

# Circular Notched Bar (CNB) Specimen 의 초기노치형상 변화에 의한 균열진전거동 및 파단수명 해석

## Crack propagation behavior and fracture life analysis by change the shape of initial notch of Circular Notched Bar (CNB) Specimen

\*조용건<sup>1</sup>, 김일현<sup>1</sup>, #최병호<sup>2</sup>, 이정무<sup>3</sup>

\*Y. J. Zhzo<sup>1</sup>, I. H. Kim<sup>1</sup>, #B. H. Choi (bhchoi@korea.ac.kr)<sup>2</sup>, J.M. Lee<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> 고려대학교 대학원, <sup>2</sup> 고려대학교 기계공학부, <sup>3</sup> LG 화학 테크센터

Key words : Circular Notched Bar (CNB), FEM, Initial notch, Fracture life analysis, Crack propagation

### 1. 서론

Circular Notched Bar (CNB) 시험편은 크립이나 피로거동을 관찰하기 위하여 사용되는 Single Edge Notched Tension (SENT) 시험편에 비해 많은 장점이 있는데, 특히 CNB 를 이용하면 균열선단에 3 축 응력상태를 발생시켜 가속시험이 가능하게 한다. 그러나 CNB 는 초기노치 가공 시 오차와 시험편 재질의 불균일성으로 인하여 초기 노치형상이 일정하지 못한 경우가 많다. 그러므로 CNB 을 이용하여 실험한 결과 Fig. 1 (b) 과 같이 균열이 심한 편심원의 형태로 진전하는 경우가 많다. 본 연구에서는 다양한 초기 노치형상 변화에 의한 피로 균열진전거동을 유한요소해석을 이용하여 최종 파단수명에 어떠한 영향을 갖는지에 대하여 연구를 하고자 한다.



(a) Symmetric crack (b) Asymmetric crack

Figure. 1 Fracture surfaces from CNB specimens : (a) Symmetric crack propagation (b) Asymmetric crack propagation

### 2. 해석조건 및 유한요소모델

Fig. 2 에서는 모델링에 사용된 두 가지 초기 노치형상을 나타내었다. Fig. 2 (a) 는 편심인 원형 형상이며 Fig. 2 (b) 는 중심이 동일한 타원형형상이다. Table 1 의 Case I 과 Case II 와 같은 조건하의 초기 노치형상에 대하여 해석을 수행하였다. Case I 은 편심원의 초기노치 형상으로서 반지름  $r = 4$  mm, 편심거리  $e = 0.1, 0.2, 0.3$  mm 로 정하였으며 Case II 는 동심인 타원형초기 노치형상으로서 반지름  $r = 4$  mm,  $b = 0.1, 0.2, 0.3$  mm 로 정하였다.

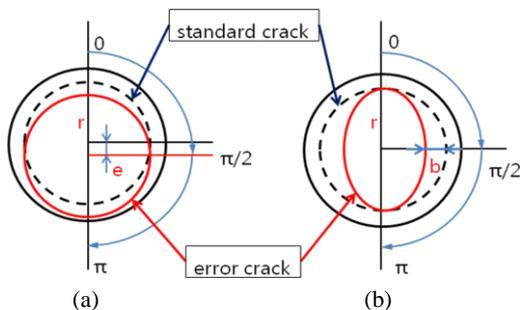


Figure. 2 The shape of initial crack: (a) Asymmetric circular crack, (b) Symmetric elliptical crack

Table 1 Initial notch geometry conditions

|         | r (mm) | e (mm)        | b (mm)        |
|---------|--------|---------------|---------------|
| Case I  | 4      | 0.1, 0.2, 0.3 | 0             |
| Case II | 4      | 0             | 0.1, 0.2, 0.3 |

두 경우 모두 초기노치 선단의 응력확대계수 (SIF) 값이 서로 다르지만 각 값들은 서로 연속적으로 변화하므로 Fig. 2 에서와 같이 노치형상을  $0, \pi/8, \pi/4, 3\pi/8, \pi/2, 5\pi/8, 3\pi/4, 7\pi/8, \pi$  에 위치하여 있는 지점을 관찰지점으로 정하고  $K_I$  값을 계산하였다. 그리고 식 (1) 에서 Table 2 와 같이 상수  $C = 10^{-11.6}$ ,  $m = 4$  로 일반적인 PE 의 경우를 가정하여 결정하였다. 매 10 만 cycles 에서 균열진전길이 (a) 를 구하였으며 기본 Point 의 접선에 수직 방향을 균열진전방향으로 하여 균열을 진전시켰다. 모든 초기노치의 형상은 노치의 어느 한 Point 가  $K_I = K_{Ic}$  이면 파단으로 추정하고 그때의 N 의 값을 파단수명으로 정하였다.  $K_{Ic}$  은 실험중에 가장 Symmetric 하게 파단된 단면을 관찰하여 순간적으로 파단 되는 시점과 초기노치와의 거리를 측정후 식 (2) 로부터 계산하였다. 그 결과  $K_{Ic} = 75.70391 \text{ MPamm}^{1/2}$  였다.

