

# 혼합모드 하중조건에서의 철도 차륜재의 피로균열 실험에 관한 연구

김택영 · 이만석\* · 유인동 · 김호경\*\*\*

서울과학기술대학교 자동차공학과 대학원

\*서울과학기술대학교 철도전문대학원 · \*\*서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

(2013. 1. 5. 접수 / 2013. 7. 18. 채택)

## Fatigue Crack Growth Rates of a Railway Wheel Steel under Mixed Mode Loading Conditions

Taek-Young Kim · Man-Suk Lee\* · In-Dong You · Ho-Kyung Kim\*\*\*

Graduate School of Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

\*Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology

\*\*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received January 5, 2013 / Accepted July 18, 2013)

**Abstract :** Fatigue crack growth tests were conducted on urban railway wheel steel under mode I and mixed-mode conditions. Fatigue crack growth rates were evaluated in terms of equivalent stress intensity factor ranges, using both the extended and projected crack lengths. The equivalent stress intensity factor range with the growth rate results obtained under mode I loading conditions can be used to predict the crack growth rate under mixed-mode loading conditions. Extended crack length rather than projected crack length is appropriate for the prediction of the crack growth rate under the mixed-mode loading conditions.

**Key Words :** railway wheel, fatigue crack growth, extended crack length, mixed mode loading

### 1. 서론

최근 도시 지하철 철도 차량은 안전성, 정시성 및 대량 수송능력이 우수하여 수송수요가 증가하고 있다. 철도차량 부품 가운데 차륜은 차량 중량을 지지하는 차량의 핵심 구조 부품으로서 열차의 주행 안전에 지대한 영향을 미친다. 차륜은 반복적인 운행 중 레일과의 상호작용에 의하여 마모가 발생한다. 또한, 차륜은 운행 중에 레일과 반복적인 구름접촉으로 발생하는 기계적 응력과 제동에 의한 열응력 등으로 인하여 차륜 담면 부위에 피로파손이 발생할 위험성이 있다. 만일 차륜에 균열이 전파하여 일부분이 떨어지는 경우 그 부위가 경미한 파손일지라도 레일, 현가장치, 베어링의 손상을 초래한다. 특히 균열이 심할 경우 탈선, 전복 등 안전사고와 직결되는 원인이 된다. 따라서 차륜의 건전성을 유지하며 기대수명 이상 사용으로 유지보수 비용을 줄이는 측면에서 반복적인 피로 환경 조건에서의 차륜 재료의 피로균열 파과거동을 평가하는 것은 차량 운행의 안전성 측면에서 매우 중요하다.

차륜에 관한 그 동안의 연구를 살펴보면 차륜과 레일의 접촉 응력 분포에 대한 연구<sup>1)</sup>, 차륜의 잔류응력 분포<sup>2)</sup>, 다축응력 피로수명법을 이용한 차륜의 피로수명에 관한 연구<sup>3)</sup>, 등가응력확대계수를 적용한 차륜의 접촉구름에 의한 균열

전파속도 예측<sup>4)</sup>등이 있다. 이러한 연구의 대부분은 유한요소 해석을 이용하여 차륜의 응력 상태나 피로 수명 예측에 관한 연구이다.

한편 철도차륜은 파괴역학적 측면에서 보면 균열열림형(모드 I), 미끄러짐형(모드 II), 그리고 비틀림형(모드 III)에 의해 균열이 전파한다. 이 경우에 균열전파 속도 및 방향을 예측하는 것이 매우 중요하다. 특히 차륜에서 문제가 되는 모드 I과 II가 혼합된 상태에서의 피로균열전파거동을 이해하여 정확한 균열전파속도 및 방향을 예측하는 방법을 확보하는 것이 새로운 차륜재 개발이나 차륜의 신뢰성 확보차원에도 중요한 자료가 될 것이다. 예를 들어 설계를 고려중인 차륜의 레일과의 접촉에 의한 피로균열 전파속도를 알고 있다면 초기 균열길이와 임계 균열길이간의 균열전파속도를 적분할 경우 총 균열전파수명의 환산이 가능하다.

