8</sup> 경계요소법(boundary element method)<sup>10</sup> 등 다양한 방법이 제시되어 있으나, 균열성장해석과 같이 수천만 사이클의 해석을 위해서는 계산시간이 상대적으로 매우 짧은 그린함수법과 같은 수치적분 방법이 적절하다.

Fig. 3 은 RCF 하에서 표면균열의 성장을 해석하기 위한 해석모델로써 Fig. 2 의 차륜/레일 접촉을 레일표면에 경사균열을 정의하고 이 위를 헤르츠 접촉(Hertz contact)으로 이상화한 접촉패치가 지나가는 형태로 모델링 한 것이다. 접촉패치는 타원(elliptical)형으로 작용하중은 다음과 같다.

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - (x/c_x)^2 + (y/c_y)^2} \quad (1)$$

$$q(x) = \mu_s \cdot p(x)$$

한편, 균열면에 작용하는 레일의 잔류응력은 레일 표면에서부터의 깊이에 따라 변하나, 레일의 온도차이에 의한 열응력은 레일 깊이와 무관하게 일정하게 작용하는 것으로 모델링 하였다.

### 2.2 균열면 마찰거동 모델

균열면과 균열면의 마찰에 의한 균열거동 메카니즘을 고려하기 위하여 Kaneta<sup>2</sup> 등이 제시한 모드 II 에 대한 균열성장모델을 Fig. 4 와 같이 고려하였다. 이를 위하여 먼저 균열면에서의 접촉응력  $\sigma_c$ , 열응력  $\sigma_{cwr}$  및 잔류응력  $\sigma_r$  을 각각 계산하고, 이를 응력성분 ( $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ ) 별로 합산한 후 이를 균열면에 대해 회전시켜 수직응력,  $\sigma_{\zeta}$  과 전단응력,  $\tau_{\eta\zeta}$  을 계산하였다. 또한 식(2)와 같이 모드 I 의 SIF 는 균열이 닫히면 0 이 되도록 수직유효응력,  $\sigma_{\zeta eff}$  를 계산하였으며, 식(3)과 같이 모드 II 의 SIF 는 균열이 닫히면 균열면의 마찰력을 비교하여 전단유효응력,  $\tau_{\eta\zeta eff}$  를 계산하였다.

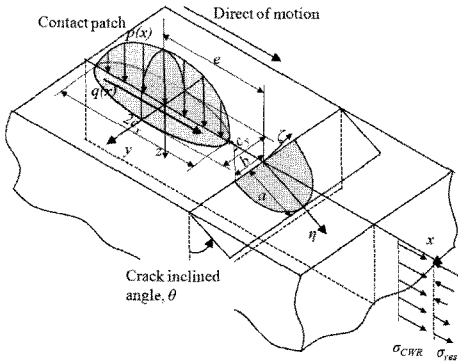


Fig. 3 Rail surface inclined crack growth analysis model under wheel and rail contact<sup>8</sup>

$$\sigma_{eff} = \max[\sigma_s, 0] \tag{2}$$

$$\tau_{\eta eff} = \begin{cases} 0 & , |\tau_{\eta s}| \leq |\tau_{eff}| \ \& \ \sigma_s < 0 \\ \tau_{\eta s} + \tau_{eff} & , |\tau_{\eta s}| > |\tau_{eff}| \ \& \ \sigma_s < 0 \\ \tau_{\eta s} & , \sigma_s \geq 0 \end{cases} \tag{3}$$

여기서,  $\tau_{eff}$  는 균열면에서의 전단응력으로 정의되며, 균열이 열리면 전단응력이 발생하지 않으나, 균열이 닫히면 수직하중에 균열마찰계수를 조합한 형태로 발생한다. 이때 전단응력 방향은 접촉하중에 의한 전단응력  $\tau_{\eta s}$ 와 반대방향으로 작용한다.

$$\tau_{eff} = -\mu_c \sigma_s \operatorname{sgn}[\tau_{\eta s}] \tag{4}$$

이때 레일표면 마찰계수  $\mu_s$  와 균열면 마찰계수  $\mu_c$  의 크기는 동일하다고 가정하였다.

