

전동차 차륜의 반복 구름 접촉에 의한 피로균열 전파에 관한 연구  
A Study on Fatigue Crack Growth of an EMU Wheel due to  
Repeated Rolling Contacts

김호경\*                      이덕규\*\*  
Kim, Ho-Kyung              Lee, Duk Gyu

ABSTRACT

The EMU wheel is one of the most important component for the vehicle safety. For the tensile, fracture toughness and crack propagation tests, several specimens were collected from actual wheels. FEM analysis also was performed on the crack that was assumed to be 15 mm in depth under the wheel tread surface. The stress intensity factors  $K_I$  and  $K_{II}$  at the crack tip under the stress ( $P_{max} = 911.5$  MPa) due to a rolling contact were analyzed for crack growth characteristics. As a result, the perpendicular crack was found to be more dangerous compared to the parallel one.

1. 서 론

차륜은 차량 전체 중량을 지지하는 역할을 하면서 레일 위를 달리는 중요한 장치이다. 레일과 구름접촉으로 발생하는 응력이 균열전파와 가장 밀접한 관계가 있으며, 균열전파 기동은 차량 운행 안전성과 경제적인 운행 측면에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 도시철도(SMRT)에서 운영하고 있는 차량 중 디스크제동을 채택하는 TC차 차륜계(SSW2-2종)의 반복구름 접촉에 의한 차륜의 응력과 균열전파를 평가하기 위하여 실제 사용하는 차륜에서 채취한 시편면으로 항복강도, 파괴 인성치, 균열전파속도 등을 측정하였다. 또한, 유한요소해석을 실시하여 반복구름 접촉 상태에서의 응력분포와 차륜에 균열이 내재되었다는 가정 하에 구름 접촉시 각각의 균열 크기에 대한 선행 및 후행 균열선단에서의 응력확대계수  $K_I$ ,  $K_{II}$  및 유효응력확대계수  $K_{eff}$ 를 평가하여 실제제작 및 유지보수 기본 자료로 제시하고자 한다.

2. 실험 및 해석

2.1 인장 실험

평판재 시편편을 사용하여 인장실험을 실시하였으며, 실험에 적용된 차륜은 "KRS2242-2107 카 일체차륜" 제작규격으로 생산하여 8호선에서 사용하고 있는 차륜으로써 Fig. 1과 같이 시편편을 채취하였다. 본 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같으며 레일강과 비교 할 수 있도록 명기하였다. 본 연구에 사용된 차륜은 탄소 함유량이 0.67%인 고탄소강임을 알 수 있다.

\* 서울산업대학교 교수 비회원

\*\* 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정, 정회원

Table 1 Chemical composition of the wheel steel (wt-%)

Element	C	Mn	Si	P	S
wheel steel	0.67 (max)	0.6 - 0.9	0.15 (min)	0.045 (min)	0.045 (max)
rail steel	0.72 (max)	0.873	0.25 (min)	0.012 (min)	0.005 (max)

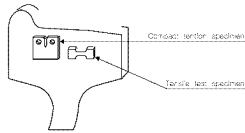


Fig. 1 Schematic representation of tensile and CT specimens extracted from a wheel

## 2.2 파괴인성 및 균열전파 실험

파괴인성 및 피로균열전파 실험은 ASTM E399-90<sup>(1)</sup>, ASTM E647-95<sup>(2)</sup>에 따라 CT(Compact Tension) 시험편을 제작하였다. 파괴인성 시험편은 유압식어브식 피로시험기(Instron 사 Model 8516)를 사용하여 일정 진폭하에서 초기균열길이  $a_0 = 21.5$  mm로 가공하여 COD (Crack Opening Displacement) 게이지를 장착하여 하중재이 방식으로 8 kN/min의 속도로 실험하였다. 한편, 피로균열전파 실험은 파괴 인성치 실험에 사용한 것과 동일한 시험기로 일정 진폭하에서 응력비(R)=0.05, 주파수 20Hz로 하였다. 균열길이의 측정은 50배율 망원경을 사용하였으며, Fig. 2는 본 연구에서 사용한 피로 균열전파속도 측정 및 COD를 이용한 파괴인성치 실험 장치이다.

