

취성재료의 V-노치에 대한 혼합모드 파괴기준

On Mixed Mode Fracture Criterion for sharp V-notches in a Brittle Material

*이현우¹, 김진광², #조상봉²

*H. W. Lee¹, J. K. Kim², #S. B. Cho(sbcho@kyungnam.ac.kr)²

¹경남대학교 대학원 기계공학과, ²경남대학교 기계자동차공학부

Key words : Maximum circumferential stress criterion, PMMA, RWCIM, Sharp V-notch, Stress intensity factor

1. 서론

균열이나 V-노치(V-notch)와 같이 결함이 있는 구조물이 하중을 받고 있는 경우 응력 집중이 있는 부분에서 균열이 발생하고 성장 거동하게 되는데 노치 선단에서의 응력이 무한대로 발산하는 응력특이성(stress singularity)으로 인해 균열이 발생하여 파괴가 일어난다.

균열 문제를 포함한 V-노치 문제에 대한 파괴역학적 강도평가법의 확립을 위하여 구조물의 기하학적 형상에 따라 결정되는 응력특이성 지수인 고유치에 관한 연구와 외부에서 가해지는 하중 조건들에 따라 결정되어지는 응력강도계수인 고유벡터에 관한 연구로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 연구를 바탕으로 최대원주응력기준(maximum circumferential stress criterion)을 확장하고, Seweryn¹의 파괴기준을 적용하여 V-노치 혼합모드 문제의 파괴기준을 제시하고자 한다. 실험을 통하여 이를 입증하기 위하여 V-노치에 대한 두 가지 하중형상(Mode I, Mode II)이 혼합된 혼합모드 형태의 실험을 한다. FEA(finite element analysis)를 이용하여 Stern²이 제시한 상반일경로적분법³(RWCIM: reciprocal work contour integral method)을 적용하여 본 연구에서 제시한 파괴기준에 의한 파괴인성과 균열진전방향의 결과와 실험결과를 비교 검토하는데 목적이 있다.

2. 취성재료의 V-노치에 대한 파괴기준

취성재료의 파괴기준으로 원주응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 가 최대인 방향으로 균열이 발생하는 최대원주응력기준을 확장하여 “ $r = d_0$ 에서 원주응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 가 최대인 방향으로 균열이 발생한다.” 로 가정하고, Seweryn¹의 파괴기준을 적용하면 V-노치 혼합모드 문제에서 다음과 같다.

$$\int_0^{d_0} \sigma_{\theta\theta\max} dr = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[K_I^n f_{\theta\theta}^I(\theta_0) d_0^{\lambda_1} \frac{1}{\lambda_1} + K_{II}^n f_{\theta\theta}^{II}(\theta_0) d_0^{\lambda_2} \frac{1}{\lambda_2} \right] = \sigma_c d_0 \quad (1)$$

여기서 σ_c 는 재료의 인장극한강도이며 d_0 는 재료의 물성치로 식(2)와 같이 정의된다. 또한 λ_1, λ_2 및 K_I^n, K_{II}^n 는 각각 V-노치의 mode I, II에 해당하는 고유치와 응력강도계수이다.

$$d_0 = \left(\frac{2K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 K_{Ic} 는 임계파괴강도계수이다. 식(2)를 Seweryn의 파괴기준에 의한 식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2\lambda_1} \left(\frac{K_I^n}{K_{Ic}} \right) f_{\theta\theta}^I(\theta_0) \left(\frac{2K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \right)^{2\lambda_1-1} +$$

$$\frac{1}{2\lambda_2} \left(\frac{K_{II}^n}{K_{Ic}} \right) f_{\theta\theta}^{II}(\theta_0) \left(\frac{2K_{Ic}}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \right)^{2\lambda_2-1} = 1 \quad (3)$$

균열진전 방향은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = g(d_0, \theta_0, K_I^n, K_{II}^n) = 0 \quad (4)$$

식(3), (4)에 의해 V-노치 문제의 혼합 모드에 대한 파괴기준이 결정된다.

3. 실험방법

실험재료는 선형파괴역학 실험에 적합한 취성재료로 PMMA(Polymethyl methacrylate)를 선택하였다. 시편 고정장치는 혼합모드형태의 하중을 가할 수 있도록 하였고, 하중각을 $\gamma = 0^\circ$ (mode I), $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ (mode II)로 변경할 수 있다. 시편의 V-노치각은 $2\beta = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 의 5종류로 만들고 폭(W) 40mm, 길이 140mm, 노치길이(a)는 20mm, 두께(t) 5mm로 하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하중각과 노치각을 달리 하면서 실험하였다.