지금까지 국내외적으로 여러 재료에 대하여 혼합모드 하중 조건에서 균열전파속도 평가에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이때 혼합모드 하중 조건에서 응력확대계수를 결정할 때 균열길이는 시편의 예비균열길이로부터 직선상으로 연장된 균열길이를 적용한다. 그러나 일반적으로 혼합모드상태에서의 전파되는 균열은 예비균열의 방향과 동일하게 전파되지 않고 분기하여 성장한다. 즉 피로균열은

\*Corresponding Author: Ho Kyung Kim, Tel : +82-2-970-6348, E-mail: kimhk@seoultech.ac.kr

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

혼합모드 하중조건에서 전파되면서 예비균열방향과 다르게 전파된다. 그러나 혼합모드 하중 조건에서 응력확대계수를 결정하는데 있어서 곡선으로 전파된 균열길이를 정의하는 방법은 분명하지 않다. 지금까지 대부분의 연구에서는 곡선으로 전파되는 각각의 균열 궤적(trajactory)에 대하여 유한요소 해석을 수행하여 균열선단의 응력확대계수를 결정하는 방법을 적용하였다<sup>5)</sup>. 그러나 이 경우 일정구간씩 전파되는 균열에 대하여 각각 구조해석을 수행해야 하는 번거로움이 있어 설계현장에서는 적용에 어려움이 있다. 또한 전파되는 균열에 대하여 얼마의 균열길이 증가분 간격으로 응력확대 계수 평가를 위한 해석을 하는 것이 적절한지가 불분명하다. 예로 혼합모드 하중조건에서 균열경로를 해석을 통하여 예측할 경우에는 균열길이가 각각 2 mm씩 증가시 해석하는 것이 가장 균열경로를 잘 나타낼 수 있다는 연구<sup>6)</sup>가 있다.

따라서 본 연구에서는 응력확대계수 결정에 필요한 균열길이를 결정하는데 있어서 구조해석이 아닌 실험적으로 측정된 균열길이를 적용하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 전파되는 균열길이에 대하여 응력확대계수를 결정을 위하여 연장된 균열길이방법(extended crack length method)과 예비 균열길이와 평행한 축에 투영하는 방법(projected crack length method)을 적용하고자 한다. 이를 통하여 모드 I 조건에서와 혼합모드 하중조건에서의 균열전파 속도와의 상관관계를 표현하는데 있어서 연장 균열길이방법과 투영균열길이 방법 중 어느 방법이 더 적절한지를 분석하고자 한다.

본 연구에서는 도시철도에서 운영하고 있는 철도차량 차륜재의 담면부에서 피로균열전파속도 시험편을 채취하여 피로균열전파속도 시험을 수행하였다. 특히 도시철도 차륜재의 혼합모드 하중조건에서 피로파괴 균열전파속도 및 거동에 관한 특성을 규명하고자 한다. 이를 통하여 차륜의 설계제작 및 유지보수를 위한 기본 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 도시철도 차량에 사용되는 차륜재로 화학 성분은 Table 1에 나타내었다. 피로시험편의 채취 위치 및 방향은 Fig. 1과 같이 차륜의 플랜지부에서 채취하였다. 담면부와 플랜지부의 경도값이 깊이 50 mm까지 거의 일정하며 다음과 같이 106.5 HRB 결과를 얻었다. 따라서 플랜지부의 시험편은 담면부 기준으로 깊이 50 mm 까지 담면부에서 채취하였다. 또한 차륜의 담면부에서 채취한 시험편을 이용하여 인장 시험을 수행하였다. 차륜의 인장강도 및 항복강도는 각각 1027.7 MPa, 626.7 MPa이며 연신율은 40.4%로 나타났다.

Table 1. Chemical composition of railway wheel steel(wt.%).

C	Mn	Si	P	S	Cu	Fe
0.6	0.72	0.28	0.009	0.006	0.02	Rem.

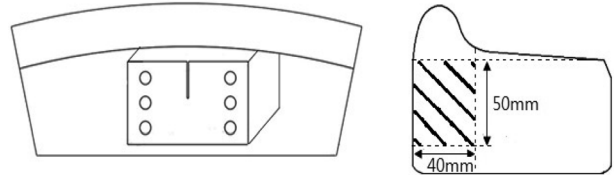


Fig. 1. Position and orientation of specimens extracted from wheel.

### 2.2. 혼합모드 상태에서의 피로균열실험

철도 차륜재의 피로균열 전파시험은 상온상태에서 실시하였으며 10 ton용 유압 서보식 동적재료시험기(Instron Model # 8502)를 사용하였다. 균열 길이를 측정하기 위하여 수평 및 수직 이동이 가능한 배율 50배의 이동식 현미경을 사용하였다.

