

# 구름접촉 피로균열성장에 대한 실험적·해석적 고찰 Experimental and analytical study on the fatigue crack growth under rolling contact fatigue

\*#전현규<sup>1</sup>, 서정원<sup>1</sup>

\*#H.K.Jun(hkjun@krri.re.kr)<sup>1</sup>, J.W.Seo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 차륜레도연구실

Key words : Rolling contact, Fatigue crack growth, Twin disc, Hertz contact

## 1. 서론

구름접촉피로(rolling contact fatigue : RCF)는 오랜 기간에 걸쳐 이루어지기 때문에 현장에서 재현하기 어렵다. 이러한 이유로 실제의 환경보다 비교적 단순하고 가속시험이 가능한 실험적<sup>(1)</sup> 및 해석적 방법<sup>(2-4)</sup>이 이용되고 있다.

본 연구에서는 차륜/레일에서의 균열의 발생 및 성장을 예측하기 위한 연구의 일환으로 실험적 방법과 해석적 방법을 통해 균열의 성장을 예측하였으며 이를 위하여 Twin disc 실험을 통하여 균열의 발생 및 성장을 측정하고, Fletcher 등<sup>(2)</sup>이 제시한 "2.5D" 모델을 이용하여 균열의 성장을 예측하였다.

## 2. 실험적 방법을 통한 Twin-disc 피로균열성장

### 2.1 시험조건

RCF에 의한 균열성장을 실험적으로 측정하기 위하여 실제 차륜과 레일 소재에서 시험편을 채취하였다. 시험편의 직경은 50mm이며, 두께는 10mm이다. Fig.1은 Twin disc를 이용한 시험장치로써 축과 수직한 액튜에이터에서 접촉하중을 가하는 형태로 되어 있으며, 회전율을 변화시켜 슬립율을 조절할 수 있도록 하였다.

균열길이 측정시험은 접촉사이클에 따른 균열 길이를 측정하기 위하여 5개의 동일한 시험편을 준비하고, 동일한 환경에서 각각 일정한 사이클 이후 시험을 멈추고 시험편의 단면을 절단하여 균열의 성장량을 기록하는 방법으로 진행하였다. 작용하중은 최대 접촉압력,  $p_0$ 이 1070 MPa이 되도록 하였으며, 슬립율이 1%가 되도록 회전수를 조절하였다. 시험속도는 500 rpm으로 일정하게 유지하였으며, 윤활은 접촉면 위쪽에서 물이 지속적으로 떨어지도록 하였다.

$$p_0 = 0.418 \sqrt{PE/tR} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 작용하중,  $t$ 는 시험편두께,  $R$ 은 시험편반경,  $E$ 는 탄성계수이다.

$$1/R = 1/R_R + 1/R_W \quad (2)$$

### 2.2 시험결과

RCF에 의한 균열은 마모가 안정화된  $5.0 \times 10^5$  사이클 이후부터 표면에서 관찰되기 시작하였으며, 내부에서는 이보다 더 일찍 발생했다고 생각된다.  $1.0 \times 10^6$ 에는 시험편 표면이 육안으로도 접촉표면이 일부 떨어져나가는 셸링(shelling) 현상이 발생하고 있다.

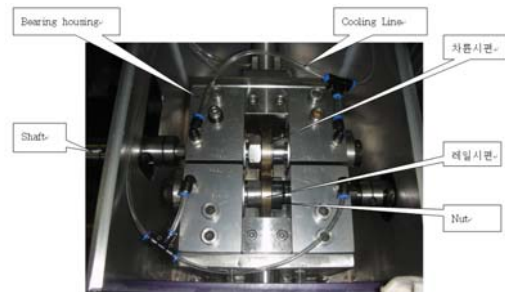


Fig. 1 Picture of twin disc rolling contact test machine

구름접촉시험 동안에 토크와 마찰계수는 시험 초기에는 각각 1.8 kg.m, 1.5까지 증가하였으나, 마모에 의한 안정화단계를 지나면서 1.4 kg.m, 0.9까지 점차 감소하였다. 그러나 셸링 등으로 인하여 시험표면이 거칠어지는  $7.0 \times 10^5$  사이클 이후에는 다시 증가하는 현상을 보였다. Fig. 2는  $1.0 \times 10^6$  사이클 후 시험편의 절단면으로써 셸링 현상 및 균열의 성장을 확인할 수 있다. 균열의 길이는  $1440 \mu\text{m}$

이며 시편표면과 약 30°의 각도를 이루면 진전하고 있다.

