

노치/균열 임계평균응력 파손모델을 이용한 임계노치반경 평가

김재훈*, 김덕희, 김기수(충남대학교), 안병욱(한밭대학교)

Evaluation of Critical Notch radius
using Notch/Crack Critical Average Stress Fracture Model

J. H. Kim, D. H. Kim, K. S. Kim (Chungnam National University),
B. W. Ahn (Hanbat National University)

ABSTRACT

In this study, intrinsic static/dynamic fracture toughness of Al 7175-T74 are evaluated from the apparent static/dynamic toughness of notched specimen. The notch/crack critical average stress fracture model is suggested to establish the relationship to predict the intrinsic fracture toughness from the apparent fracture toughness of a notched specimen. The notch/crack critical average stress fracture model is established using the relation between the notch root radius and the effective distance calculated by finite element analysis. It is conclude that the true fracture toughness can be estimated from test results of apparent fracture toughness measured by using a notched specimen. Also, critical notch root radius can be predicted by notch/crack critical average stress fracture model.

Key Words : Intrinsic fracture toughness (파괴인성), Apparent fracture toughness (겉보기파괴인성), Critical notch root radius (임계노치반경), Notch/crack critical average stress fracture model(노치/균열 임계평균응력 파손모델), Dynamic fracture toughness (동적파괴인성)

1. 서론

현재 널리 이용되고 있는 파괴인성 시험법들은 오랜 기간의 검증을 통해 ASTMTM등에 의해 표준화되었다. 그러나, 이러한 표준 시험법들은 시편의 크기 및 형상에 대해 일정한 조건을 요구하고 있어, 방사선 조사제와 같이 얻을 수 있는 재료의 크기와 양에 제한이 있거나 소재의 국부적인 영역에서 파괴특성을 평가할 경우에는 많은 어려움이 있다. 이와 같은 시험편 크기 제한은 소형 시험편을 이용하여 해결할 수 있다.

소형 시험편을 이용하는 경우에는 이상적인 파괴에 비해 균열을 생성하기가 어려운 단점이 있다. 따라서, 노치 시험편에서 얻은 파괴인성과 균열 시험편에서 얻은 파괴인성이 거의 비슷한 수준의 값을 갖는 임계노치반경(critical notch radius)을 결정할 수 있다면, 기계적 가공에 의한 시험편 만으로 쉽게 파괴인성을 예측할 있어 퀴칭 및 열성재료의 파괴인성 평가에 매우 유용하게 사용할 수 있다. 이런 이유들로 인하여 노치반경 변화가 파괴인성에 미치는 영향을 평가

하고자 하는 연구들이 수행되었다. 그러나, 기존 연구들은 미세 조직, 재료를 크게 통과 같이 균열 개시에 미치는 인자들에 대한 시험적, 경험적 연구들이 대부분이다. 현재까지 노치 시험편의 겉보기 파괴인성과 파괴인성과의 상관관계를 예측하는 식은 거의 없고, 최근에 이르러 유리와 같이 완전 취성 재료에 적용 가능한 식이 제안된 예가 있다.

본 연구에서는 노치 시험편을 이용하여 정적 및 동적 파괴인성 시험을 수행하였고, 이를 진파률을 이용하여 임계 노치반경 결정하고, 임계 노치반경 이상에서 반경에 비례하여 증가하는 노치 파괴인성에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 노치반경 변화에 따른 노치 시험편의 겉보기파괴인성 변화를 예측하기 위한 수치 해석적 방법이 제시되었다. 이 방법은 노치 선단에서 계산된 수직 방향 응력 분포를 이용하여 유효거리를 계산하고, 평균응력모델에 적용하여 노치/균열 파괴인성과 노치반경의 관계를 예측할 수 있는 식이다. 이 식을 정적 및 동적 진보기 파괴인성 시험 데이터와 비교 평가하여 제안된 식의 적용 가능성을 제시하였다.

