

# 철도 차륜의 구름접촉 피로 균열에 관한 유한요소해석

김호경<sup>†</sup> · 양경탁<sup>\*</sup> · 김현준<sup>\*</sup>

서울산업대학교 자동차공학과 · \*서울산업대학교 대학원  
(2006. 11. 25. 접수 / 2007. 3. 29. 채택)

## FEM Analysis on Rolling Contact Fatigue Crack of a Railway Wheel

Ho-Kyung Kim<sup>†</sup> · Kyoung-Tak Yang<sup>\*</sup> · Hyun-Jun Kim<sup>\*</sup>

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology  
<sup>\*</sup>Graduate School, Seoul National University of Technology  
(Received November 25, 2006 / Accepted March 29, 2007)

**Abstract :** In this study, tensile and fatigue crack propagation tests machined from actual wheels were performed. 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( $P_{max} = 911.5\text{MPa}$ ) 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. It is found that in the wheel fatigue crack, parallel to the wheel tread surface, the crack with its length  $2a = 2.4\text{mm}$  starts to propagate due to the fact that the effective stress intensity factor access to the threshold stress intensity factor( $K_{th} = 16.04\text{MPa}\sqrt{m}$ ) of the wheel.

**Key Words :** railway wheel, effective stress intensity factor, rolling contact fatigue, leading and tailing crack tip

### 1. 서론

철도차륜은 차량 전체 중량을 지지하는 역할을 하면서 레일 위를 이동하는 중요한 장치이다. 이때 레일과의 구름접촉에 의한 응력이 어느 한도 이상일 경우 균열이 전파하여 육안으로 확인이 가능한 크기로 전파하거나 전파로 인하여 표면이 떨어져 나가는 경우 차륜을 깎아내는 삭정 공정을 하게 된다. 균열로 인한 삭정 빈도는 마모에 의한 삭정에 비하여 상대적으로 적다. 그러나 균열에 의한 삭정은 차륜 직경 깊숙이 깎아야 하므로 차륜수명 단축의 요인이 된다. 또한 균열이 전파하여 차륜의 일부분이 분리되는 경미한 파손은 종종 레일, 현가장치, 베어링 등의 손상을 초래하며 심할 경우 탈선, 전복 등 안전사고와 직결되는 원인이 된다. 따라서 균열전파는 차량 운행 안전성과 경제적인 운영 측면에서 매우 중요하다. 차륜에 관한 그 동안의 연구는 주로 차륜과 레일의 접촉 응력 분포에 대한 연구<sup>1,2)</sup>, 레일의 설치 기울기 변화에 따른 응력 변화<sup>3)</sup>, 차륜의 최적 형상에

관한 연구<sup>4)</sup> 등으로 실제 차륜의 안전성과 관련이 있는 차륜의 구름접촉에 의한 피로균열에 대한 연구는 미흡하다.

본 연구에서는 서울시 도시철도공사에서 운영하고 있는 차량 차륜의 구름 접촉에 의한 응력과 균열 내재시의 균열전파 여부에 대한 안전성을 평가하였다. 이를 위하여 차륜재의 균열전파 거동을 평가하기 위하여 실제 사용하는 차륜에서 채취한 CT (compact tension) 시험편으로 균열전파 실험과 차륜에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 차륜 표면에서 임의의 거리만큼 떨어진 깊이 지점에 표면과 균열 길이가 평행 및 수직으로 존재하는 상태에서 차륜에 작용하면서 작용하중 위치에 대한 선행과 후행 균열선단에서의 응력 확대계수를 평가하여 설계, 제작 및 유지보수의 기본 자료로 제시하고자 한다.

### 2. 실험 및 수치해석

#### 2.1. 피로균열실험

실험에 적용된 차륜은 서울시 지하철 8호선에서 사용하고 있는 차륜으로서 재료의 화학적 성분은 Table

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
kimhk@snut.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of the wheel steel (wt. %)

Material	C	Mn	Si	P	Fe
wheel steel	0.67	0.75	0.15	0.045	bal.

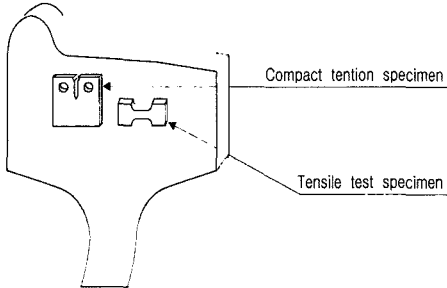


Fig. 1. Schematic representation of tensile and CT specimens extracted from a wheel.