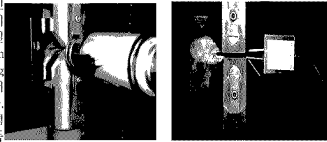


Fig. 2 Fatigue crack growth and fracture toughness test devices

## 2.3 유한요소 해석모델 및 방법

해석에 사용된 차륜은 도시철도 8호선에서 채택한 1/20 차륜으로써 Table 2에서는 차륜에 작용하는 하중, 차륜반경, 레일상면 곡률 반경을 나타내었다. 단성 해석을 위한 기계 물성치로 단성 계수(E)=210 GPa, 포화충비( $\nu$ )=0.3, 항복강도( $\sigma_y$ )=487.2 MPa로 하였다.

차륜직경 860 mm, 담판 기울기 1/20, 레일 상면 600 mm 곡선부분과의 접촉이 초기 접촉점이 된다. 차륜과 레일의 접촉압력 계산은 차륜과 레일이 원형상태에서 계산된 것으로 다음 식으로부터 구하였다.

$$F_{max} = \frac{3W}{2ab} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$a = a \sqrt[3]{\frac{W S}{G}}, \quad b = \beta \sqrt[3]{\frac{W S}{G}} \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{B}{A} \right) \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_r} \right), \quad B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_w} - \frac{1}{R_r} \right) \quad \text{----} \quad (4)$$

$$S = \frac{4}{\left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_r} \right)} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$G = \frac{4E}{3(1-\nu^2)}$$

(6)

Table 2  $\alpha$  and  $\beta$  according to  $\theta$ 

$\theta$	$\alpha$	$\beta$	$\theta$	$\alpha$	$\beta$
20	3.778	0.408	60	1.486	0.717
30	2.731	0.493	65	1.378	0.759
35	2.397	0.530	70	1.284	0.802
40	2.136	0.567	75	1.202	0.846
45	1.926	0.604	80	1.128	0.893
50	1.754	0.641	85	1.061	0.944
55	1.611	0.678	90	1.000	1.000

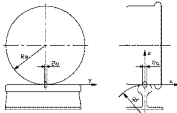


Fig. 3 Wheel-rail contact area

$S=1001.75$  mm,  $G=30769.2$  kg/cm<sup>2</sup>,  $\theta=80.5^\circ$ ,  $\alpha=1.1146$ ,  $\beta=0.8981$ 을 얻었다. 여기서  $S$ ,  $G$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 재료 물성치와 차륜-레일 형상으로부터 구한 상수와 계수들이다.

Table 3의 각 차륜의 최대 부담 하중만을 외력으로 고려하고, 재료 물성치와 차륜-레일 형상으로부터 구한 상수와 계수를 사용하여 식(2)에 대입하여 접촉면적을 구하면  $a=7.073$  mm,  $b=5.700$  mm가 되고 최대 접촉압력을 구하면  $P_{max}=911.5$  MPa이 된다. 여기서 구한 최대 접촉압력은 항복 강도 487.2 MPa을 초과하는 것으로서 설계도면 형상의 차륜과 레일이 접촉하면 당면 부근이 소성 변형 할 수 있음을 의미한다.

Table 3 Driving conditions

Parameter	Numerical values
Wheel Load	7.85 ton
Wheel Radius of Contact Point	430 mm
Curve Rate Radius of rail	600 mm

## 2.4 유한요소 해석 절차

상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하여 차륜구동 접촉에 의한 피로균열 전파 시뮬레이션을 수행하였다. 차륜형상의 복잡함과 해석의 간편함을 위하여 Fig. 4와 같이 2차원으로 해석하였다.

과거 역학적 유한요소해석 모델에서 가장 중요한 것은 균열 선단에 대한 모델링이다. 선형 탄성이론에서 균열의 선단에서는 특이성(Singular)이 발생한다. 그러므로 균열 선단을 모델링 할 때에는 Singular element를 반드시 만들어야 한다.

본 해석에서는 요소 반경을 균열길이의 1/13.3으로 하였으며, 종횡비는 1.02:1로, 균열 선단 주위의 각도는 30°로 설정하여 해석을 수행하였다. 표면에서 15 mm길이에 존재하는 초기 균열길이  $2a=2$  mm인 상태에서 해석된 모델의 절점 수는 9852개, 요소 수는 3184개였으며 요소 형태는 Singular element인 Plane 82를 사용하였다. 또한, 폭 200 mm 높이 100 mm의 평면변형률 상태인 2차원 물체에 균열이 존재하는 것으로 가정하여 접촉 응력이 1 mm마다 이동시 균열에 작용하는 응력 확대계수를 각각 결정하였다. 한편, 균열 선단의 경우 이동중인 접촉하중과 먼저 접촉하는 선행 균열선단(leading crack tip)과 후에 접촉하는 후행 균열선단(tailing crack tip)에서의 응력 확대계수를 결정하기 위하여 각각의 균열에 대한 모델링을 통하여 결정하였다.

