

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

*조용건¹, 김일현¹, #최병호², 이정무³

*Y. J. Zhzo¹, I. H. Kim¹, #B. H. Choi (bhchoi@korea.ac.kr)², J.M. Lee³
¹ 고려대학교 대학원, ² 고려대학교 기계공학부, ³ 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 타원형상이다. 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.

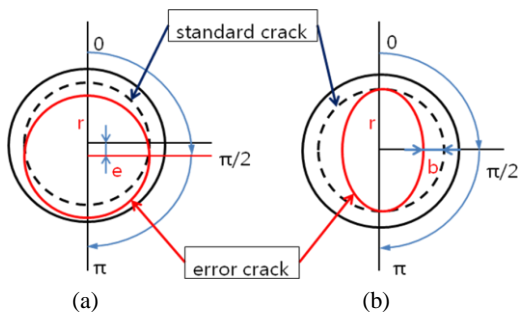


Figure. 2 The shape of initial crack: (a) Asymmetric circular crack, (b) Symmetric elliptical crack

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 $K_{Ic} = 75.70391$ 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)	σ_y (MPa)	ν	C	m
1250	10.8	0.3	$10^{-11.6}$	4

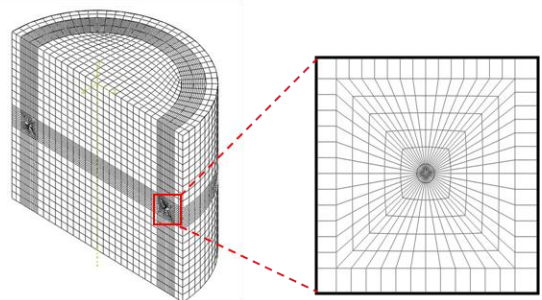


Figure. 3 FEM model with crack tip mesh

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.

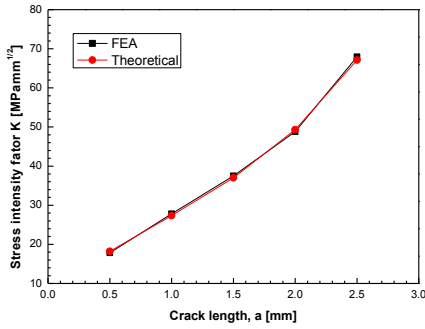


Figure. 4 SIF compared from FEM and analysis solution

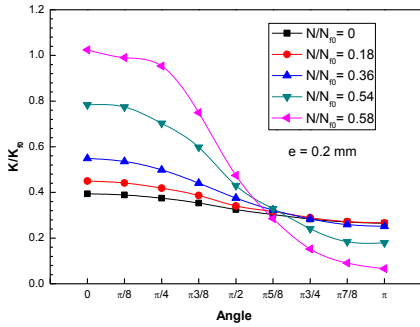


Figure. 5 SIF versus angle in case I, e = 0.2 mm

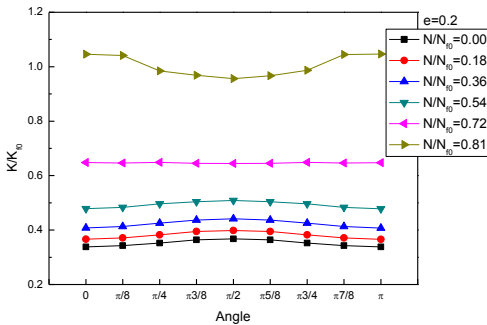


Figure. 6 SIF versus angle in case II, b = 0.2 mm

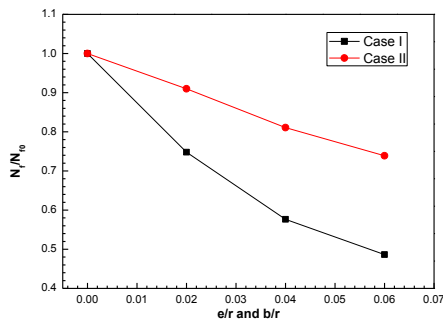


Figure. 7 The variation of total lifetime in Case I and Case II

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.

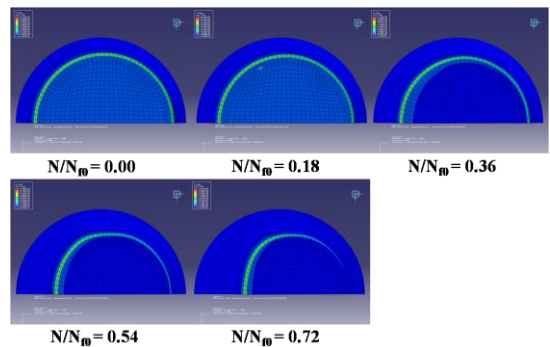


Figure. 8 Simulation of the crack propagation in case I (e = 0.2)

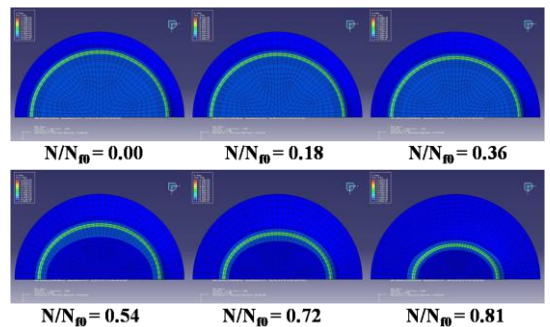


Figure. 9 Simulation of the crack propagation in case II (b = 0.2)

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 π 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.