

# 주기적 마모를 고려한 레일표면 경사균열 진전해석

## Rail surface inclined crack growth analysis considering periodic grinding

전 현 규\*·유 원 희\*\*·함 영 삼\*\*\*

Jun, Hyun-Kyu · You, Won-Hee · Ham, Young-Sam

### 요 약

구름접촉피로는 차륜과 레일의 반복적인 접촉으로 인하여 발생하는 표면손상현상으로 점차 증가하는 레일손상 중 하나이다. 접촉마모 및 주기적 그라인딩보다 균열의 성장속도가 더 빨라 균열진전이 시작되는 최소균열크기(minimum crack size for growth)는 레일의 파괴방지 및 유효한 유지보수전략을 수립하는데 기초자료로 활용된다. 본 연구에서는 최소균열크기를 예측하기 위하여 차륜레일의 접촉에 영향을 미치는 주요 파라미터를 변화시키면서 최소균열크기의 변화를 살펴보았다. 이를 위하여 Fletcher와 Kapoor의 "2.5D" 모델을 적용한 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하였으며, 최대접촉하중(1174MPa), 표면마찰계수(0.1, 0.2, 0.3 and 0.4), 잔류응력, 접촉에 의한 표면마모(1.0nm/cycle), 그라인딩량(0.3mm/10MGT)을 파라미터로 하여 해석을 수행하였다. 해석결과 최소균열크기는 해석조건에 따라 1.41-1.95mm로 계산되었다.

**keywords** : 구름접촉피로, 레일표면경사균열, 균열성장해석, 주기적 레일그라인딩, 그린합수법

### 1. 서 론

구름접촉피로(rolling contact fatigue : 이하 RCF)(Fisher 등, 2006, Evans 등 2007)는 열차의 이동에 따라 차륜과 레일의 반복적인 접촉에 의해 발생하는 피로현상으로 차량의 고속화에 따라 손상의 발생 빈도가 점차 높아지고 있다. 레일의 손상은 주행안정성 및 승차감 저하, 소음발생, 차륜의 손상을 가져 오며, 적절한 유지보수가 이루어지지 않을 경우 레일의 파괴까지 야기할 수 있기 때문에 매우 중요하게 다루어지고 있다. RCF에 의한 피로손상의 진전은 차륜과 레일의 접촉상태, 마모, 윤활, 운행환경 등 여러 파라미터에 영향을 받기 때문에 이를 예측하기 위하여 오래 동안 연구가 수행되어 오고 있으나 아직까지 명확한 해답은 제시되어 있지 않은 상태이다. 미소 균열이 발생하면 균열의 성장속도와 마모속도(접촉마모+그라인딩 마모)는 서로 경쟁관계에 놓인다. 즉, 균열성장속도가 크면 균열은 계속적으로 커지게 되며, 반대로 접촉마모 및 그라인딩 속도가 크면 균열은 제거된다. 따라서 레일에서 균열이 발견되면 균열이 계속적으로 성장할지, 아니면 열차운행 중 제거될지를 결정하여 모니터링 및 유지보수 전략을 수립할 필요가 있다(Carroll, 2006).

균열의 성장은 파괴역학(fracture mechanics)을 적용하여 예측할 수 있다. 1회의 구름접촉이 일어나는 동안의 응력확대계수범위(stress intensity factor range)를 계산하여 균열성장곡선에 적용하면 1회 구름

\* 한국철도기술연구원 선임연구원 hkjun@krri.re.kr

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원 whyou@krri.re.kr

\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원 ysham@krri.re.kr

접촉이 일어나는 동안의 균열성장량을 계산할 수 있다. 이때 응력확대계수를 계산하는 방법은 유한요소법, 경계요소법, 그린함수법 등 다양한 방법이 있으나, 상대적으로 모델구성이 단순하고 해석시간이 짧은 그린함수법이 수천만 사이클의 계산이 필요한 피로균열성장해석을 위해 적합하다.