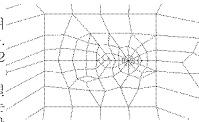


Fig. 4 FE mesh near the crack tip in detail

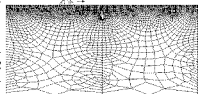


Fig. 5 FE model of a wheel containing a defect subjected to a moving Hertzian contact load

### 3. 실험해석 결과 및 고찰

#### 3.1 인장 물성치

인장실험을 실시한 결과 Fig. 6과 같이 항복강도는 487.2 MPa임을 확인하였다. 유사 성분의 레일강에 대한 다른 연구 결과<sup>(3)</sup> 항복강도가 481.2 MPa임을 감안할 때 본 차륜강은 이와 항복강도가 매우 유사함을 알 수 있다.

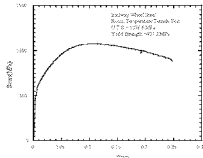


Fig. 6 Stress-strain curve of the wheel steel

#### 3.2 파괴 인성치 및 균열전파 평가

본 차륜재의 파괴 인성치 평가를 위한 Fig. 7과 같은 하중 P와 균열 개구 변위 δ와의 곡선에서 ASTM E399-90의 Type I, II, III 형식 중 III형식으로 K<sub>Q</sub>를 결정하는데 사용하였다. 필요한 P<sub>0</sub>를 구하기 위하여 초기의 선형 기울기의 5% 감소시켜 만나는 점을 P<sub>0</sub>로 하여 초기 기울기 직선과 감소된 기울기 직선 사이에 존재하는 최고 하중을 P<sub>0</sub>로 정의하고, III형식에서; P<sub>0</sub> 이전에 최고 하중이 존재하므로 그 점을 P<sub>0</sub>(P<sub>max</sub>=P<sub>0</sub>)로 하여 P<sub>0</sub>=11672 N을 얻었다. 파괴 인성치 K<sub>Q</sub>는 ASTM E399-90에 따라 식 (7)로 평가 할 수 있다.

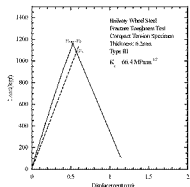


Fig. 7 Load-COD curves

$$K_Q = \left( \frac{P_Q}{BW^{\frac{3}{2}}} \right) f\left( \frac{a}{W} \right) \quad \text{-----(7)}$$

여기서,  $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 는  $\frac{a}{W}$ 의 함수이다. P<sub>0</sub>를 이용하여 K<sub>Q</sub>를 결정하면 K<sub>Q</sub>=66.4 MPa.m<sup>0.5</sup>로 나타났다. 그리고, 식 (7)에 의하여 얻어진 K<sub>Q</sub>값은 유효한 평면변형률 파괴인성 K<sub>IC</sub>가 되기 위한 식 (8)의 조건들을 만족하지 못하여 본 시험편 두께에 대한 파괴인성치 K<sub>IC</sub>로 판정하였다.

$$B, a \geq 2.5(K_Q/\sigma_u)^2, W \geq 5(K_Q/\sigma_u)^2 \quad \text{-----(8)}$$

한편, 피로균열전파 실험은 파괴인성 평가에 사용한 것과 동일한 시험편을 사용하여 실시하였다. Fig. 8은 본 차륜재의 응력 확대계수 폭에 대한 균열 전파 속도 선도로 모드 I 하중 상태에서 하한 응력 확대계수 폭 ΔK<sub>th</sub>는 약 16 MPa.m<sup>0.5</sup>로 나타났다. 또한 응력 확대계수 폭이 40 MPa.m<sup>0.5</sup>이상에서; 균열전파속도가 급격히 빨라지; 제 3구간에 접어들었음을 알 수 있으며 그 후에 본 실험재료의 두께에 해당하는 파괴 인성치 K<sub>IC</sub>에 접근한다고 가정할 수 있다.