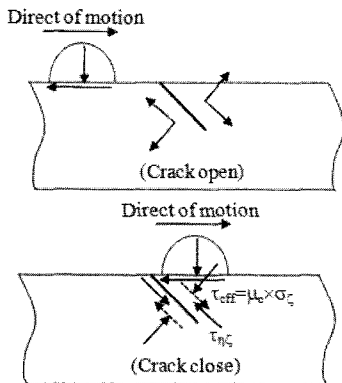


Fig. 4 Mode II crack growth behavior considering the crack face lock mechanism

### 2.3 SIF 계산을 위한 그린함수

Fig. 5 는 Rooke<sup>11</sup> 가 제시한 RCF 하에서 경사균열의 SIF 계산을 위한 그린함수법으로 균열팁에서의 응력확대계수,  $K_N$  은 균열선단에서 균열팁까지의 적분으로 다음과 같이 정의된다.

$$K_N = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \sum_f \int_0^a \sigma(\eta) g_N^f(\eta) d\eta \tag{5}$$

$$g_I^p = \frac{1}{\sqrt{1-X^2}} \sum_{n=0}^{N_0} p_n^I X^n$$

$$g_{II}^q = \frac{1}{\sqrt{1-X^2}} \sum_{n=0}^{N_0} q_n^{II} X^n$$

$$g_{II}^p = \sqrt{1-X^2} \sum_{n=0}^{N_0} p_n^{II} X^n$$

$$g_I^q = \sqrt{1-X^2} \sum_{n=0}^{N_0} q_n^I X^n$$

여기서,  $N=I,II$ ,  $f=p,q$  이며,  $\sigma(\eta)$  은 균열면에서의 총 조합응력이다.  $p,q$  는 각각 균열에 수직 및 수평을 나타내는 첨자이며  $X$  는  $\eta/a$  로 정의된다. 접촉하중에 따른 균열면에서의 응력은 Engineering Science Data<sup>12</sup>에서 제시한 식을 이용하였다.

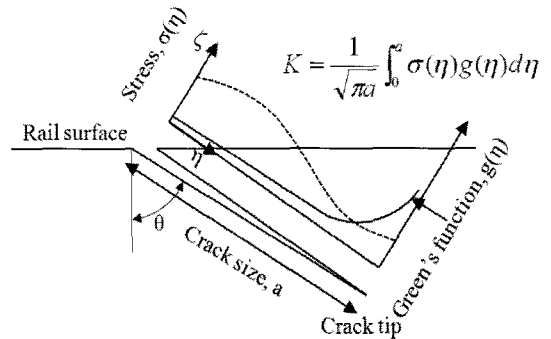


Fig. 5 Green's function for SIF calculation at crack tip<sup>11</sup>

### 2.4 최소균열크기 계산절차

Fig. 6 은 접촉마모를 고려한 지속적 성장을 위한 최소균열크기를 계산하는 절차로 균열은 매 접촉사이클 마다 접촉하중에 의한 성장 및 마모에 의한 제거과정을 반복한다. 따라서 접촉에 의한 사이클당 균열성장량  $da_w$  와 마모량  $da_m$  를 계산하여 비교하면 향후 균열이 성장할지 또는 제거될지 판단할 수 있다. 만약  $da_w > da_m$  이면 균열이 제거된다는 것을 의미하므로 초기균열이 지속적 균열성

장을 하기에 충분히 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 경우에는 초기균열의 크기를 1% 크게 가정하고 지금까지의 절차를 반복한다. 이와 같은 과정을 균열이 지속적으로 성장하는 크기를 찾을 때까지 반복한다. 이러한 과정은 통상적으로 수백만회의 계산이 필요하므로 수작업으로 수행하기는 불가능하며, 이를 위하여 손상진전 시뮬레이션 프로그램 Raildoctor를 개발하였다.

Raildoctor는 RCF에 의한 경사균열성장해석 소프트웨어로 해석범위는 다음과 같다. 소프트웨어의 검증은 타논문<sup>13</sup>에서 자세히 설명하였다.