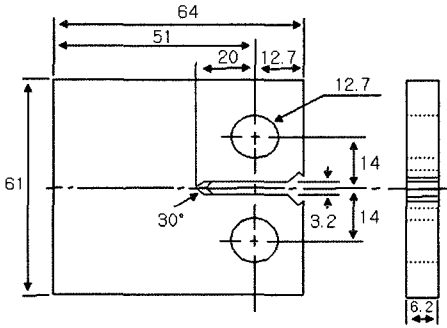


Fig. 2. Compact tension specimen.

1과 같으며 인장 및 피로시험편을 각각 3개를 Fig. 1과 같이 차륜에서 채취하였다. 인장시험을 통하여 시험편의 인장 및 항복강도는 각각 1076MPa, 487MPa로 나타났다.

피로균열전파 실험은 ASTM E399-90<sup>5)</sup>에 따라 Fig. 2와 같이 CT 시험편으로 제작하였다. CT 시험편은 유압서어보식 피로시험기(Instron사 Module 8516)를 사용하여 일정 진폭하에서 응력비(R)=0.05, 주파수 20Hz로 하였다. 균열길이의 측정은 망원경을 사용하였다. 균열전파실험은 평균 약 0.1mm 간격으로 측정하였으며 시험편이 균열전파 예상 경로를 경면 연마처리하여 전구를 측면에서 조사하여 전파길이를 측정하였다. 균열 길이는 앞면을 위주로 매3회에 한번 씩 뒷면을 측정하여 평균값으로 결정하였다.

## 2.2. 해석 조건

차륜과 레일이 Fig. 3과 같이 접촉시 차륜의 반지름  $R_w$ 와 레일 상면의 곡률 반지름  $R_r$  사이에서 탄성

접촉이 발생하여 그 접촉면 형태가 타원이라고 가정할 경우 최대접촉압력  $P_{max}$ , 타원형의 접촉면적 장반경  $a$  및 단반경  $b$ 는 다음의 식을 사용하여 결정한다<sup>6)</sup>.

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

$$a = \alpha^3 \sqrt{\frac{WS}{K}}, \quad b = \beta^3 \sqrt{\frac{WS}{K}} \quad (2)$$

여기서,  $W$ 는 접촉면에 가해지는 전체 하중을 나타내고, 타원 장축 및 단축  $2a, 2b$ 의 비례상수인  $\alpha$ 와  $\beta$ 값은 Table 2를 이용하여 계산할 수 있다.

접촉 운동을 하는 차륜과 레일에서의 접촉면의 기울어진 각도인  $\theta$ 는 다음의 식으로부터 구해진다.

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

여기서

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

또한, 동일한 재질을 사용한 차륜과 레일에 대한 기하학적 계수  $S$ 와 재료 상수  $K$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

$$K = \frac{4E}{3(1-\nu^2)} \quad (6)$$

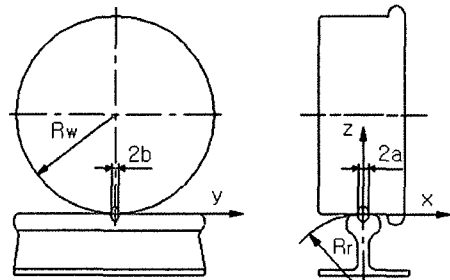


Fig. 3. Wheel-rail contact parameters.

Table 2.  $\alpha$  and  $\beta$  values as a function of  $\theta$

$\theta$	$\alpha$	$\beta$	$\theta$	$\alpha$	$\beta$
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	0.64	85	1.061	0.944
55	1.611	0.678	90	1.000	1.000

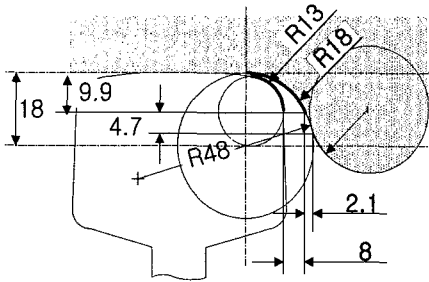


Fig. 4. Wheel-rail contact dimensions.