본 연구에서는 피로균열성장에 의한 레일유지보수계획 수립을 위한 기초연구로써 초기균열, 마모량 및 주기적 그라인딩 조건, 표면마찰계수의 변화 등에 대해 지속적인 균열의 성장이 예상되는 최소임계 균열크기(minimum crack size for growth : 이하 MCSZ)가 어떻게 변화하는지를 예측하였으며, 또한 균열성장속도를 예측하여 허용 가능한 균열크기까지 성장하는데 필요한 시간을 예측할 수 있는 균열성장곡선을 계산하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 구름접촉피로 균열성장

구름접촉피로에 의한 균열의 발생 및 성장단계는 균열성장메카니즘에 따라 그림 1과 같이 3단계로 나뉜다 (Evans 등 2007). 본 연구에서 대상으로 하고 있는 것은 레일의 유지보수 전략과 밀접한, 주로 접촉하중에 의해서 균열이 레일표면과 약 30°의 경사를 이루며 성장하는 단계인 2단계의 균열성장속도를 예측하기 위한 것으로 선형탄성파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM)을 적용하였다. 균열의 진전은 균열 열림모드(opening mode)와 균열 미끄러짐모드(sliding mode)가 혼합된 모드로 예측하였다. 이를 위하여 Fletcher와 Kapoor의 "2.5D" 모델(Fletcher 등, 2006)을 적용하였으며, 피로균열성장해석을 위하여 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하였다.