2. 시험 및 해석 방법

2.1 시험 방법

본 연구에 사용된 재료는 고강도 알루미늄 합금 Al 7175-T74이다. 시험편은 폭이 55mm인 소형 3점 굽힘 시험편으로, 얻을 수 있는 시험편의 크기와 양에 제한이 있거나 소재의 국부적인 영역에서 파괴특성을 평가할 때 유용하게 사용될 수 있다. 노치 시험편의 노치반경은 0.05~4mm로 변화시켜 가공하였다. 모든 노치 시험편의 노치 길이 a/W 는 0.48이 되도록 일정하게 가공하였다. 가공한 노치 시험편은 500배율 한계를 갖는 광학식 현미경을 이용하여 반경을 세 측정하였다.

균열 시험편의 기준파괴인성을 얻기 위한 파괴인성 실험은 정직의 경우 ASTM E399에 준한 방법과 동적인 경우 변형률 측정법을 적용하였다. 이 때 균열선단의 변형률을 이용하여 응력화대계수는 아래와 같은 식으로 계산할 수 있다^[2].

$$K_I = 2.902E\sqrt{r}\varepsilon_x \quad (1)$$

노치 및 균열 시험편의 동적 파괴인성 실험은 낙하식 충격 시험기(drop weight impact testing machine, Model : Dynatup 8250)를 이용하여 실현하였다. 충격 텁 및 추의 무게는 2.375kgf로 일정하게 유지하였으며, 공압을 이용하여 텁이 시험편을 타격하는 순간 속도를 7.17~7.20 m/sec로 일정하게 유지하였다. 스트레인케이지에서 발생하는 변형률을 측정하기 위하여 동적 스트레인 그룹(Measurement group, Model: 2310)을 사용하였고, 증폭된 변형률 신호는 A/D 보드를 통하여 개인용 컴퓨터에 입력되었다. 변형률 측정에 의한 동적파괴인성 평가는 균열시험편에만 적용할 수 있으므로, 노치시험편의 균열개시하중은 하중-시간 선도의 궤적분석 방법^[3]을 이용하여 결정하였다.

2.2 유한요소해석 방법

노치 시험편의 노치 선단부 응력 분포를 해석하여 노치반경에 따른 유효거리를 계산하기 위하여 유효요소해석을 수행하였다. 유효요소해석은 상용 프로그램인 ANSYS 5.7을 이용하였다. 3PB 시험편 모델은 대칭성(symmetry condition)을 고려하여, 시험편의 1/2을 모델링하였다. 본 해석에서 사용한 요소는 3차원 8절점 요소로 탄소성 해석을 수행하였다.

노치 선단부의 요소크기는 기존의 연구자들의 결과를 참조하여 아래와 같은 크기로 모델링하였다^[4].

$$\frac{\text{Fine mesh size}}{\text{crack or notch depth}} \leq \frac{1}{50} \quad (2)$$

이 경우 노치 선단의 요소 크기는 약 0.1mm 이내이나, 파괴인성 실험과 마찬가지로 하중을 증가시키며 하중-균열개구변위를 계산하여 임계하중을 결정하였다. 계산된 균열개구변위를 실험결과와 비교하였고 ASTM E399의 임계균열개시하중 결정 절차에 따라 임계하중을 결정하였다. 균열개시 임계하중에서 각각의 노치반경을 갖는 시험편들에 대하여 노치 선단부의 응력을 계산하여 노치반경-유효거리의 상관관계를 산출하였다.