$$\text{Paris' equation : } \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

$$\Delta K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{b}{R}\right)$$

$$f\left(\frac{b}{R}\right) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{R}\right) + \frac{3}{8} \left(\frac{b}{R}\right)^2 - 0.363 \left(\frac{b}{R}\right)^3 + 0.731 \left(\frac{b}{R}\right)^4 \right] \quad (2)$$

Table 2 Physical properties of the material for FEM

| E (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\nu$ | C            | m |
|---------|------------------|-------|--------------|---|
| 1250    | 10.8             | 0.3   | $10^{-11.6}$ | 4 |

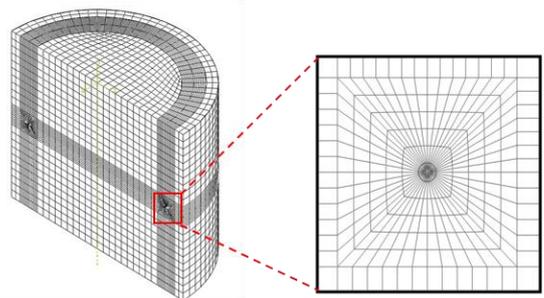


Figure. 3 FEM model with crack tip mesh

Fig. 3 은 본 연구에서 사용된 half FEM model 과 구성된 Crack tip 에서의 Mesh 형상이다. Elements type 은 C3D20 (A 20-node quadratic brick) 를 사용하였으며 총 33,054 개의 Elements 와 136,575 개의 Node 를 사용하였다. 해석조건으로는 Table 2 와 같이 탄성계수  $E = 1250$  MPa 이고 푸아송의 비  $\nu = 0.3$  이며 응력  $\sigma = 10.8$  MPa 이다.

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig. 4 에서는 Abaqus 6.7 를 이용하여 얻은  $K_I$  값과 이론적  $K_I$  값 (식 2 를 이용하여 계산한 값) 을 비교한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두  $K_I$  값이 거의 일치하였다.

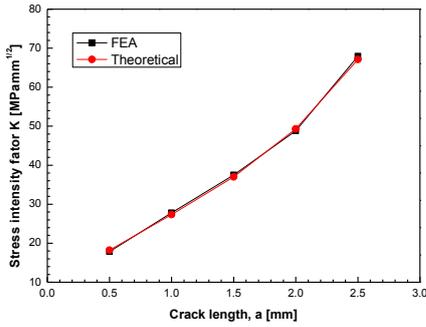


Figure. 4 SIF compared from FEM and analysis solution

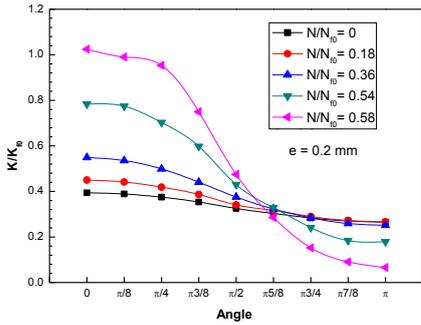


Figure. 5 SIF versus angle in case I, e = 0.2 mm

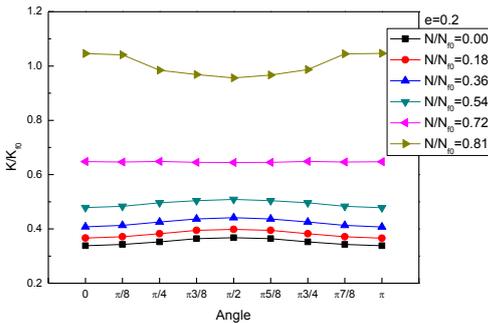


Figure. 6 SIF versus angle in case II, b = 0.2 mm

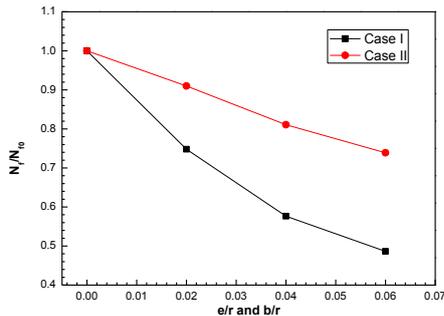


Figure. 7 The variation of total lifetime in Case I and Case II

Fig. 5 는 Case I 에서  $e = 0.2 \text{ mm}$  일 때 각도에 대한  $K_I$  값의 변화를 균열진전 단계에 따라 나타내었다. 그림에서 보면 각도가  $5\pi/8$  전에서는 균열이 진전함에 따라  $K_I$  값은 전체적으로 커지며 특히 각도가 0 에서 증가하는 폭이 매우 컸었다. 그러나 각도가  $5\pi/8$  후에는 반대로 균열이 진전함에 따라  $K_I$  값은 작아졌다. 이것은 Case I 의 경우 균열이 진전할수록 더 심한 편심으로 인하여 한쪽에서 균열 단합 현상이 일어나기 때문이다. Case I 은  $e = 0.1, 0.3\text{mm}$  일 때 각도에 대한  $K_I$  값의 변화는  $e = 0.2 \text{ mm}$  일 때와 같은 경향을 보였지만 균열의 편심진행 및 진전속도의 차이가 관찰되었다. Fig. 6 에는 Case II 에서  $b = 0.2 \text{ mm}$  일 때 각도에 대한  $K_I$  값의 변화를 균열진전 단계에 따라 나타내었다.  $N/N_0 = 0.72$  까지는 초기노치형상의  $\pi/2$  위치에서  $K_I$  값이 제일 크며 양쪽으로 가면서 점차 작아진다. 그러나