해석에 사용된 차륜은 답면 기울기 1/20의 도시 철도 8호선 차륜이다. 차륜에 작용하는 하중은 7.85 ton, 차륜직경 860mm, 레일 상면 600mm 곡선부분과의 접점이 초기 접촉점이 된다. Fig. 4에서 레일 상면 중앙점에서 플랜지 방향으로 21mm 지점, 즉 레일 모서리부 R13과 차륜 플랜지의 R18 곡면부가 만나는 곳에서 초기 접촉점이 형성된다. 차륜과 레일이 초기 원형상태에서 식 (2), (3), (5), (6)을 각각 이용하여  $S = 1001.6\text{mm}$ ,  $K = 30769\text{kg/cm}^2$ ,  $\theta = 80.5^\circ$ ,  $\alpha = 1.1146$ ,  $\beta = 0.8981$ 을 얻었다. 이때 차륜 및 레일의 탄성계수  $E = 210\text{GPa}$ , 포외송비  $\nu = 0.3$ 으로 가정하였다. 차륜의 최대 부담 하중(7.85ton)에 의한 접촉 면적을 구하면  $a = 7.073\text{mm}$ ,  $b = 5.70\text{mm}$ 가 되고 최대 접촉압력을 구하면  $P_{\max} = 911.5\text{MPa}$ 으로 결정하였다.

### 2.3. 해석 모델링

유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 5.8을 사용하여 차륜 구동 접촉에 의한 피로균열에 관하여 해석을 수행하였다. 차륜형상의 복잡함과 해석의 간편함을 위하여 Fig. 5(a), (b)와 같이 2차원으로 해석하였다. 본 해석에서는 요소 반경을 균열길이의 1/16으로 하였으며, 균열 선단 주위의 각도는  $45^\circ$ 로 설정을 하여 해석을 수행하였다. 표면에서 15mm 깊이에 존재하는 상태에서 초기 수평 및 수직 균열이 각

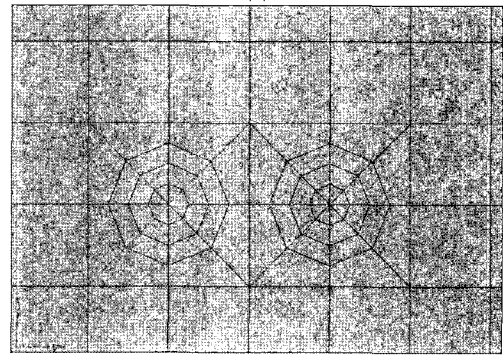
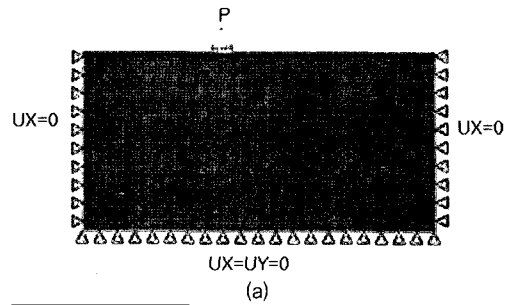


Fig. 5. (a) FE- model of a wheel containing an initial crack subjected to a moving Hertzian contact load and (b) FE mesh near the crack tip in detail.

각  $2a = 2.0\text{mm}$  및  $0.1\text{mm}$ 인 상태에서 해석된 모델의 질점 수는 72882개, 요소 수는 23618개였으며 요소 형태는 CPE8을 사용하였다. 폭 200mm 높이 100mm의 평면변형을 상태인 2차원 물체에 균열이 존재하는 것으로 가정하여 접촉 응력이 2mm마다 이동시 균열에 작용하는 응력 확대계수를 각각 결정하였다. 균열 사이의 마찰계수는 없는 것으로 간주하였다. 한편 균열 선단의 경우 이동 중인 접촉하중과 먼저 접촉하는 선행 균열선단(leading crack tip)과 후에 접촉하는 후행 균열선단(tailing crack tip)에서의 응력 확대계수를 결정하였다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1. 피로균열전파속도