3. 노치/균열 평균임계응력 파손모델

평균응력파손모델(average stress fracture model)^[5]은 식 (3)의 형태로 손상은 균열 개시와 관련된 일정한 영역(X)내의 평균응력이 재료의 강도 한계 이상일 때 전전한다는 가정 아래에서 시작된다. 본 연구에서는 균열 및 노치 시험편의 균열 개시와 관련된 일정한 영역을 유효 거리로 가정하였다. 유효거리 안의 응력상태는 일정하중 하에서 수직응력분포가 노치선단의 최대응력 이상의 값을 갖는다. 평균응력파손모델에 유효거리를 적용하여 표현하면 식 (3)과 같다. 이때의 유효거리는 균열개시하중에 대응하는 값을 빼하였다. 또한 강도 한계는 재료의 항복응력으로 가정하였다.

$$\frac{1}{X} \int_0^X \sigma(r) dr = \frac{1}{X_{ef}} \int_0^{X_{ef}} \sigma(r) dr = \quad (3)$$

Fig. 1과 같이 노치 선단의 좌표계를 고려해 보자. 이와 같은 좌표계에서 Creager와 Paris는 노치 주위의 응력장을 노치길이 변화 없이 붕괴(collapse)된다고 가정한 다음 아래와 같은 노치 선단부의 응력분포를 응력화대계수를 이용하여 표현하였다^[6].

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} &= \frac{K_{IN}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \\ &\quad + \frac{K_{IN}}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{\rho}{2r}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\Theta=0^\circ$ 인 경우

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{IN}}{\sqrt{2\pi r}} \left(1 + \frac{\rho}{2r}\right) \quad (5)$$

이다. Fig. 1의 좌표계 원점을 노치 선단부로 이동($r \rightarrow r' + \rho$)시켜 정리하면,

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{IN}}{\sqrt{\pi(2r' + \rho)}} \left(1 + \frac{\rho}{2r' + \rho}\right), \quad (6)$$

과 같이 단순화시킬 수 있다.

따라서, 식 (6)을 평균응력 파손모델 식 (3)에 대입하면, 노치 시험편의 균열 개시 기준은 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{2K_{IN}}{\sqrt{\pi(2X_{ef} + \rho)}}, \quad (7)$$

균열선단이 원점인 좌표계에서 주 응력이 균열면에 수직으로 사용하는 모드 I 하중에 대한 균열선단의 응력상은 다음과 같이 쓸 수 있다^[7].

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \quad (8)$$

$\Theta=0^\circ$ 일 때에서

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (9)$$

이다. 식 (9)를 식 (3)에 대입하면, 균열 시험편의 균열 개시 기준을 아래 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2}{\pi X_{cr}}} K_I \quad (10)$$

식 (7)과 (10)의 균열 개시 강도는 노치 및 균열 시험편에서 서로 동일하다고 가정하여 정리하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{K_{IN}}{K_I} = \sqrt{1 + \frac{\rho}{2X_{cr}}} \quad (11)$$

4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 노치 반경 변화에 따른 노치 시험편의 겉보기 파괴인성(apparent fracture toughness)의 변화를 나타낸 결과이다. 균열시험편에서 얻은 기준파괴인성을 근거로 하여 10% 범위에서 측정된 겉보기파괴인성을 균열시험편의 기준파괴인성과 동일하게 생각하였다. 임계 노치 반경 이하에서는 Al 7175-T74 합금의 겉보기 파괴인성이 거의 일정하여 $88.37 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 에 가까운 것을 볼 수 있다. 임계 노치 반경 설정은 임계 노치 반경이하에서는 기준파괴인성과 임계 노치반경 이상에서의 시험데이터의 선형 회귀선의 교점을 임계 노치 반경으로 정의하였다.

피로예비균열을 삽입한 3PB 시험편의 동적 파괴인성 실험 결과는 Fig. 3과 같다. 최고 변형률을 이용하여 계산한 균열시험편의 동적파괴인성은 $87.3 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 로 평가되었다. Fig. 4는 노치반경 변화에 따른 겉보기 동적 파괴인성 변화를 나타낸 그림이다. 선형 회귀 분석을 토대로 한 동적 임계 노치 반경은 약 0.502mm 극방으로 결정할 수 있는데, 정직인 경우 보다 크게 평가되었다.