4. 유한요소해석

상반일경로적분법에 이용한 V-노치부위의 응력과 변위는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.6으로 해석한 결과이다. 유한요소해석에 필요한 PMMA의 물성치는 표준시험편을 실험한 Table 1의 결과와 같다. Fig. 2와 같이 V-노치 시편을 모델링하였고, 하중은 시험편의 3개 구멍에 강제요소로 연결한 후 집중 하중 F를 가하였다. 구속조건으로 V-노치부의 끝에 X, Y 방향의 변위 구속조건을 부여하였다. V-노치부의 해석결과를 RWCIM방법에 적용시키기 위해서 Fig. 2 Detail의 바깥쪽 반경 4mm 지점의 응력과 변위를 이용하였다.

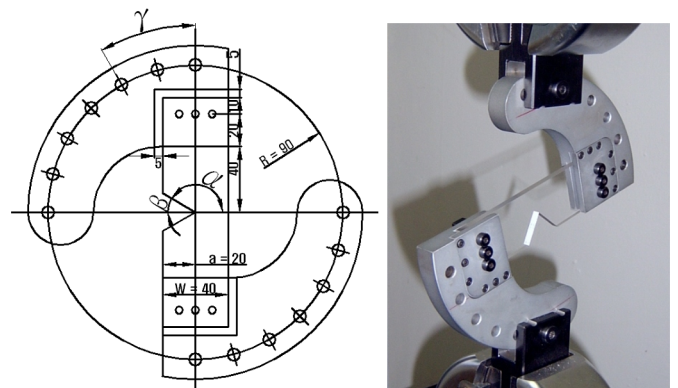


Fig. 1 Photograph and configuration of the loading fixture with a V-notch specimen.

Table 1 Mechanical properties of PMMA

Tensile strength, σ_c	Yielding strength, σ_y	Young's modulus, E	Poisson's ratio, ν
62 ± 5 MPa	39 ± 2 MPa	3.4 ± 0.1 GPa	0.36

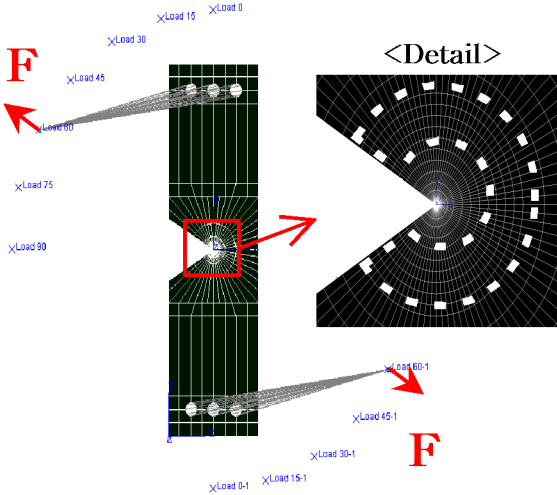


Fig. 2 FEA modeling of a V-notch specimen

MATHEMATICA 5.2를 이용하여 프로그램한 RWCIM법으로 각 고유치에 대한 미결정 계수벡터를 구할 수 있고, 구해진 계수벡터로부터 응력강도계수를 구할 수 있다.

5. 실험결과

PMMA재료의 V-노치 시험편에 대한 노치각도 별로 하중각을 달리하여 실험과 더불어 유한요소해석을 하였다. Fig. 2는 노치각도 별로 하중각을 달리하여 실험한 파괴하중 결과이다. Fig. 2에서 보면 노치각이 일정할 때에 mode II의 영향이 커지면 파괴하중이 증가함을 알 수 있다. Mode I일 때는 노치각도에 변화에도 파괴하중의 변화가 크지 않다. Mode II로 갈수록 노치각도의 변화에 따라 즉 노치각도가 클수록 파괴하중이 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 3은 제시한 파괴기준에 따른 대표적으로 노치각 15° 의 이론적 예측 임계강도계수와 실험결과를 나타낸 것이다. 이론적 예측치가 실험치보다 노치각도가 작을 때에 차이가 크다. 이는 시험편의 기계가공으로 인한 예리한 노치부를 표현하는데 어려