혼합모드 하중조건에서의 시험에 대하여 아직까지 규격으로 정해진 방법이나 시험편은 없다. 다만, 많은 연구자들<sup>7-9)</sup>이 여러 가지 시험편과 시험장치를 이용하여 혼합모드 하중조건에서의 균열전파실험을 수행하였다. 본 연구에서는 Fig. 2에서와 같이 Richard<sup>7)</sup>가 제안한 CTS(compact tension & shear) 시험편 및 지그를 적용하여 시험하였다. 제작된 지그는 CTS시험편에  $K_I/K_{II}$ 의 조절이 용이하도록 하중 방향( $\Phi$ )을 15° 간격으로 변화를 주도록 제작되어 일축 인장 피로시험기에 Fig. 3과 같이 체결시킴으로써 사용하였다. 예비균열은 모드 I 상태에서  $a/W=0.5$ 가 되도록 균열을 전파시켰다.

CTS시험편의  $K_I$  및  $K_{II}$  값은 다음과 같은 Richard의 식 (1), (2)를 적용하여 결정하였다.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} \frac{\cos\Phi}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{0.26 + 2.65 \frac{a}{W-a}}{1 + 0.55 \frac{a}{W-a} - 0.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{WB} \frac{\sin\Phi}{1 - \frac{a}{W}} \sqrt{\frac{-0.23 + 1.40 \frac{a}{W-a}}{1 - 0.67 \frac{a}{W-a} + 2.08 \left(\frac{a}{W-a}\right)^2}} \quad (2)$$

여기서 B는 시험편 두께(=3.85 mm), a는 균열길이, W는 시험편의 폭(=45 mm)이다. 위식의 적용범위는  $0.5 \leq a/W \leq 0.7$  이다. 한편 혼합모드 하중 조건에서 균열전파속도는 Richard가 제안한 등가응력확대계수인  $K_v$ 를 매개변수로 적용하여 다음과 같이 Paris식을 사용하였다<sup>10)</sup>.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_V)^m = C \left( \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4\Delta K_{II}^2} \right)^m \quad (3)$$

피로실험은 사인 파형의 일정진폭 하중상태에서 15 Hz로 실험하였다. 본 연구에서는 응력확대계수 폭( $\Delta K$ )에 대

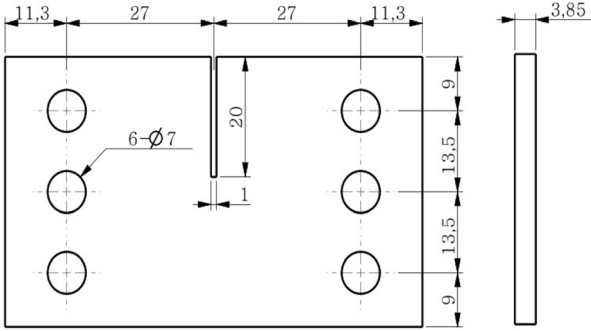


Fig. 2. Configuration of the CTS specimen.

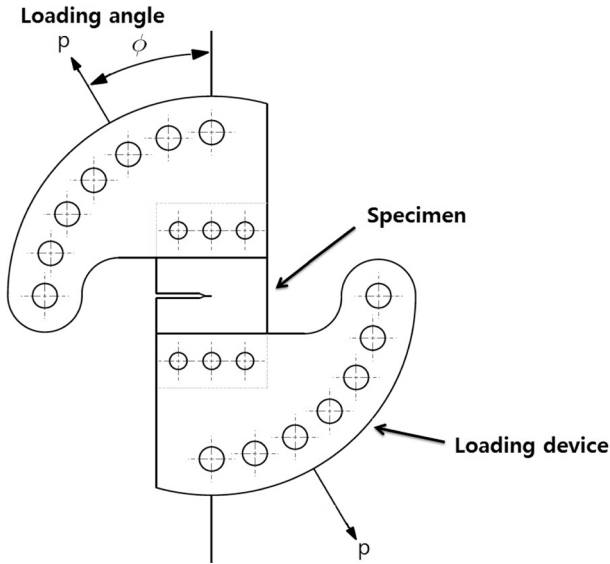


Fig. 3. Schematic representation of mixed mode grip and CTS specimen.