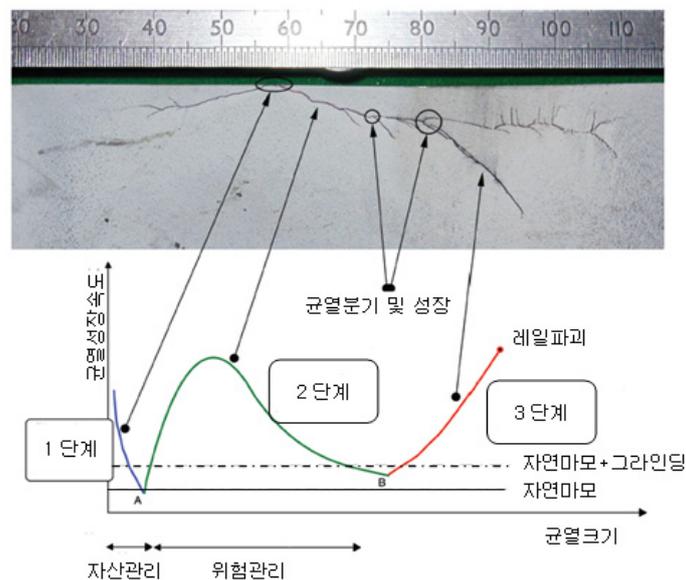


그림 1 RCF에 의한 표면경사균열 성장

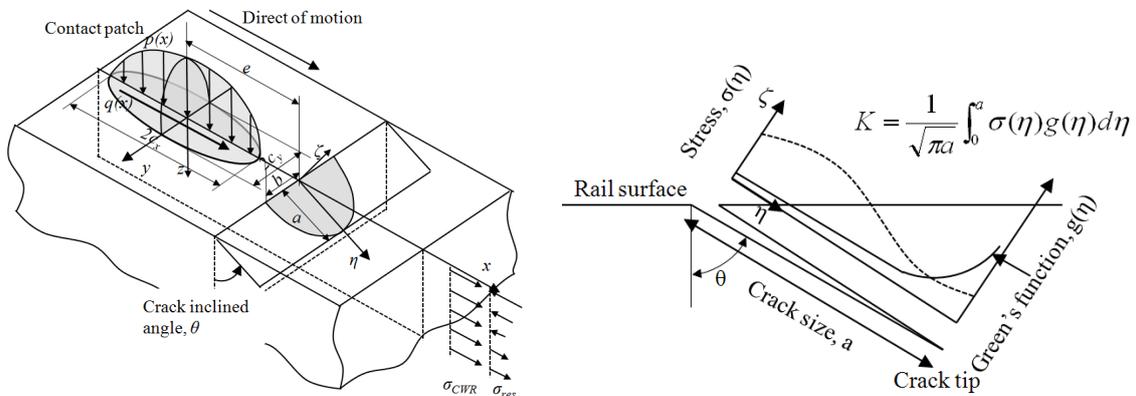
### 2.2. 그린함수법

그림 2는 레일표면 균열성장을 해석하기 위한 접촉해석모델이다. 레일표면에 반원형(semi-circular)의 경사 균열을 정의하고, 헤르츠접촉으로 이상화한 접촉패치가 지나가는 형태로 차륜의 구름을 모델링 하였다. 접촉 패치는 타원형으로 이상화 하였으며, 접촉패치의 크기는 유한요소해석을 통하여 계산하였다. 균열에 작용하

는 하중은 차륜레일접촉에 의한 접촉하중, 레일의 제조 및 운행으로부터 발생하는 잔류응력 및 장대레일의 온도차이로부터 발생하는 열응력을 고려하였으며, 균열면과 균열면의 마찰로 인한 균열거동(정지, 미끄러짐)을 고려하였다. 응력확대계수 계산에는 Rooke(Rooke 등, 1992)가 제시한 그린함수(Green's function)를 이용하였다. 그림 3은 응력확대계수,  $K_N$  계산을 위한 그린함수의 정의로서 균열을 따라 작용하는 수직응력과 전단응력을 계산하고 그린함수를 적용하여 균열입구부터 균열팁까지 적분함으로써 계산할 수 있다.

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

여기서,  $N=I,II$ ,  $f=p,q$ ,  $\alpha(\eta)$ 는 균열면에 작용하는 총 조합응력,  $g_N^f(\eta)$ 는 그린함수이다.



(a) 헤르츠접촉으로 이상화한 차륜/레일 접촉모델 (b) 경사균열 SIF 계산을 위한 그린함수  
그림 2 경사균열이 존재하는 레일표면 접촉해석모델

### 2.3. 최소임계균열 해석절차

그림 3은 접촉마모 및 주기적 그라인딩을 고려한 MCSZ를 계산하는 절차로써 균열은 매 접촉사이클 마다 작용하중에 의한 균열팁에서의 성장,  $da_t$  및 마모에 의한 표면삭정,  $da_w$ 을 반복한다. 이때  $da_c < da_w$ 이면 균열이 제거되는 속도가 균열의 진전속도보다 크기 때문에 균열은 마침내 제거될 것이다. 이와 같은 조건일 경우 초기균열의 크기를 1% 크게 하여 지금까지의 절차를 반복한다. 마침내  $da_t > da_w$ 의 조건에 도달하면 균열은 접촉마모에 의해서는 제거되지 않음을 의미한다. 한편, 그라인딩 주기가 도래하면 그라인딩량,  $da_g$  만큼 레일면에 삭정이 발생한다. 삭정 후의 균열크기,  $a_i$ 가  $a_i < a_0$ 이면 초기 균열보다 작은 균열이 되므로 결국 균열이 제거된다는 의미이며, 따라서 초기균열이 충분히 크지 않다고 판단할 수 있다. 초기균열의 크기를 다시 1% 크게 가정하고 지금까지의 절차를 반복한다. 이러한 과정을 마모와 주기적 그라인딩을 고려해도 균열이 지속적으로 성장하는 크기를 찾을 때까지 반복한다.