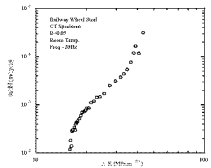


Fig. 8 Fatigue crack growth rates against stress intensity factor range of the railway wheel steel.

#### 3.3 구름접촉 작용시 균열선단 해석

차륜이 구동 시 레일과의 접촉력에 의한 차륜내의 균열에 발생하는 응력과 그로 인한 응력 확대계수를 유한요소 해석을 이용하여 해석하였다. Fig. 9는 차륜 표면에서 15 mm 떨어진 깊이 지점에 표면과 균열길이 가 평행하게 존재하는 상태에서 차륜에 작용하면서 작용하중 위치에 대한 선형과 후행 균열선단에서의 Tanaka<sup>(4)</sup>가 제안한 유효 응력 확대계수 K<sub>eff</sub>를 표시한 것이다. 본 그래프를 통하여 선형 균열선단의 경우 유효 응력 확대계수가 최대 값을 나타내는 접촉하중 중앙의 위치가 +3.5 mm 근처로 균열길이 2a=2 mm를 고려하면 균열선단에서 4.5 mm 만큼 떨어진 지점에서 유효 응력 확대계수가 최대 값을 나타냄을 알 수 있다.

그러나, 후행 균열선단의 경우 유효 응력 확대계수가 최대 값을 나타내는 접촉하중 중앙의 위치가 -4.5 mm 근처로 균열길이 2a=2 mm를 고려하면 균열선단에서 5.5 mm만큼 떨어진 지점에서 유효 응

력 확대계수가 최대값을 나타낼을 알 수 있다. 따라서, 유효 응력 확대계수 최대 값은 후행 균열 선단보다 선행 균열선단에서 존재함을 알 수 있다. 한편, 유효 응력 확대계수가 최대 값을 나타내는 지점에서 선행 및 후행 균열선단에 대한 von-Mises 응력 분포도는 각각 Fig. 10, Fig. 11을 통하여 선행 균열선단에서 von-Mises 응력이 258.5 MPa로 후행 균열선단에서의 244.9 MPa보다 크다는 것을 알 수 있다.

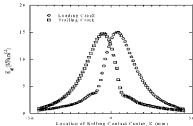


Fig. 9 The effective stress intensity factor versus for crack line under rolling contact loading (h=15 mm, 2a=2 mm, b=7.073 mm,  $P_{max}$  = 911.5MPa).



Fig. 10 Von-Mises stress distribution of the leading crack (in under rolling contact loading when the rim experiences the maximum effective stress intensity factor: 2a=2 mm, h=15 mm, b=7.073 mm  $M_{max}$ =911.5MPa).



Fig. 11 Von-Mises stress distribution of the trailing crack (in under rolling contact loading when the rim experiences the maximum effective stress intensity factor: 2a=2 mm, h=15 mm, b=7.073 mm,  $P_{max}$ =911.5MPa).

한편, 선행 및 후행 균열선단에서의 2a=2 mm에서부터 3 mm까지의 각 위치별로 유효 응력 확대계수를 해석하였으며, 그 결과는 각각 Fig. 12, Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 후행 균열의 경우 균열길이 2a=2.4 mm 근처에서의 유효 응력 확대계수가 본 차륜계의 페르균열정과 실험을 통하여 결정된 하한 응력 확대계수  $K_{th}=16.04 \text{ MPa.m}^{0.5}$ 에 접근함을 알 수 있다. 즉, 후행 균열의 경우 균열길이 2.3 mm이전에는 본 연구에서 해석한 최대접촉압력  $P_{max}=911.5 \text{ MPa}$ 의 접촉하중이 가해져도 균열이 성장하지 않음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 12에서 선행 균열의 경우 2a=2.4 mm에서 하한 응력 확대계수  $K_{th}=16.04 \text{ MPa.m}^{0.5}$ 에 도달하는 것으로 나타나 앞서 서술한 바와 같이 유효 응력 확대계수 최대치가 후행 균열선단 보다 선행 균열선단에서 존재함을 알 수 있다.

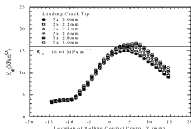


Fig. 12 Effective stress intensity factor of the leading crack (in various location of rolling contact center for various crack lengths under rolling contact loading (h=15 mm, crack is parallel to the wheel surface).