Table 2. Loading ranges for the CTS specimens at different loading angles

Loading angle [deg.]	Initial crack length [mm]	Test Temp.	Loading range R = 0.05 [N]
0	22.64	room temp.	2256.3~112.8
15	22.65	room temp.	2256.3~112.8
30	22.45	room temp.	2256.3~112.8
45	22.47	room temp.	2746.8~137.3
60	22.45	room temp.	3433.5~171.7

하여 균열전파속도( $da/dN$ )가 선형인 구간인 stage II 구간에서의 철도 차륜재의 Paris식을 도출하기 위하여 각각의 하중각에 대하여 다른 작용하중범위를 적용하였으며 그 하중 범위값은 Table 2와 같다.

혼합모드하에서의 응력확대계수를 결정하는 식 (1), (2)의 경우 균열길이  $a$ 에 대한 정의는 Fig. 2의 시편의 끝단에서 균열선단까지의 길이에 해당된다. 하중각이 0도일 경우에는 예비균열길이로부터 동일한 방향으로 전파되고 이때 균열길이는 시편끝단으로부터 연장된 균열 선단까지

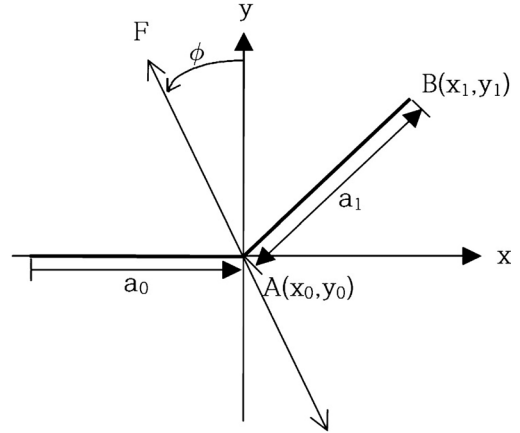


Fig. 4. Incremental growth of an inclined crack.

가 균열길이이다.

그러나 혼합모드 하중조건에서는 앞서 언급했듯이 Fig. 2의 시편에서의 균열은 예비균열길이와 같은 방향으로 전파되지 않고 곡선으로 전파되므로 균열길이  $a$ 를 어떻게 결정할지 불분명하다. 따라서 본 연구에서는 응력확대계수식 (1), (2)를 결정하는데 필요한 균열길이  $a$ 에 대한 정의를 연장된 균열 길이 방법과 투영균열길이 방법을 적용하였다. 예로 모든 혼합모드 시험편은 우선 와이어 방전으로 가공된 노치에서 하중각  $\Phi$ 를 0도로 하여 노치와 동일한 방향으로 예비균열을 Fig. 4의 A위치로 피로시험으로 전파시킨다. 이때 예비균열길이는  $a_0$ 가 된다. 이후 혼합모드 하중조건에서 일정기간의 피로시험으로 균열선단이 예비균열과 다른 방향으로  $a_1$ 만큼 전파되어 B점에 위치하게 된다. Fig. 4와 같이 예비균열  $a_0$  끝에서 꺾인 방향으로 1 mm 미만의 균열증분  $a_1$ 이 발생한 균열에 대하여 전파된 균열길이  $a_{1e}$ 은 연장된 균열길이( $a_{1e}$ )방법과 예비균열길이 방향으로 투영된 균열길이( $a_{1p}$ )방법으로 표현할 경우 다음과 같다.

$$a_{1e} = a_0 + a_1 = x_0 + \sqrt{(x_1^2 + y_1^2)} \quad (4)$$

$$a_{1p} = a_0 + a_1 = x_0 + x_1 \quad (5)$$

그 이후 단계적으로 추가 균열이 전파시에도 이와 동일한 절차를 적용하여 연장된 균열길이( $a_{2e}$ )와 투영된 균열길이( $a_{2e}$ )는 각각 다음과 같이 결정이 가능하다.

$$a_{2e} = a_0 + a_2 = x_0 + \sqrt{(x_2^2 + y_2^2)} \quad (6)$$

$$a_{1p} = a_0 + a_2 = x_0 + x_2 \quad (7)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 혼합모드 피로균열 전파거동

CTS 시험편을 이용하여 하중 각  $\psi$ 를 15°씩 증가시키면

서 일정한 하중상태(응력비 R=0.05)에서 피로실험을 실시하였다. 각 하중 각도에서 사이클 수 증가에 따라 연장된 균열길이방법과 투영된 균열길이방법으로 결정한 균열길이 변화는 각각 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 두 그래프를 통하여 하중각이 커지면서 균열전파속도가 늦어짐을 알 수 있다. 이는 피로균열 전파시 하중각이 증가하면서 모드 II 피로하중에 해당되는 증가된 전단응력크기로 인하여 균열면에 간섭을 받아 균열전파수명은 증가하고 균열 전파속도가 감소되는 것으로 판단된다.