피로균열전파속도 실험 데이터에 대하여 Fig. 6과 같이 응력 확대계수 폭에 대한 균열 전파 속도 선도를 구하였다. II영역에서의 균열전파속도를  $da/dN = C\Delta K^m$ 과 같은 Paris 식으로 표현할 경우 재료상수 C와 m값은 각각  $7.9 \times 10^{-12}$ , 3.1과 같다. 모드 I 하중 상태에서 하한 응력 확대계수 폭  $\Delta K_{th}$ 는 약  $16\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 나타났다. 이는 저탄소강의 경우  $6\text{MPa}\sqrt{m}$

에 비하면 매우 높은 것으로 나타났다<sup>7)</sup>. 응력 확대 계수 폭이  $40\text{MPa}\sqrt{m}$  이상에서는 균열전파속도가 급격히 빨라지는 제 3구간에 접어들었음을 알 수 있으며 그 후에 본 실험재료의 두께에 해당하는 파괴 인성치  $K_{IC}$ 에 접근하였다. Fig. 7은  $\Delta K \approx 20\text{MPa}\sqrt{m}$ 에서의 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 파면으로 파면이 벽개파면이 아닌 부드러운 파면으로 관찰되었다.

### 3.2. 구름접촉 작용시 균열선단 해석

#### 3.2.1. 수평균열

차륜이 레일 위를 구를 때 레일과의 접촉력에 의한 차륜내의 존재하는 균열의 안전성을 평가하기 위하여 균열에 발생하는 응력과 그로 인한 응력 확대 계수  $K_I$ 와  $K_{II}$ 를 유한요소 해석을 이용하여 결정하였다. 균열의 깊이는 차륜 표면에서 15mm로 고정하였다.

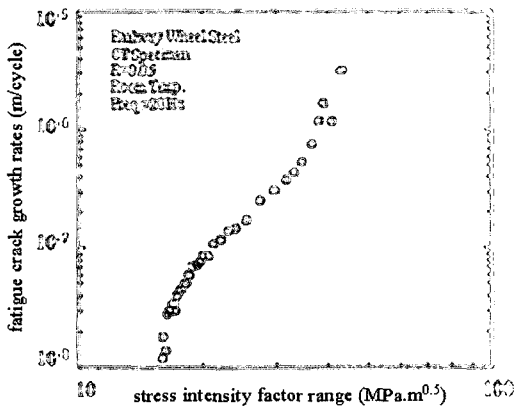


Fig. 6. Fatigue crack growth rates against stress intensity factor range of the railway wheel steel.

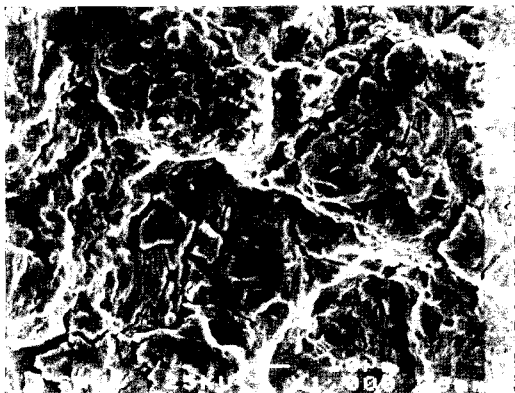
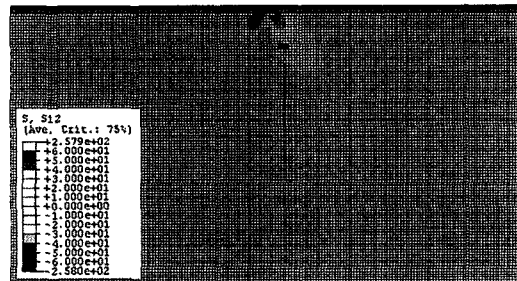


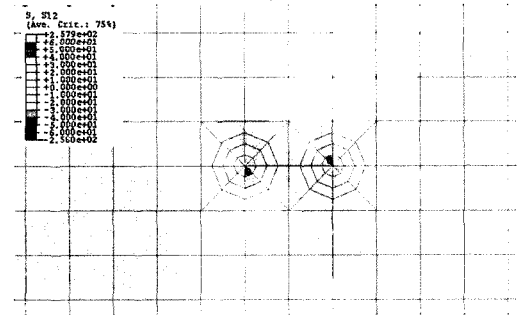
Fig. 7. Fatigue crack growth rates against stress intensity.