- 작용하중
  - 접촉하중, 잔류응력, 열응력
- 균열형상
  - 긴 슬롯형 균열, 반원균열, 반타원균열
- 마모
  - 접촉마모, 주기적 그라인딩 마모
- 해석모델
  - Twin disc 모델, 차륜/레일 접촉모델
- 균열성장곡선 DB
- 열차운행시나리오

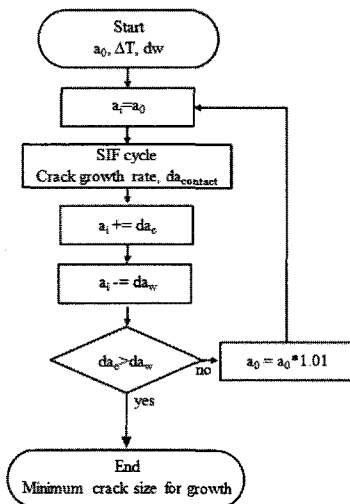


Fig. 6 Procedure for calculating the minimum crack size for growth considering contact wear

### 3. 균열성장에 측

#### 3.1 레일손상에 의한 윤중변동 측정

차량이 고속으로 레일을 지나갈 때 레일표면에

손상이 있으면 표면의 불균일로 인해 윤중의 변동이 발생한다. 윤중의 변동은 차량속도 및 표면상태의 함수로 균열에 가해지는 하중이 증가하므로 균열성장속도가 빨라진다. 본 연구에서는 표면손상 개소에서 윤중변동율을 측정하기 위하여 Fig. 7과 같이 KTX 차량이 표면손상개소 위를 고속(약 300 km/h)으로 통과할 때 윤중을 측정하였다. 이를 위하여 고속주행이 가능한 경부고속철도 오송기지 인근 직선구간을 측정위치로 하고 표면손상이 발생한 레일의 위치를 선정하였다. 손상개소의 형태는 타원형에 가까우며 최심점에서의 깊이는 0.05 mm, 너비는 35 mm이다. 표면손상에 따른 윤중변동분석을 위해 총 6개소를 1 m 간격으로 측정하였으며, 손상 위치(Ch2)는 차량 진행방향에서 두 번째 측정점이다. 하중측정을 위한 샘플링 주기는 10 kHz이며, 1 kHz 로패스필터(low pass filter)를 사용하였다.

Fig. 8은 약 300 km/h로 운행중인 KTX가 손상개소를 통과할 때 기관차 차륜에서의 윤중변동율을 통계처리한 것으로써 손상개소에 설치한 센서(Ch2)로부터 측정된 윤중과 손상으로부터 가장 먼

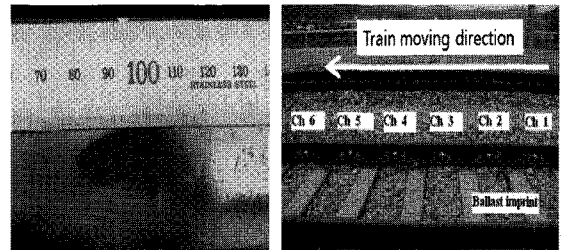


Fig. 7 Configuration of a rail surface defect and wheel load increment measurement test setup

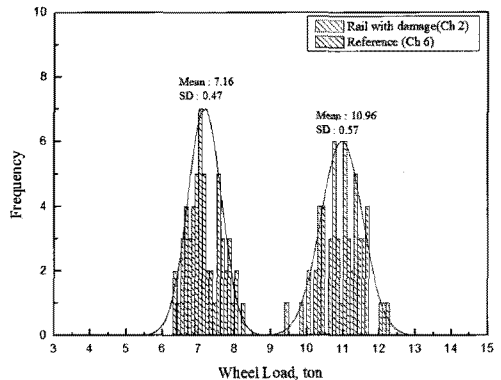


Fig. 8 Dynamic wheel load increment due to the rail surface defect

개소의 센서(Ch6)로부터 측정된 윤증을 비교한 것이다. 손상에 영향을 받지 않은 상태에서의 윤증은 평균 70.2 kN 이었으며, 손상개소에서 윤증은 107.4 kN 으로 측정되어 레일의 손상에 의해 윤증이 약 1.53 배 증가한 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 일본 JR<sup>14</sup> 에서 측정된 일반선에서의 윤증 변동율 2.5~3.0 보다는 작은 값이나, 고속선의 레일 품질을 고려하면 타당한 것으로 판단할 수 있다.