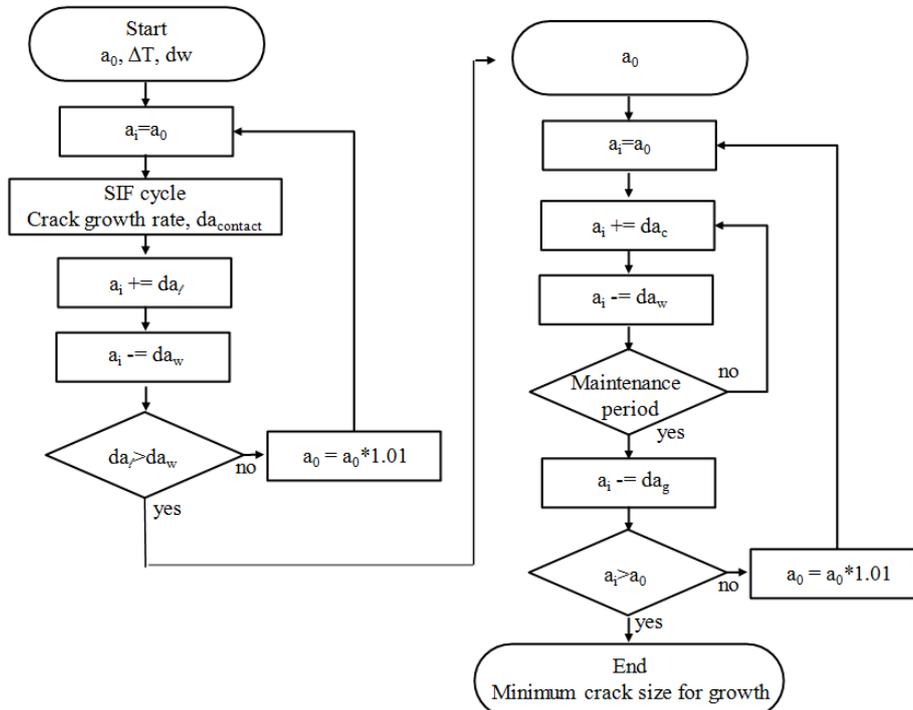


그림 3 마모와 주기적 그라인딩을 고려한 MCSZ 계산절차

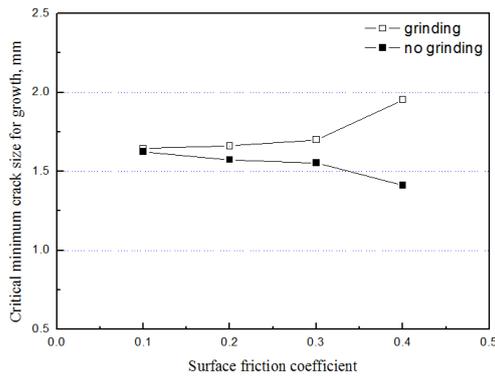
### 3. 균열성장에측

본 연구에서는 다양한 파라미터를 대상으로 균열성장을 예측하였으나, 지면관계상 표 1과 같이 레일표면 마찰계수에 대한 파라미터 해석만을 수록하였다. 균열성장해석에 필요한 헤르츠접촉하중의 크기와 영역은 KTX차륜과 UIC60 레일의 접촉을 3차원 유한요소해석하여 계산하였다. 축중을 15 ton으로 가정하고 접촉해석을 수행하면 최대 1174 MPa의 접촉응력이 발생한다. 접촉하중에 따른 균열면에서의 응력은 Engineering Science Data(ESDU, 1994)에서 제시한 식을 이용하였다. 견인력의 크기는 레일의 표면마찰계수에 의존하므로 이를 비교하기 위하여 표면마찰계수(건조:0.30-0.45, 물:0.15, 오일:0.05)를 0.1~0.4까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 접촉에 의한 마모는 1.0nm/cycle로 가정하였으며, 그라인딩주기는 0.3mm/10MGT으로 계산하였다. 레일면과 균열면의 경사는 30°로 가정하였으며, 균열의 형상은 반원(semi-circular)형상으로 가정하였다. 잔류응력분포는 국외의 측정결과(Evans, 2007)를 이용하였으며, 열응력 계산을 위한 온도차이(T-T<sub>N</sub>)는 -20°C로 가정하였다.