$N/N_0 = 0.81$  부터는 역전의 현상이 일어나면서 양쪽 방향인  $0, \pi$  에서  $K_I$  값이 제일 크며  $\pi/2$  로 가면서 점차 작아졌다. 즉 처음에는 위치  $\pi/2$  에서 균열이 더 빨리 진전을 하지만 어느 순간부터는 양쪽  $0, \pi$  위치에서 더 빨리 진전을 하였다. Case II 의  $b = 0.1, 0.2 \text{ mm}$  일 때의 각도위치에 따른  $K_I$  값 변화는  $b = 0.2 \text{ mm}$  와 비슷한 경향성을 보였지만 역전하는 균열진전단계가 서로 다르며 각각  $N/N_0 = 0.90$  과  $N/N_0 = 0.72$  에서 역전현상이 일어났다. Fig. 7 은 Case I 과 Case II 를  $e$  와  $b$  의 크기에 따른 파단수명을 나타내었다. 그림에서 보면 Case I 이 Case II 보다  $K$  값이 더 급격하게 변하는 것을 보아 편심된 원이 동심인 타원형보다 최종파단수명에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. Case I 에서  $e = 0$  와  $e = 0.3 \text{ mm}$  의 최종파단수명은 50% 정도 차이났으며 Case II 에서  $b = 0$  과  $b = 0.3 \text{ mm}$  의 최종파단수명은 25% 정도 차이를 나타내었다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 해석상에서 얻은 CNB 시편 단면에서의 균열진전 거동을 나타낸다. Fig. 8 에서 볼 수 있는 것처럼  $5\pi/8$  전에 균열은 가속도로 진전하지만  $5\pi/8$  후의 균열은 점점 더 느리게 진전함을 알 수 있다. Fig. 9 에서는 Fig. 6 의 관찰양상을 확인할 수 있다.

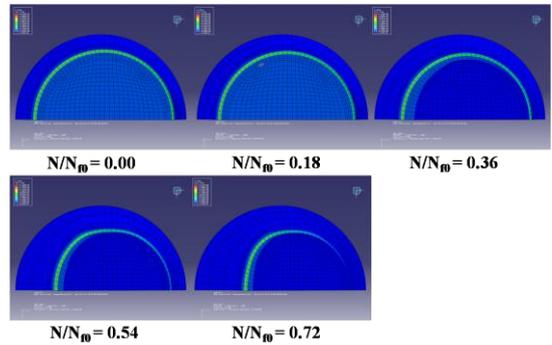


Figure. 8 Simulation of the crack propagation in case I (e = 0.2)

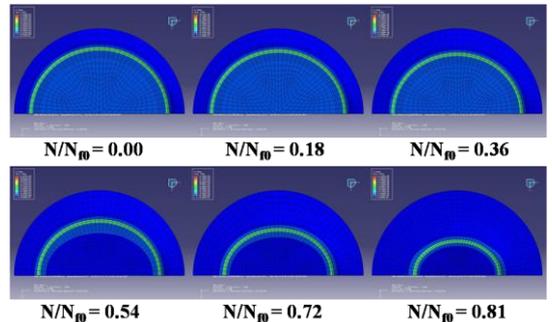


Figure. 9 Simulation of the crack propagation in case II (b = 0.2)

#### 4. 결론

본 연구에서는 FEM 을 이용하여 CNB 시험편의 두 형태의 초기 노치형상 변화에 대하여 피로균열거동을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Case I 에서는 노치형상의  $5\pi/8$  위치를 기준으로 이전의 균열진전은 진전할수록 가속하는 반면, 이후의 균열진전은 감속하는 것으로 나타났다. 따라서  $5\pi/8$  위치 전에 균열진전이 최종파단수명에 큰 역할을 하며 편심거리  $e$  가 커짐에 따라 노치형상의 한쪽에서 더 빠른 균열진전으로 인하여 최종파단수명이 급격히 감소된다.  $e = 0$  일 때와  $e = 0.3 \text{ mm}$  의 최종파단 수명은 50% 정도 차이가 관찰되었다.

(2) Case II 에서는 처음에는 노치형상의 가운데 즉  $\pi/2$  위치에서 빠른 속도로 균열이 진전하지만 어느 순간부터는 역전의 현상이 일어나면서 양쪽  $0$  과  $\pi$  위치에서 더 빠르게 균열이 진전하였다. 그리고  $b$  가 커지면서 균열진전속도가 역전되는  $N/N_0$  가 서로 다르며, 더 낮은 균열진전단계에서 역전현상이 일어났다.  $b = 0$  일 때와  $b = 0.3 \text{ mm}$  의 최종파단 수명은 25% 정도 차이가 관찰되었다.