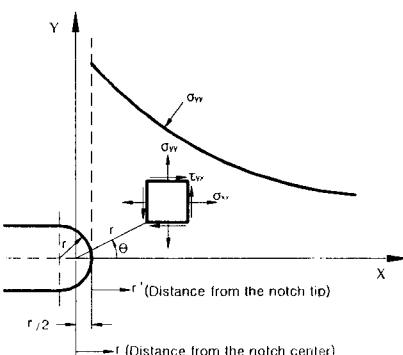


Fig. 1 Definition of coordinate axis ahead for notch tip

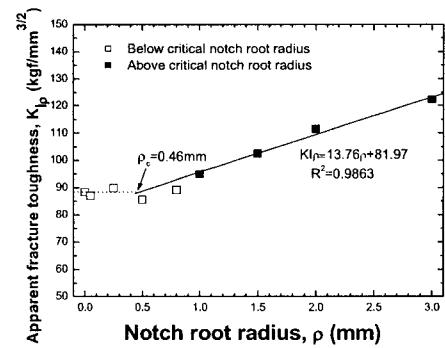


Fig. 2 Relation between apparent fracture toughness and notch root radius for Al 7175-T74

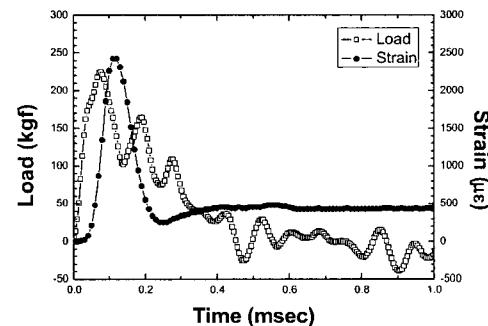


Fig. 3 Load and strain versus time response for cracked specimen of Al-7175-T74 steel ($v=7.2 \text{ m/s}$)

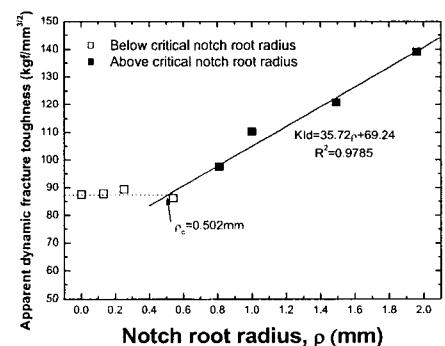


Fig. 4 Apparent dynamic fracture toughness as a function of notch root radius under dynamic loading for Al 7175-T74

Fig. 5는 균열 개시하중에서 유한요소해석을 이용하여 구한 노치반경이 1mm인 시험편의 노치 선단 수직 방향 응력 분포이다. 이와 같이 구한 유효거리를 노치반경의 함수로 표현하면, Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 6의 유효거리(X_{ef})와 노치반경(ρ) 사이의 관계식을 식 (11)의 노치/균열 임계평균응력과 손보면에 대입하여 정리하면, 노치반경-겉보기 파괴인성/파괴인성을 아래와 같이 얻을 수 있다.

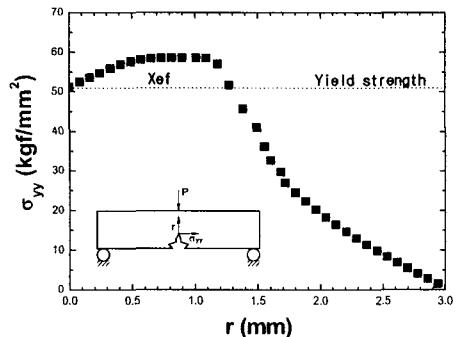


Fig. 5 Normal stress distribution for Al 7175-T74 at notch tip ($\rho = 1\text{mm}$)