깊이  $h=15\text{mm}$ 인 지점에 표면과 균열길이가 평행하게 존재하는 상태에서 차륜 하중이 작용시 작용 하중 위치에 대한 균열길이  $2a=2.0\text{mm}$ 의 선형과 후행 균열선단에서의 전단응력 분포도는 각각 Fig. 8(a), (b)와 같다. Fig. 8(a) 및 (b)를 통하여 선형 균열선단에서 전단 응력이  $257.9\text{MPa}$ 로 후행 균열선단에서의  $244.9\text{MPa}$ 보다 약 5% 정도 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 깊이  $h=15\text{mm}$ 인 지점에 표면과 균열길이가 평행하게 존재하는 상태에서 차륜 하중이 작용시 작용하중 위치에 대한 균열길이  $2a=2.0\text{mm}$ 의 선형 균열선단에서의 모드 I, II에 대한 응력 확대 계수  $K_I$ 와  $K_{II}$ 의 분포도이다. 여기서 구름 접촉하중 분포도의 중앙 위치를 나타내는 X 좌표의 음(-)의 의미는 접촉하중 중심이 균열중심부를 통과하기 전을 나타내며 양(+)의 의미는 그 반대 의미를 나타낸다. 본 그래프를 통하여 모드 I의 응력 확대 계수는 접촉점 중심이  $-2.0\text{mm}$ 인 거의 균열길이의 중앙에 존재시 최대값인  $14.3\text{MPa}\sqrt{m}$ 가 작용함을 알 수 있다. 그러나 모드 II의 경우는 접촉점 중심이  $+8, -10\text{mm}$ 에서 최대임을 알 수 있으며 그 크기는 각각



(a)



(b)

Fig. 8. (a) Shear stress distribution of the leading and trailing crack tip under rolling contact loading when the tip experiences the maximum effective stress intensity factor, (b) the shear stress distribution near the crack tip in detail;  $2a=2\text{mm}$ ,  $h=15\text{mm}$ ,  $P_{\text{max}}=911.5\text{MPa}$ .

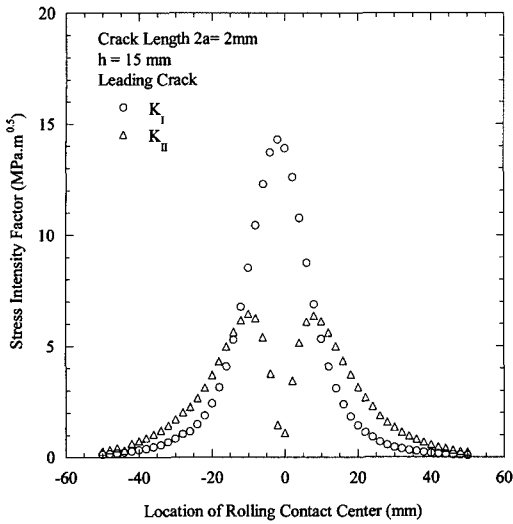


Fig. 9. The stress intensity factors  $K_I$  and  $K_{II}$  for leading crack tip under rolling contact loading ( $h=15\text{mm}$ ,  $2a=2\text{mm}$ ,  $P_{\text{max}}=911.5\text{MPa}$ ).

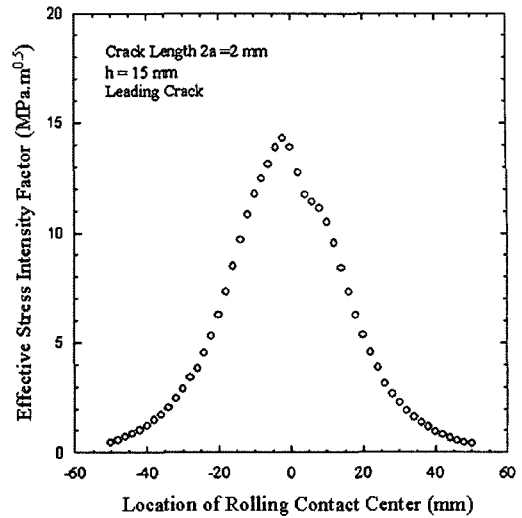


Fig. 10. The effective stress intensity factor for leading crack tip under rolling contact loading ( $h=15\text{mm}$ ,  $2a=2\text{mm}$ ,  $P_{\text{max}}=911.5\text{MPa}$ ).

6.36, 6.45MPa $\sqrt{m}$ 로 거의 대칭임을 알 수 있다. 또한 모드 I의 응력확대계수가 모드 II 경우 보다는 약 2배 이상 크음을 알 수 있다.