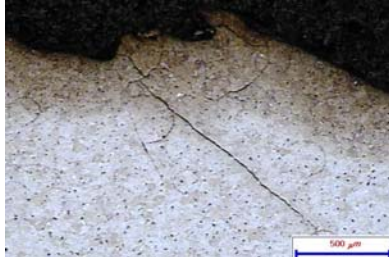


Fig. 2 Inclined crack at the surface of specimen after  $1 \times 10^6$  cycles

### 3. 해석적 방법을 통한 Twin-disc 피로균열성장

#### 3.1 해석모델

Fig. 3은 Twin disc의 구름접촉을 모델링한 것으로써 하중은 헤르츠접촉하중이 시편의 두께방향으로 분포한 것으로 모델링 하였다. 균열은 긴 슬롯형 경사균열로 모델링 하였다. 마찰계수는 시편시험에서 표면이 안정화됨에 따라 초기  $0.196 > 0.122$  까지 변화였고, 해석에서는 평균값인 0.160을 이용하여 수행하였다. 작용하중은 차륜시편에 의한 접촉하중만을 고려하였다.

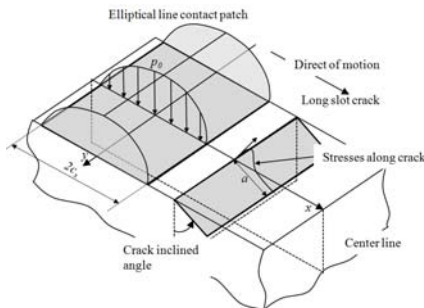


Fig. 3 Integrity evaluation procedure of a cracked structure

#### 3.2 해석결과

Fig. 4는 해석결과로써 표면의 마모량을 변화시키면서 균열의 성장을 해석한 것이다. 초기 균열길이는 약  $5 \times 10^5$  사이클 이후 발견된 균열크기인  $0.17mm$ 를 이용하였으며, 이 크기는 선형탄성파괴역학을 적용하기에 충분하다. 하중조건 및 접촉조건은 앞서 시험조건과 같다. 다만 1회전시 시편표면의 마모량을 측정해야 하는데 마모량이 매우 작아 정확히 측정하지 못하였기 때문에 국외의 연구결과( $0.7 \text{ nm/cycle}$ )를 이용하였다. 균열은 시편

표면에서 30°의 경사로 모델링 하였으며, 형상은 긴 슬롯(long slot)형으로 가정하였다.

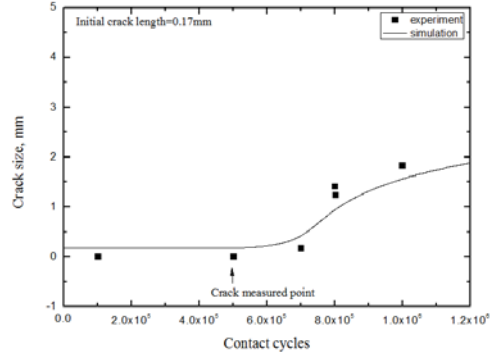


Fig. 4 Comparison of crack growth with the change of wear rate

### 4. 결론

본 연구에서는 레일에서 발생하는 균열의 성장을 해석하기 위한 기초연구로써 해석적 모델을 개발하고 Twin disc를 이용한 시험을 통해 해석모델을 타당성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시편표면에서의 균열은 약  $5 \times 10^5$  사이클 이후에는 표면에서도 관찰되며 이후 점차 성장한다.
- 2) 초기 균열길이  $0.17mm$ 를 가정하고 균열성장해석을 수행한 결과 시편에서 측정된 균열성장속도와 시뮬레이션 모델에서 계산한 균열성장속도는 잘 일치하였다.

### 참고문헌

1. Tyfour, W.R., Beynon, J.H. and Kapoor A., "The steady state wear behaviour of pearlitic rail steel under dry rolling-sliding contact conditions", *Wear*, **180**, 79-89, 1995.
2. Fletcher, D.I. and Kapoor, A., "Rapid method of stress intensity factor calculation for semi-elliptical surface breaking cracks under three-dimensional contact loading", *Proc. IMechE*, **220**, 219-234, 2006.
3. Ringsberg, J.W. and Josefson, B.L., "Finite element analyses of rolling contact fatigue crack initiation in railheads", *Proc Instn Mech Engrs*, **215**, 243-259, 2001.
4. Bogdanski, S. et al, "Numerical modelling of a 3D rail RCF squat-type crack under operating load", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **21**, 923-935, 1998.