혼합 모드 하중조건에서의 균열전파속도를 평가하기 위하여 Fig. 5와 Fig. 6을 토대로 연장된 균열길이방법과

투영 균열길이 방법을 적용하여 Richard(8)에 의하여 제안된 식(3)에 대한 균열전파속도( $da/dN$ )를 결정한 결과 각각 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다. 모드 I, 즉 하중각 0도에서의 균열전파속도는  $da/dN = 3.3 \times 10^4 (\Delta K_I)^{0.44}$  로 나타났다.

통상적으로 하한계 응력확대계수폭(threshold intensity factor range)은 균열전파속도가 10-9 m/cycle 수준에 해당될 때의 응력확대계수폭으로 정의된다(11). 본 연구의 경우 Fig. 7과 Fig. 8을 통하여 하중각 0도에서 균열전파속도가 8 x 10-10 m/s로 충분히 낮게 도달했다. 일반적으로 하한계 응력확대계수폭은 응력비에 영향을 받으며 정확한 하한계 응력확대계수폭은 응력비 0에서의 응력확대계수

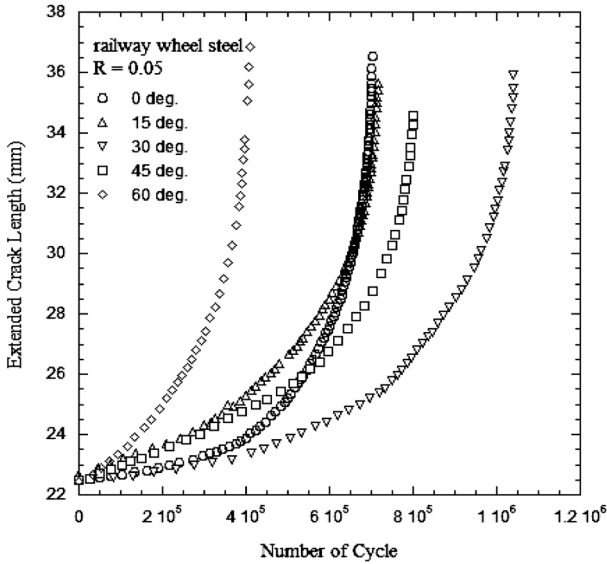


Fig. 5. Extended crack length with increase the number of cycles at R=0.05.

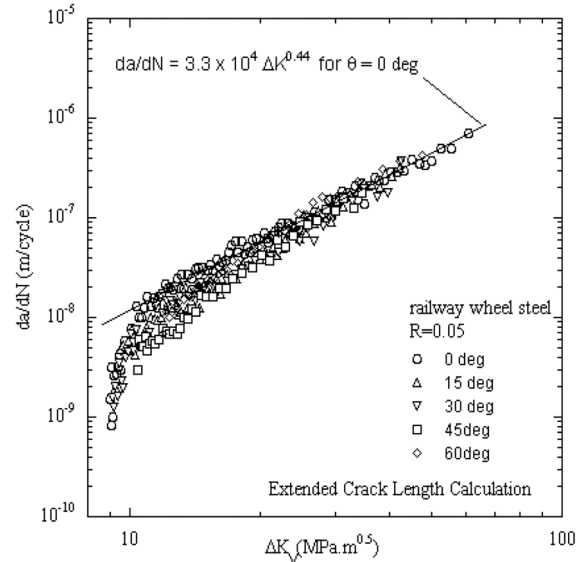


Fig. 7. Fatigue crack growth rates using extended crack length calculation for various loading angles.