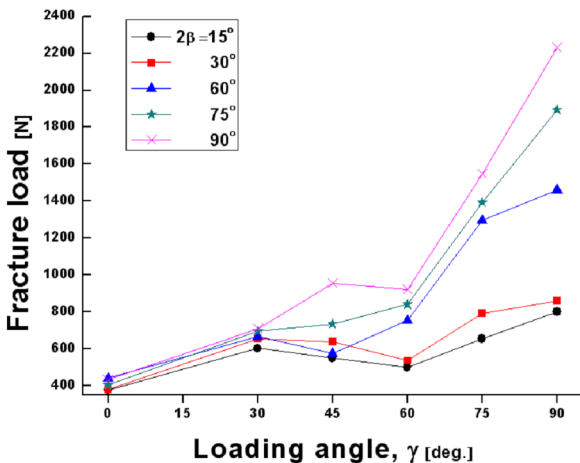


Fig. 2 Experimental fracture load under mixed mode loading.

Table 2 Experimental crack orientation under mixed mode loading

Notch angle, 2β	Loading angle, γ					
	0°	30°	45°	60°	75°	90°
15°	0°	38°	50°	56°	60°	67°
30°	0°	38°	50°	53°	62°	64°
60°	0°	33°	40°	49°	61°	59°
75°	0°	30°	41°	46°	58°	61°
90°	0°	28°	42°	43°	59°	48°

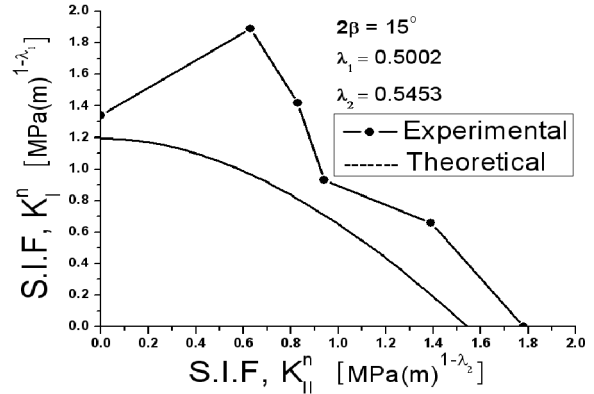


Fig. 3 Predicted fracture curves and experimental critical stress intensity factors under mixed mode loading($2\beta = 15^\circ$)

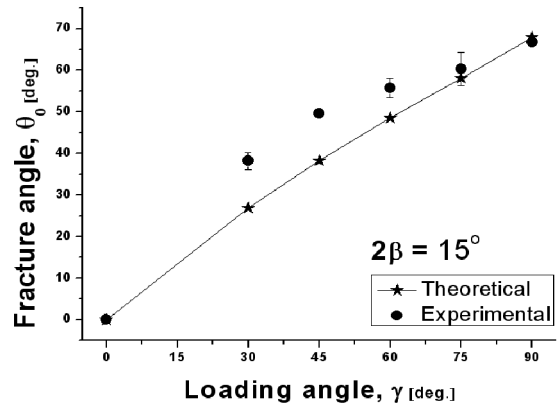


Fig. 4 Predicted and experimental crack orientation under mixed mode loading($2\beta = 15^\circ$)

움이 있었기 때문이다. Table 2는 노치각에 대한 균열진전방향 θ_0 을 실험과 이론적 예측치를 나타낸 것이다. Fig. 4는 대표적으로 노치각 15° 에 대한 균열진전방향 θ_0 의 실험과 이론적 예측치를 나타낸 것이다. 실험결과가 이론치에 비해 약간씩 높게 나타나는 경향을 볼 수 있으나 큰 차가 없다고 할 수 있을 것이다. Fig. 3에 언급된 λ_1, λ_2 는 V-노치 15° 의 mode I, mode II에 해당하는 고유치들이다.

6. 결론

최대원주응력 파괴기준을 확장하고 Seweryn¹의 파괴기준을 적용하여 취성재료의 V-노치에 대한 혼합모드 파괴기준을 제시하였다. 제시한 파괴기준에 의한 이론적 예측 파괴인성과 균열진전 방향이 실험결과와 잘 맞는지 확인하였다. 이론적 예측결과와 실험결과에 다소의 차이는 있지만 신뢰할 만한 파괴기준이라 평가된다.

참고문헌

1. Seweryn, "A Brittle fracture criterion for structures with sharp notches," Engineering Fracture Mechanics, 47, 673-681, 1994. 이하 참고문헌생략