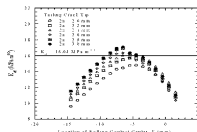


Fig. 13 Effective stress intensity factor of the trailing crack (in various location of rolling contact center for various crack lengths under rolling contact loading (h=15 mm, crack is parallel to the wheel surface).

차륜 표면에 수직인 방향으로 균열이 존재할 경우도 있다. 차륜 표면으로부터 깊이 h=15 mm에 균열이 존재시 상부(upper) 균열선단에서의 접촉하중에 의한 유효 응력 확대계수가 본 차륜계의 하한 응력 확대계수  $K_{th}=16.04 \text{ MPa.m}^{0.5}$ 에 접근하는 균열의 크기를 해석하였다. Fig. 14는 2a=0.5 mm에

서 1.0 mm까지의 각각의 접촉하중 중심위치에 대하여 유효 응력 확대계수를 나타낸 그래프이다. 본 그래프를 통하여 표면에서 깊이 h=15mm에 위치한 수직 균열의 경우 균열길이가 0.7 mm 이상이 되면 본 자활재의 하한 응력 확대계수 폭  $K_{th}=16.04 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 에 접근하여 균열이 성장함을 알 수 있으며, 이는 차륜 표면에서 수직인 균열길이가 동일한 깊이 h=15 mm에서 수평인 균열길이보다 훨씬 위험하다는 것을 알 수 있다. Fig. 15는 표면에서 깊이 h=15 mm에 위치한 균열길이 2a=0.5 mm인 수직 균열 상태에서 최대 유효 응력 확대계수가 발생하는 지점에서의 von-Mises 응력 분포도이며 상단 균열에서의 최대 응력이 56.6 MPa를 나타남을 알 수 있다. 본 연구에서는 경유응력, 브레이크 열응력, 순수 구름이 아닌 tractive force, 난조시 체결의 이방성을 포함한 체결 불균일성, 선로의 비평탄성으로 인한 충격하중, 균열면 마찰계수 등이 적용되지 않은 순수한 상태로 이루어졌으며 이를 고려한 연구가 추후 필요하다.

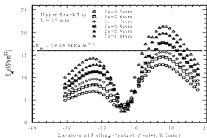


Fig. 14 Effective stress intensity factor of the surface crack (in mm) against location of rolling contact center for various crack lengths under rolling contact loading (h=15 mm, crack is perpendicular to the wheel surface).

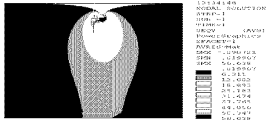


Fig. 15 Von-Mises stress distribution of the nonvertical crack (in mm) under rolling contact loading when the (in) experiences the maximum effective stress intensity factor; 2a=0.5mm, h=15mm, b=7.073 mm,  $F_{max}=911.5\text{MPa}$ .

#### 4. 결 론

차륜 담면 깊이 15 mm 위치에 초기균열길이 2a = 2 mm ~ 3 mm 크기의 균열이 담면 방향과 수평으로 존재 한 때와 초기균열길이 2a = 0.5 mm ~ 1 mm 크기의 균열이 담면 방향과 수직으로 존재 할 때 각각 균열선단에서 균열전파 여부는 실험하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 차륜 담면 깊이에 존재하는 균열 선단부에 작용하는 유효 응력 확대계수( $K_{eff}$ ) 최대치는 선형균열선단에 존재하였다.
2. 차륜 표면에서 15 mm 깊이에 균열이 있을 경우 균열이 차륜 담면과 수평방향 균열보다 수직 방향 균열이 훨씬 위험하다는 것을 확인하였다.
3. 균열방향이 차륜 담면과 수평일 경우는 균열길이 2.4 mm에서 하한 응력 확대계수  $K_{th} = 16.04 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 에 접근하고 균열이 전파하였다.
4. 균열방향이 차륜 담면과 수직일 경우는 균열길이 0.7 mm에서 하한 응력 확대계수  $K_{th} = 16.04 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 에 접근하고 균열이 전파하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM E 399-90.
- [2] "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM E 647-95.
- [3] 최린. "Rail강재 용접부의 피로균열진전 특성에 관한 연구" 논문. 한양대학교 산업대학원. 1998. 12.
- [4] K. Tanaka, "Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cycle tensile axis", Eng. Fract. Mech., 6 (1974) 493-507.

#### 감사의 글

본 연구 내용을 조연에 주신 서울산업대학교 원사대 교수님, 철도기술연구원 정종재 박사님께 깊은 감사드립니다.