균열선단에 응력확대계수가 모드 I, II로 혼합하여 작용시 이를 효과적으로 표현하는 유효응력확대계수에 대하여 많은 연구<sup>8,9)</sup>가 있으나 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하는 Tanaka<sup>8)</sup>가 제안한  $K_{\text{eff}} = \sqrt{K_I^2 + 8K_{II}^2}$ 을 적용하였다. Fig. 10은 Fig. 9의 응력 확대계수  $K_I$ 과  $K_{II}$ 을 유효 응력 확대계수  $K_{\text{eff}}$ 로 환산하여 표시한 것이다. Fig. 10을 통하여 접촉하중 위치가 균열에 접근하면서 균열선단에서의 유효 응력 확대계수가 증가함을 알 수 있다. 선행 균열선단에서의 유효 응력 확대계수가 최대가 되는 지점은 접촉하중 중심이 균열중앙보다는 약간 이동한 지점에 위치함을 알 수 있다. 선행 균열선단의 경우 유효 응력 확대계수가 최대값을 나타내는 접촉하중 중앙의 위치가 +2.0mm 근처로 균열길이  $2a=2.0\text{mm}$ 를 고려하면 균열선단에서 3.0mm 만큼 떨어진 지점에서 유효 응력 확대계수가 최대값을 나타냄을 알 수 있다.

선행 균열선단에서의  $2a=2.0\text{mm}$ 에서부터 4.0mm까지의 각 위치별로 유효 응력 확대계수를 해석하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 선행 균열의 경우 균열길이  $2a=4.0\text{mm}$  근처에서의 유효 응력 확대계수가 본 차륜재의 하한 응력 확대계수  $K_{\text{th}}=16.04\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 접근함을 알 수 있다. 즉 선행

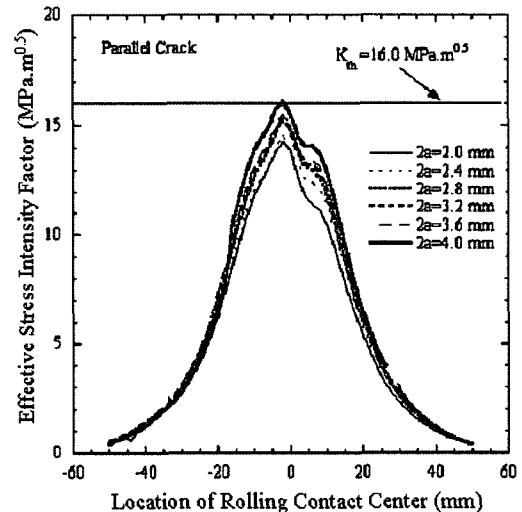


Fig. 11. Effective stress intensity factor of the leading crack tip against location of rolling contact center for various crack lengths under rolling contact loading ( $h=15\text{mm}$ , crack is parallel to the wheel surface).

균열의 경우 균열길이가 3.8mm 이전에는 본 연구에서 해석한 최대접촉압력  $P_{\text{max}}=911.5\text{MPa}$ 의 접촉하중이 가해져도 균열이 성장하지 않으나 4.0mm부터는 선행 균열선단에서 성장한다고 예측할 수 있다.

### 3.2.2. 수직 균열

차륜 표면에 수직인 방향으로 균열이 존재할 경우도 있으므로 차륜 표면으로부터 깊이  $h=15\text{mm}$ 에

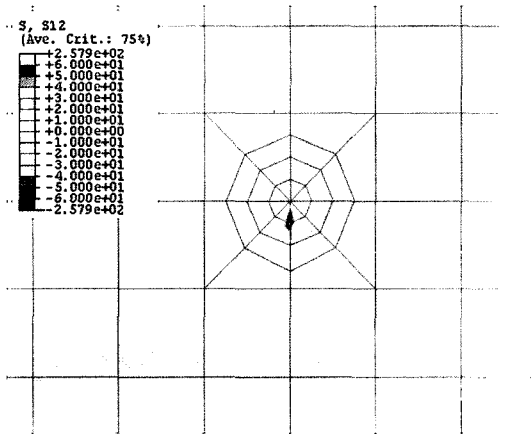


Fig. 12. Shear stress distribution of the perpendicular crack tip in detail under rolling contact loading when the tip experiences the maximum effective stress;  $2a = 0.2\text{mm}$ ,  $h = 15\text{mm}$ ,  $P_{\text{max}} = 911.5\text{MPa}$ .