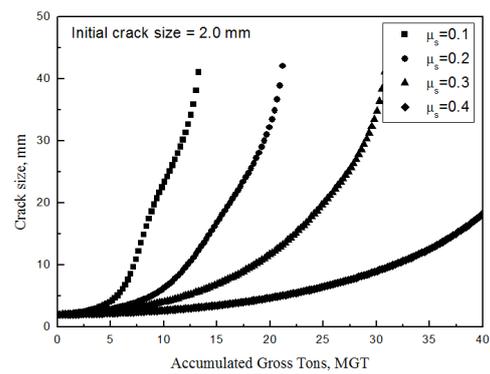
표 1 균열성장을 위한 해석조건

Run	p <sub>0</sub> MPa	c <sub>x</sub> mm	c <sub>y</sub> mm	μ <sub>s</sub>
1	1174	7.21	5.68	0.10
2	1174	7.21	5.68	0.20
3	1174	7.21	5.68	0.30
4	1174	7.21	5.68	0.40

그림 5는 마찰계수 변화에 따른 MCSZ 변화와 균열성장속도의 변화로써 솔리드 마크는 주기적 그라인딩을 고려하지 않은 경우의 MCSZ이며, 중공마크는 그라인딩을 고려한 MCSZ이다. 그라인딩을 고려하지 않았을 때 균열크기는 마찰계수가 커질수록 작아졌으나, 그라인딩을 고려하면 반대로 마찰계수가 커질수록 커졌다. 이러한 이유는 마찰계수가 커질수록 견인력이 커지며 그 결과 균열의 미끄러짐을 방해하므로 균열성장속도가 느려지며 그라인딩으로 인해 균열이 제거되는 효과가 더해졌기 때문으로 판단된다. 따라서 주기적인 그라인딩을 수행하면 약 1.65mm의 균열은 성장하지 못하고 제거되는 것을 알 수 있다.



(a) 마찰계수변화에 따른 임계균열변화



(b) 마찰계수변화에 따른 균열성장속도 변화

그림 5 임계균열크기 및 균열성장속도 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 MCSZ를 예측하기 위하여 차륜레일의 접촉에 영향을 미치는 주요 파라미터를 변화시키면서 균열크기의 변화를 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 그라인딩을 고려하지 않은 MCSZ는 1.41-1.62mm로 계산되었으며, 그라인딩을 고려한 경우는 1.64-1.95mm로 계산되었다.
- (2) 표면마찰계수가 클수록 균열의 성장속도가 느려졌으며, 이는 균열면의 마찰거동 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 해석조건을 바탕으로 판단하면, 1.65mm보다 더 큰 균열이 선로운영 중 발견될 경우 균열의 성장가능성이 있으므로 주의 깊은 모니터링이 필요하다. 그러나 MCSZ는 열차운행환경에 따라 달라지므로 모든 선로에 일괄적으로 본 연구의 결과를 적용하는 것은 무리가 있으며, 열차주행 및 선로조건에 따른 각각의 해석을 수행함으로써 타당성 있는 균열크기를 예측할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

Carroll, R et al (2006) Recommendation of and scientific basis for minimum action rules and maintenance limits, *INNOTRACK Deliverable report D4.2.6*.

Engineering Science Data Unit (1994) Contact phenomenon III : Calculation of individual stress

components in concentrated elastic contacts under combined normal and tangential loading, *HIS*, 85007.

**Evans, G., Fletcher, D.I., Franklin, F. and Kapoor, A.** (2007) Management and understanding of rolling contact fatigue ?Phase 2 crack growth, *Rail Safety and Standard Board*.

**Fischer, F.D., Daves, W., Pippin, R., Pointner, P.** (2006) Some comments on the surface crack in rails, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 29, pp.938~948.

**Fletcher, D.I. and Kapoor, A.** (2006) Rapid method of stress intensity factor calculation for semielliptical surface breaking cracks under three-dimensional contact loading, To appear in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F, Journal of Rail and Rapid Transit*, 220, pp219~234.

**Rooke, D.P., Rayaprolu, D.B., and Aliabadi, M.H.**(1992) Crack line and edge green's functions for stress intensity factors of inclined edge cracks. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 15, pp.441~461.