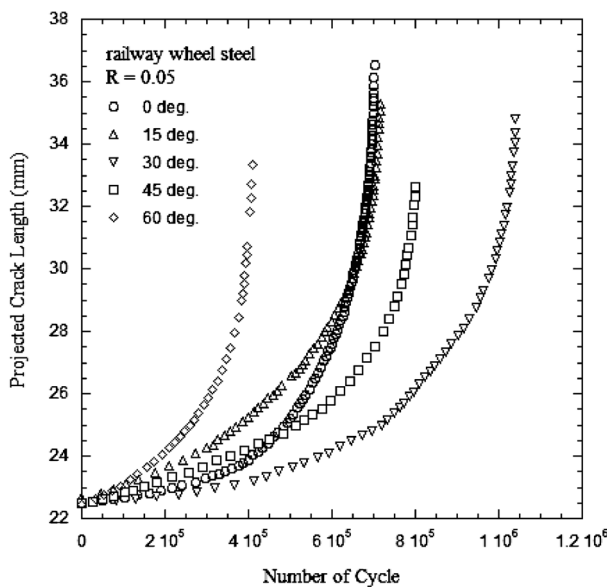


Fig. 6. Projected crack length with increase the number of cycles at R=0.05.

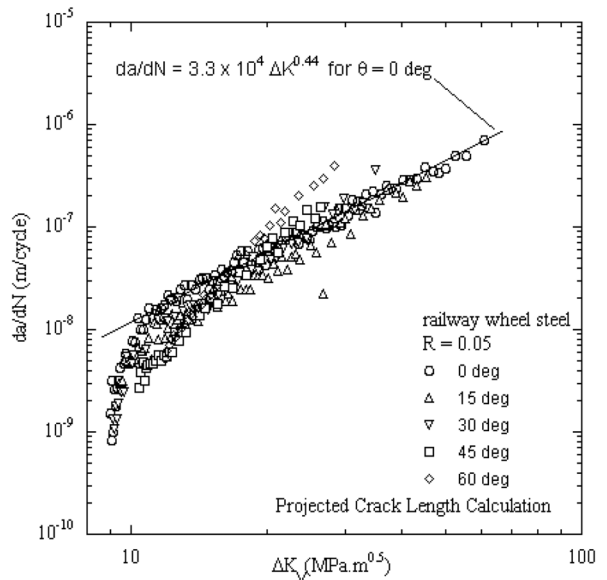


Fig. 8. Fatigue crack growth rates using projected crack length calculation for various loading angles.

쪽에 해당된다. 따라서 본 연구에서는 응력비가 0에 근접한 0.05임을 고려하여 철도 차륜재의 하한계 응력확대계수폭은 약  $9 \text{ MPa}\sqrt{m}$  정도인 것으로 판단된다.

Fig. 7 및 Fig. 8을 통하여 두 가지의 주목할 결과를 확인하였다. 첫째로 균열길이를 정의시 투영길이 방법에 비하여 연장된 균열길이 방법이 하중각의 변화에도 불구하고 하중각 0도에서의 피로균열전파속도 선도에 비교적 일치함을 알 수 있다. 즉 하중각을 달리하는 혼합모드 하중 조건에서도 균열길이를 연장된 길이로 가정하여 등가 응력확대계수 폭을 적용하면 균열전파속도를 정확하게 예측할 수 있다. 그러나 균열길이를 투영 길이로 가정하여 등가 응력확대계수 폭을 적용하면 균열전파속도는 전반적으로 하중각이 증가할수록 하중각 0도에서의 피로균열전파속도보다 증가하는 경향을 나타내고 있다.

두 번째는 균열길이를 연장된 길이방법을 적용시 하중각의 변화에도 불구하고 균열이 증가하면서 균열전파속도가 하중각 0도에서의 피로균열전파속도 선도에 접근함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 다른 연구(5)에서도 보고되고 있다. 이와 같은 이유는 균열길이가 짧을 경우나 하중각이 클수록 KII의 영향은 크기 때문이다. 균열길이가 짧을 때는 KI의 크기가 균열의 표면을 완전히 개방(open)할 만큼 충분하지 않은 관계로 모드 II 하중의 전단효과에 의해 마찰이 발생하여 균열전파속도를 느리게 한다. 그러나 곡선으로 균열이 성장하면서 모드 I이 주도가 되어 마찰효과가 감소하는 것으로 알려져 있다. 즉 균열길이가 증가하면서 거칠기 유기 균열단합(roughness-induced crack closure)에 의한 효과가 감소하게 된다(5). 따라서 균열길이가 증가하면서 혼합모드 하중조건에서의 균열전파는 모드 I하중이 주도되는 방향으로 성장하는 것으로 판단된다.