균열이 존재 시 접촉하중에 의한 균열선단에서의 응력확대계수를 해석하였다. Fig. 12는 표면에서 깊이  $h = 15\text{mm}$ 에 위치한 균열길이  $2a = 0.5\text{mm}$ 인 수직 균열상태에서 전단 응력 분포도이며 수직 균열조건과 동일하게 최대 응력  $257.9\text{MPa}$ 이 상단 균열에 발생함을 알 수 있다.

차륜 표면으로부터 깊이  $h = 15\text{mm}$ 에 균열이 존재 시 접촉하중에 의한 균열선단에서의 응력확대계수를 해석하였다. 균열선단의 경우 하부보다는 접촉하중에 근접하는 상부(upper) 선단이 더욱 위험함으로 상부 균열선단에서의 유효 응력 확대계수가 본 차륜재의 하한 응력 확대계수  $K_{th} = 16.04\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 접근하는 균열의 크기를 해석하였다. Fig. 13은  $2a = 0.1\text{mm}$ 에서  $1.0\text{mm}$ 까지의 각각의 접촉하중 중심위치에 대하여 유효 응력 확대계수를 나타낸 그래프이다. 본 그래프를 통하여 상부 균열선단의 경우 접촉하중 중심이 균열선단 전방 약  $14\text{mm}$  근처에서 유효 응력 확대계수가 증가하다가 다시 감소하며, 그 후 하중 중심이 균열을 통과한 후 약  $8\text{mm}$  근방에서 유효 응력 확대계수가 최대값에 도달함을 알 수 있다. 본 그래프를 통하여 표면에서 깊이  $h = 15\text{mm}$ 에 위치한 수직 균열의 경우 균열길이가  $0.1\text{mm}$  이상이 되면 본 차륜재의 하한 응력 확대계수  $K_{th} = 16.0\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 접근하여 균열이 성장함을 알 수 있다. 이는 차륜 표면에 수직인 균열길이가 동일한 깊이  $h = 15\text{mm}$ 에서 수평인 균열길이보다 훨씬 위험하다는 것을 암시한다. 즉 수평균열의 경우  $2a = 4.0\text{mm}$ 일 경우 균열이 접촉하중에 의한 반복 응

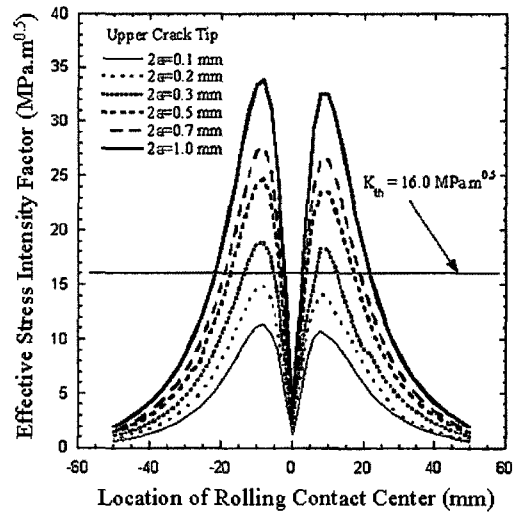


Fig. 13. Effective stress intensity factor of the upper crack tip against location of rolling contact center for various crack lengths under rolling contact loading( $h = 15\text{mm}$ , crack is perpendicular to the wheel surface).

력으로 성장하나 수직균열의 경우는  $2a = 0.25\text{mm}$ 일 경우 성장함을 알 수 있다. 통상적으로 수직하중과 tractive 하중에 의하여  $0.35\text{mm}$ 정도의 균열이 발생하면 균열이 성장가능성이 있다고 알려져 있다<sup>10)</sup>. 본 연구에서는 깊이가  $15\text{mm}$ 로 가정하였으나 깊이가 그 이하일 경우 균열발생 하한크기는  $0.35\text{mm}$ 에서 그 이하로 낮아질 수 있어 본 연구에서 해석한 결과치가 합당한 수치라 판단된다.