**3.2 차륜/레일 접촉패치크기 계산**

균열성장해석에 필요한 헤르츠접촉 하중의 크기와 영역은 KTX 차륜과 UIC60 레일의 접촉을 3차원 유한요소해석하여 계산하였다. Fig. 9 는 해석 모델로써 8 절점 사각요소(8 node brick element)를 사용하였으며, 접촉부에서의 요소망 크기는 약 1 mm, 접촉부가 아닌 곳에서의 요소망은 크게 모델링하여 해석의 정확성을 향상하고 해석에 소요되는 시간을 단축시켰다. 차륜과 레일의 접촉은 Largange 법을 이용하였으며, 마찰계수는 0.3 을 적용하였다. 해석은 ABAQUS ver. 6.7.1<sup>15</sup> 을 이용하였다.

작용하중은 앞서 측정된 최대 평균윤증(107.4 kN)이 지속적으로 균열에 작용한다고 가정하고 계산하였다. 계산결과 최대 1279 MPa 의 접촉응력이 발생하였으며, 접촉패치의 크기는 장축방향 반경,  $c_x=6.50$  mm, 단축방향 반경,  $c_y=5.54$  mm 였다.

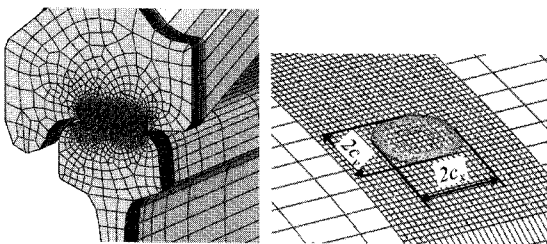


Fig. 9 Wheel/rail contact analysis model

**3.3 균열성장해석**

Table 1 은 본 연구에서 수행한 해석조건으로써 Dubourg<sup>16</sup> 등의 측정결과에 의하면 레일표면에서의 마찰계수는 건조(dry)조건=0.4, 물(water)조건=0.1, 기름(oil)조건=0.02 이므로, 이를 고려하여 표면마찰계수를 0.02, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 한편, 균열형상비(a/b)는 초기 균열형상비가 타원형(0.5)에서 균열이 진전함에 따라 원형(1.0)으로 변하는 것을 고려하여 0.5 와 1.0

을 대상으로 하였다. 해석수행 중 다른 파라미터는 상수로 적용하였다. 접촉에 의한 마모는 국외의 해석사례<sup>17</sup> 를 참고하여 1.0 nm/cycle 로 가정하였으며, 레일면과 균열면의 경사는 30° 로 가정하였다. 레일의 잔류응력분포는 국외에서 측정된 결과<sup>17</sup> 를 이용하였으며, 열응력 계산을 위한 온도는 중립온도와 가동온도의 차이를 -20 °C 로 가정하였다. 해석에 사용된 균열성장곡선은 다음과 같다.

$$\Delta K_{eq} = \sqrt{\Delta K_{\sigma}^2 + \left[ \left( \frac{614}{507} \right) \Delta K_t^{3.21} \right]^{3.74}}, [MPa\sqrt{m}] \quad (6)$$

$$\frac{da}{dN} = 0.000507(\Delta K_{eq}^{3.74} - \Delta K_{th}^{3.74}), [nm/cycle] \quad (7)$$

Table 1 Inputs for the parameter analysis

Case	P <sub>0</sub> MPa	c <sub>x</sub> mm	c <sub>y</sub> mm	μ <sub>s</sub>	a/b
1	1279	6.50	5.54	0.02	1.0
2	1279	6.50	5.54	0.10	
3	1279	6.50	5.54	0.20	
4	1279	6.50	5.54	0.30	
5	1279	6.50	5.54	0.40	
6	1279	6.50	5.54	0.02	0.5
5	1279	6.50	5.54	0.10	
6	1279	6.50	5.54	0.20	
7	1279	6.50	5.54	0.30	
8	1279	6.50	5.54	0.40	

Fig. 10 은 최소균열크기와 표면마찰계수의 관계로써 표면마찰계수가 커질수록 최소균열크기가 작아졌다. 이는 마찰계수가 커질수록 견인력이 커지고 균열의 진전을 위한 하중이 커지기 때문에 더 작은 균열에서도 성장이 발생한 것으로 해석할 수 있다. 한편 균열형상비(a/b)가 작아질수록 최소균열크기도 작아졌으며, 이는 동일한 깊이라 할지라도 타원형 균열의 면적이 더 크기 때문에 더 쉽게 균열진전이 이루어진 것으로 볼 수 있다. 최소성장 균열크기는 접촉조건에 따라 0.29~1.44 mm 까지 분포하였다. Fig. 11 은 초기균열크기 1.5 mm 일 때 균열성장속도를 비교한 것으로 타원형(a/b=0.5) 균열의 진전속도가 원형(a/b=1.0) 균열보다 상대적으로 빨랐다. 한편 최소균열크기 경우와는 반대로 마찰계수가 작을 때 균열성장속도가 빨라졌으며 이리