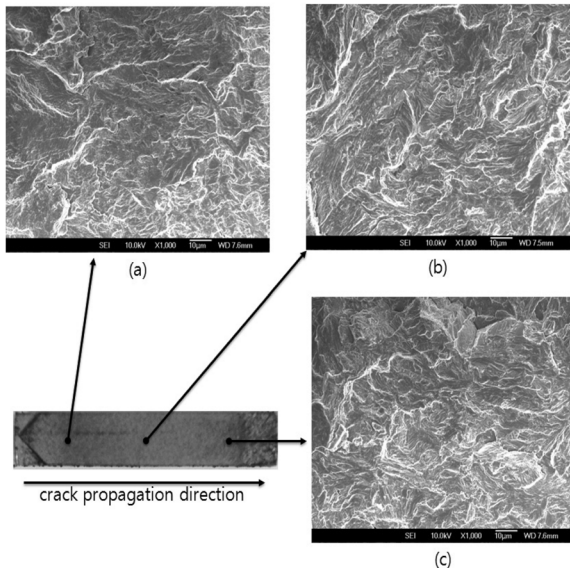


Fig. 9. SEM image of fracture surface of the railway wheel steel for the loading angle of  $0^\circ$  at the location of extended crack length (a)  $a=25 \text{ mm}(\Delta KI=10.4 \text{ MPa}\sqrt{m})$ , (b)  $a=30 \text{ mm}$ , (c)  $a=35 \text{ mm}$ .

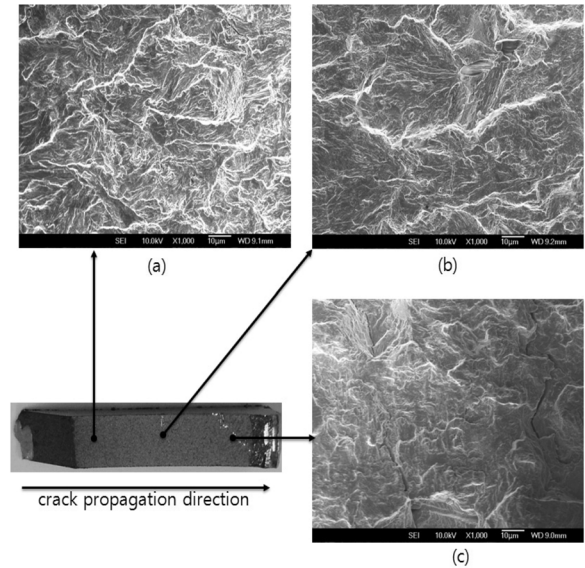


Fig. 10. SEM image of fracture surface of the railway wheel steel for the loading angle of  $60^\circ$  at the location of extended crack length (a)  $a=25 \text{ mm}(\Delta KI=9.12 \text{ MPa}\sqrt{m}, \Delta KII=6.96 \text{ MPa}\sqrt{m})$ , (b)  $a=30 \text{ mm}$ , (c)  $a=35 \text{ mm}$ .

### 3.2. 표면해석

피로실험 후 피로 파단된 표면을 관찰하기 위하여 Joel사의 주사형 현미경(SEM, Scanning Electronic Microscope, Model JSM 6400)을 사용하였다. 하중각 0도 즉, 모드 I에서의 대표적인 피로파단면의 양상은 Fig. 9와 같다. 모드 I에서는 균열이 발생하는 초기에는 파단면의 거칠기(roughness)가 비교적 작으나 균열 길이가 증가하면서 거칠기가 증가하는 양상을 나타내고 있다.

한편 혼합모드 하중조건에서는 모든 각도의 시험편에서 균열길이가 증가하면서 파면의 거칠기는 상대적으로 감소함을 알 수 있다. Fig. 10은 하중각 60도에서의 피로파단면으로 균열 길이가 증가하면서 파단면의 양상을 변화를 나타내고 있다. 초기 길이에서는 KI/KII의 비가 높아서 상대적으로 높은 전단응력 존재한다. 이와 같은 이유로 인하여 초기에는 균열이 전파시 균열 상하 파면이 좀 더 많은 접촉이 발생하고 표면 거칠기 유기 균열단합(roughness-induced crack closure)현상을 야기시킨다.