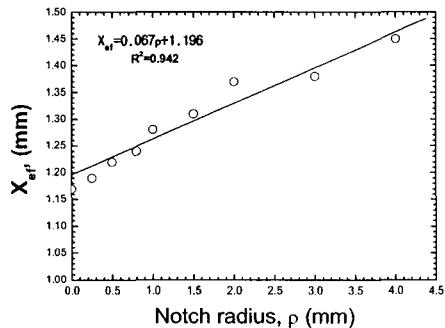


Fig. 6 Effective distance as a function of notch root radius for Al 7175-T74

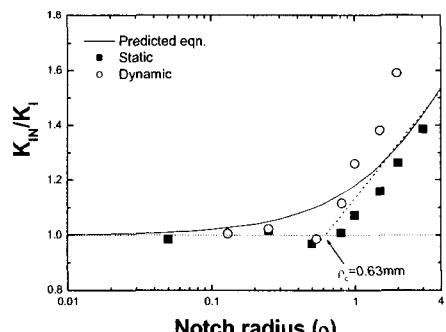


Fig. 7 Apparent fracture toughness/intrinsic fracture toughness ratio as a function of ρ for Al 7175-T74

$$\frac{K_{Ic}}{K_I} = \sqrt{1 + \frac{\rho}{2X_{ef}}} = \sqrt{1 + \frac{\rho}{2(0.067\rho + 1.196)}} \quad (11)$$

식 (11)을 도시하면, Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 경직 실험 결과들은 예측식과 약 10% 이내의 오차를 보이고 있으며, 증가하는 기울기도 거의 비슷한 것을 볼 수 있다. 동적 실험 결과들은 반경 3mm 이내의 결과들에서는 15% 오차를 보이고 있다. 노치/균열 임계평균응력파손모델에 의하여 결정된 임계노치반경은 0.63 mm로 실험 결과에 비하여 크게 평가된다.

5. 결론

1) Al 7175-T74 노치 및 균열 시험편의 길보기 파괴인성은 7.2m/s의 충격하중 하에서 변형률 속도에 독립적인 특성을 보이고 있다.

2) 본 연구에서는 임계 노치반경을 예측하기 위한 새로운 시도로 균열/노치 임계 평균응력파손모델을 제안하였다. 이 모델에 의하여 예측한 임계 노치 반경은 정직 및 동적 파괴인성 실험에서 결정한 임계 노치 반경에 비하여 크게 계산되었다.

3) 본 연구에서 제안한 노치/균열 임계평균응력파손모델은 수치해석적 방법을 통하여 임계노치반경을 예측하려는 시도로써, 실험을 수행함에 있어 수반되는 비용과 시간을 절약할 수 있는 장점을 갖고 있어, 추후 다양한 재료에 대한 적용으로 꾸준은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- ASTM, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM E399, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Vol. 3, pp. 408~438, 1997.
- 김재훈, 김덕희, 임동규, 박성우, 문순일, "변형률 측정을 이용한 추진기관용 AI 합금의 파괴인성 평가", 한국산업안전학회지, 제17권, 제3호, pp. 13~21, 2002.
- P. R. Sreenivasan, S. K. Ray, S. L. Mannan and P. Rodrigues, "Dynamic Fracture Toughness and Charpy Impact Properties of an AISI 403 Martensitic Stainless Steel", Journal of Nuclear Materials, Vol. 228, pp. 338~345, 1996.
- L. S. Niu, H. J. Shi, C. Robin and G. Pluvine, "Elastic and Elastic-Plastic Fields on Circular Rings Containing a V-Notch under Inclined Load", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 68, pp. 949~962, 2001.
- Y. Bao and Z. Jin, "Size Effects and a Mean Strength Criterion for Ceramic", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 18, No. 8, pp. 829~835, 1993.
- M. Creager and P. C. Paris, "Elastic Field Equations for Blunt Cracks with Reference to Stress Corrosion Cracking", International Journal of Fracture Mechanics, Vol. 3, pp. 247~252, 1967.
- T. L. Anderson, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, CRC Press, 1995.