한 이유는 견인력이 커질수록 큰 균열에서 나타나는 균열단합 효과가 커져 균열의 성장을 방해하는 것으로 생각된다.

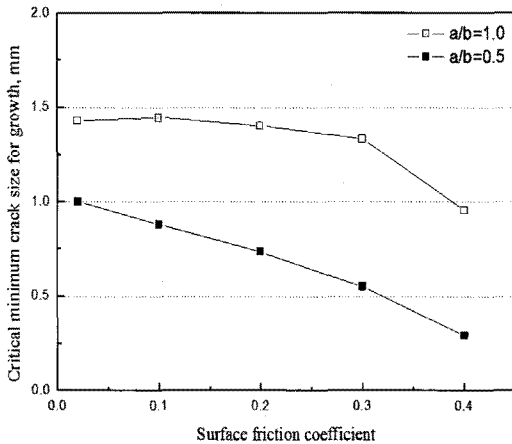


Fig. 10 The change of critical minimum crack size for growth with the surface friction coefficient

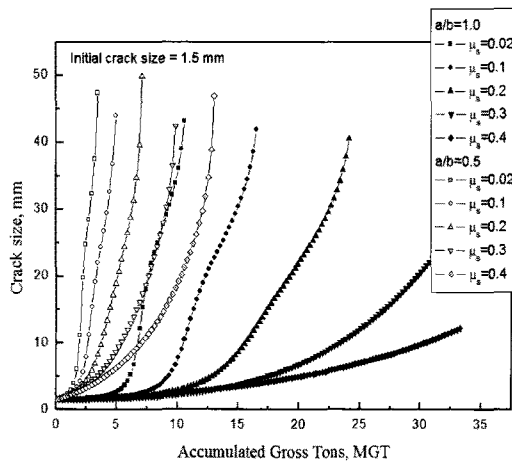


Fig. 11 The change of crack growth rate with the surface friction coefficient

따라서 레일표면검사 중 100% 신뢰도로 발견할 수 있는 최소균열의 크기가 1.5 mm 라고 가정하고 안전여유를 고려한 최대 허용균열크기가 20 mm 라고 가정하면 a/b=1.0,  $\mu_s=0.3$  의 경우 유지보수 없이 약 30 MGT(million gross tons)의 운행이 가능하며, 이는 열차운행 시나리오가 1 일 63 회, 1 편성 총 누적톤수가 504 ton 이라고 할 때 허용균열 길이가까지 도달하는데 약 940 일로 주어진다. 따라서 허용시간(940 일) 이내 레일의 보수 및 보강 또

는 교체작업을 수행하면 급속한 레일의 파괴를 방지할 수 있다고 판단할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 최소임계균열크기 및 균열성장속도를 예측하기 위하여 차륜/레일의 접촉에 영향을 미치는 주요 파라미터들(표면마찰계수, 균열의 형상비)를 변화시키면서 지속적인 균열성장을 위한 최소균열크기의 변화를 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최소성장균열크기는 0.29 ~ 1.44 mm 로 계산되었다.
- (2) 균열형상비가 작아질수록 최소균열의 크기도 작아지며, 반대로 표면마찰계수가 커질수록 최소균열의 크기는 작아졌다. 따라서 최소성장균열 크기보다 더 큰 균열이 발견될 경우에는 균열의 성장가능성이 있으므로 지속적인 모니터링이 필요하다.

한편, 본 연구에서의 균열성장해석은 실제보다 가혹한 시나리오를 토대로 해석을 수행한 것으로 실제 운행조건 및 접촉조건에 따라서는 균열성장속도가 느려질 수 있다. 따라서 좀 더 실제조건과 유사한 해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 연구가 추가적으로 필요하다.