또한 파단면 양상은 거칠기가 상대적으로 큰 것으로 나타난다. 그러나 모든 각도의 시험편에서 균열길이가 증가하면서 전단응력 성분이 감소하며 결과적으로 인장응력 성분이 증가된다. 이로 인하여 균열 파면은 열리는(open) 경향을 띄며 균열 표면간의 간섭은 감소하게 된다. 따라서 결과적으로 파면은 상대적으로 초기 표면에 비하여 거칠기가 감소하는 파면으로 변화됨을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 철도 차륜재에 대한 모드 I 및 혼합모드 하중조건에서 피로파괴시험을 실시하였다. 차륜재의 격인

균열길이를 각각 연장된 길이와 투영 길이방법을 적용하여 균열전파속도를 결정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모드 I 하중상태의 경우 정상상태의 II 영역에서 균열전파속도는  $da/dN = 3.3 \times 10^4 (\Delta K_V)^{0.44}$  로 나타났다.
- 2) 투영길이 방법에 비하여 연장된 길이 방법이 하중각의 변화에도 불구하고 하중각 0도에서의 피로균열전파속도 선도에 비교적 일치함을 알 수 있다.
- 3) 혼합모드 하중상태에서의 피로균열전파속도는 균열길이를 연장길이 방법을 적용시 하중각의 변화에도 불구하고 균열이 증가하면서 균열전파속도가 하중각 0도에서의 피로균열전파속도 선도에 접근함을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 균열길이가 증가하면서 혼합모드 하중조건에서의 균열전파는 모드 I하중이 주도되는 방향으로 성장하는 것으로 판단된다.
- 4) 혼합모드 하중 조건의 모든 하중각 시험편에서 파단면이 균열길이가 증가하면서 파단면의 거칠기는 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 균열이 증가하면서 KI/KII의 비는 감소하여 파단면의 거칠기는 상대적으로 감소하는 것이 관찰되었다.

**감사의 글 :** 이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

- 1) J. W. Kannel and J. L. Tevaarwerk, "Subsurface Stress Evaluations Under Rolling/Sliding Contacts", J. Tribol. Vol. 106, pp. 96~103, 1984.
- 2) O. Orringer, W. R. Paxton, D. E. Gray and P. K. Raj, "Residual

Stress and Its Consequences on Both Sides of the Wheel-Rail Interface", Wear, Vol. 191, pp. 25~34, 1996.

- 3) M. Sraml, J. Flasker and I. Potrc, "Numerical Procedure for Predicting the Rolling Contact Fatigue Crack Initiation", Int. J. Fatigue, Vol. 25, pp. 585~595, 2003.
- 4) Y. Liu, L. Liu and S. Mahadevan, "Analysis of Subsurface Crack Propagation Under Rolling Contact Loading in Railroad Wheels Using FEM", Eng. Frac. Mech., Vol. 74, pp. 659~674, 2007.
- 5) L. P. Borrego, F. V. Antunes, J. M. Costa and J. M. Ferreira, "Mixed-Mode Fatigue Crack Growth Behaviour in Aluminium Alloy", Int. J. Fatigue, Vol. 28, pp. 618~626, 2006.
- 6) J. Qian and A. Fatemi, "Multiaxial Fatigue of an Induction Hardened Shaft", AE-28, T. Cordes and K. Lease(Ed), SAE, pp. 165~174, 1999.
- 7) H. A. Richard, "Some Theoretical and Experimental Aspects of Mixed Mode Fractures", Advances in Fracture Research (Fracture 84), Vol. 5, pp. 3337~3344, 1986.
- 8) K. Tanaka, "Fatigue Crack Propagation from a Crack Inclined to the Cyclic Tensile Axis", Eng. Fracture Mech., Vol. 6, pp. 493~507, 1974.
- 9) J. Qian and A. Fatemi, "Mixed Mode Fatigue Crack Growth: A Literature Survey", Eng. Frac. Mech., Vol. 55, No. 6, pp. 969~990, 1996.
- 10) M. Sander and H. A. Richard, "Experimental and Numerical Investigations on the Influence of the Loading Direction on the Fatigue Crack Growth", Int. J. Fatigue, Vol. 28, pp. 583~591, 2006.
- 11) J. H. Bulloch, "The Influence of Mean Stress or R-Ratio on the Fatigue Crack Threshold Characteristics of Steel~ A Review", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 47 pp. 263~292, 1991.