추후 차륜에서의 균열 성장에 관하여 좀 더 현실에 접근하는 해석을 위하여 잔류 응력, 브레이크 열 응력, 순수 구름이 아닌 tractive force, 단조시 재질의 이방성을 포함한 재질 불균일성, 철로의 비평탄성으로 인한 효과, 균열면 마찰계수 등을 고려하여야 한다. 또한 최대 접촉압력은 항복강도를 초과하나 현실적으로 차륜과 레일은 사용하면서 마모되어 접촉면적은 증가하여 최대 접촉 응력은 감소한다는 사실도 고려가 바람직하다. 각기 깊이가 다른 균열의 성장여부를 결정한다면 이와 같은 연구를 통하여 내재하는 균열이 전파할 것인지를 파악하여 비파괴 검사를 통한 차륜의 안전성을 제시할 수 있다고 판단 된다.

#### 4. 결론

차륜이 레일위를 이동시 차륜 담면으로부터 깊이  $15\text{mm}$  위치에 수평 및 수직 균열이 각각  $2a = 2.0\text{mm}$

및 0.1mm인 상태에서 초기 균열길이  $2a = 2.0\text{mm} \sim 4.0\text{mm}$ 가 존재 할 때 균열선단에서의 응력확대계수를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 철도차륜의 모드 I에서의 하한 응력 확대 계수는  $16.04\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 저탄소강에 비하면 매우 높은 것으로 나타났으며 II영역에서의 균열 전파속도는  $da/dN = 7.9 \times 10^{-12} \Delta K^{3.1}$ 과 같다.

2) 모드 I의 응력확대 계수는 접촉점 중심이 -2.0mm인 거의 균열길이의 중앙에 존재시 최대값인  $14.3\text{MPa}\sqrt{m}$ 가 작용하나, 모드 II의 경우는 접촉점 중심이 +8, -10mm에서 최대임을 알 수 있으며 그 크기는 각각  $6.36, 6.45\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 거의 대칭이다. 또한 선행 균열선단에서의 유효 응력 확대계수가 최대가 되는 지점은 접촉하중 중심이 균열중앙보다는 약간 이동한 지점에 위치한다.

3) 상부 균열선단의 경우 접촉하중 중심이 균열 선단 전방 약 14mm 근처에서 유효 응력 확대계수가 증가하다가 다시 감소하며, 그 후 하중 중심이 균열을 통과한 후 약 8mm 근방에서 유효 응력 확대계수가 최대값에 도달함을 알 수 있다.

4) 차륜 표면에서 15mm 깊이의 균열은 균열방향이 차륜 답면과 수평일 경우와 수직일 경우는 각각 균열길이가 각각 2.4mm, 0.1mm부터 하한 응력 확대 계수  $K_{th} = 16.04\text{MPa}\sqrt{m}$ 에 접근하고 균열이 전파하는 것을 나타냈다. 이는 차륜 표면에 수직인 균열 길이가 동일한 깊이  $h = 15\text{mm}$ 에서 수평인 균열길이보다 훨씬 위험하다는 것을 암시한다.

## 참고문헌

- 1) 김의석, 허현무, 윤춘한, “차륜답면의 형상변화에 의한 접촉응력 분포해석”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 664~665, 2003.
- 2) 권범진, 정홍채, 김호경, “한국형 고속전철의 답면제동에 의한 차륜의 응력분포에 관한 연구”, 한국철도학회지, 제5권, 제3호, pp. 167~173, 2002.
- 3) 김청균, 김기환, “고속전철용 레일-휠 접촉에서 응력 분포에 관한 유효요소 해석”, 한국윤활학회지, 제13권, 제3호, pp. 93~101, 1997.
- 4) 이정화, 양원호, 조명래, 성기득, 허성필, “철도차량 객차용 차륜의 강도 설계에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 250~255, 1998.
- 5) “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”, ASTM E 399-90, 1990.
- 6) K.L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985.
- 7) 최린, “Rail강재 용접부의 피로균열진전 특성에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원, 1998.
- 8) K. Tanaka, “Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cycle Tensile Axis”, Eng. Fract. Mech., Vol. 6, pp. 493~507, 1974.
- 9) A. Otsuka, K. Mori, T. Miyata, “The Condition of Fatigue Crack Growth in Mixed Mode Condition”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 7, pp. 429~439, 1975.
- 10) S.D. O'Regan, G.T. Hahn, C.A. Rubin, Wear, Vol. 101, pp. 333~346, 1985.