- (1) 본 연구에서는 접촉패치가 균열에 가장 큰 영향을 미치는 위치를 계속적으로 통과한다고 가정했으나, 차량의 사행동으로 인한 접촉패치와 균열의 수평방향 옵셋에 따라 균열에 작용하는 응력의 크기는 작아지므로 이를 고려하면 균열의 성장속도가 느려질 것으로 생각된다.
- (2) 접촉하중으로 기관차 차륜의 윤증을 반복적으로 작용하였으나, 일반적으로 기관차의 윤증이 승객차의 윤증보다 크므로 실제 차량편성에 맞게 기관차와 승객차의 윤증을 작용하여 해석할 필요가 있다.
- (3) 균열성장해석에 사용한 균열성장곡선은 일반 레일강에 대한 것으로 레일두부열처리 등 재료 고유의 특성을 고려하지 못한다. 따라서 국내 레일강의 재료적 특성을 고려할 수 있는 재료물성치의 확보가 필요하다.

#### 참고문헌

1. Innotrack Guideline, "Recommendation of and

- scientific basis for minimum action rules and maintenance limits,” *Innotrack Report No. D4.2.6*, 2006.
2. Li, Z., Zhao, X., Esveld, C., Dellevoet, R. and Molodova, M., “An investigation into the causes of squats—Correlation analysis and numerical modeling,” *Wear*, Vol. 265, No. 9-10, pp. 1349-1355, 2008.
  3. Ringsberg, J. W. and Bergkvist, A., “On propagation of short rolling contact fatigue cracks,” *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 26, No. 10, pp. 969-983, 2003.
  4. Kaneta, M. and Murakami, Y., “Propagation of semi-elliptical surface cracks in lubricated rolling/sliding elliptical contacts,” *ASME Journal of Tribology*, Vol. 113, No. 2, pp. 270-275, 1991.
  5. Bogdanski, S. and Brown, M. W., “Modeling the three-dimensional behavior of shallow rolling contact fatigue cracks in rails,” *Wear*, Vol. 253, No. 1-2, pp. 17-25, 2002.
  6. Kim, B. S. and Moon, B. Y., “Crack face friction effects on mode II stress intensities for a surface cracked coating in two-dimensional rolling contact,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 159-167, 2005.
  7. Choi, H. Y., Lee, D. H., You, W. H. and Lee, J. S., “Wheel-rail contact analysis considering the deformation of wheel and axle,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 8, pp. 20-27, 2010.
  8. Fletcher, D. I. and Kapoor, A., “Rapid method of stress intensity factor calculation for semielliptical surface breaking cracks under three-dimensional contact loading,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 220, No. F3, pp. 219-234, 2006.
  9. Li, Y., Kang, G., Wang, C., Dou, P. and Wang, J., “Vertical short-crack behavior and its application in rolling contact fatigue,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 7, pp. 804-811, 2006.
  10. Akama, M. and Mori, T., “Boundary element analysis of effects of crack face friction and trapped fluid on rolling contact fatigue cracks,” *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 46, No. 4, pp. 231-237, 2005.
  11. Rooke, D. P., Rayaprolu, D. B. and Aliabadi, M. H., “Crack line and edge green’s functions for stress intensity factors of inclined edge cracks,” *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 15, No. 5, pp. 441-461, 1992.
  12. Engineering Science Data Unit, “Contact phenomenon III : Calculation of individual stress components in concentrated elastic contacts under combined normal and tangential loading,” *IHS Report No. 85007*, 1994.
  13. Jun, H. K. and Seo, J. W., “Experimental and analytical study on the fatigue crack growth under rolling contact fatigue,” *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Spring Conference*, pp. 1539-1540, 2011.
  14. Smith, R. A., “Hatfield Memorial Lecture 2007, Railways and materials: synergetic progress,” *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 35, No. 7, pp. 505-513, 2008.
  15. SIMULIA, “ABAQUS 6.7.1 User’s manual,” 2008.
  16. Dubourg, M. C. and Lamacq, V., “A predictive rolling contact fatigue crack growth model: Onset of branching, direction and growth—Role of dry and lubricated conditions on crack patterns,” *Journal of Tribology*, Vol. 124, No. 4, pp. 680-688, 2002.
  17. Kapoor, A. and Fletcher, D. I., “The effect of residual stress on contact stress driven crack growth in rail - the model,” *Newrail Report No. WR061106-2*, p. 11, 2006.