

Al 7175 합금의 정적 파괴인성에 미치는 노치반경 영향

김 재 훈* · 김 덕 회* · 박 성 욱* · 문 순 일**

Notch Radius Effect for Static Fracture Toughness of Al 7175 Alloys

Jae-Hoon Kim* · Duck-Hoi Kim* · Sung-Wook Park and Soon-Il Moon**

ABSTRACT

In this study, intrinsic fracture toughness of Al 7175-T74 is evaluated from the apparent toughness of notched specimen. Modified average stress model is used to establish the relationship to predict the intrinsic fracture toughness from the apparent fracture toughness of a notched-cracked specimen. The modified average stress model is established the relation between notch radius and effective distance calculated by FEM analysis. The results show that fracture toughness decreases with decreasing of notch root radius. The true fracture toughness can be predicted from test results of apparent fracture toughness measured by using notched specimen.

1. 서 론

로켓 추진기관 연소관에 사용되는 소재는 충격 및 내열 특성이 우수해야 하며, 특히 노치 및 균열에 대한 저항성이 우수해야 한다. 일반적으로 무딘 노치(blunt notch) 문제는 탄-소성(elasto plastic) 연성 재료의 경우 균열 혹은 노치가 고하중하에서 소성변형으로 인하여 응력의 특이성을 잃는 경향이 있고, 취성 재료의 경우에는 ASTM 규격에 의한 이상적인 파괴예비균열 생성이 어려워, 노치를 이용하여 쉽게 파괴인성을 결정할 수 있다면 매우 유용하므로 많은 관심을 갖게 한다[1]. 따라서 균열과 노치의 상관관계를 예측할 수 있으면 연성 재료의 경우 균열과 거의 비슷한 거동을 하는 노치 반경을 결정하는 문제에, 취성 재료의 경우에는 파괴예비균열을 생성하기 어려운 재료에 대한 파괴인성 평가에 적용할 수 있어 큰 실용적인 장점이 있다. 그러나, 현재 균열에 대한 시험 평가 및 연구들은 많이 이루어지고 있으나, 노치 문

제에 대한 연구들은 거의 이루어지고 있지 않은 실정이며, 이들의 상관관계를 연구한 결과는 거의 없다[2-4]. 최근에 Fenghui[5]등은 파단진전 영역을 근거로 노치 파괴인성(apparent fracture toughness)과 파괴인성(intrinsic fracture toughness)과의 상관관계를 예측할 수 있는 식을 제시하였다. 그러나 이 식은 glass, ceramic 과 같은 매우 취성인 재료에 대하여만 적용할 수 있는 식으로, 본 연구에서 사용한 Al 7175-T74와 같은 재료에는 적용이 불가능하다.

본 논문은 Al 7175-T74 연소관 부품 소재를 대상으로 노치 반경을 변화시켜가며 정적파괴인성 시험을 수행하였다. 특히 노치반경 변화에 대한 노치/균열 파괴인성의 상관관계를 예측할 수 있는 식을 유도하고, 시험 결과와 비교하여 그 적용 가능성을 제시하였다. 본 연구에서는 Al 7175-T74 재료에 대한 시험 결과만을 제시하였으나, 이후 진행되는 연구에서는 일반 강재, graphite와 같은 취성재료에 대하여도 그 적용성을 평가할 계획이다.

* 충남대학교 기계설계공학과 (Chungnam National University, Dept. of Mechanical Design Eng.)

** 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

2. 재료 및 시험 방법

본 연구에 사용된 재료는 항공기나 로켓 및 미사일과 같은 구조물의 추진기관 멈춤 튜브에 사용되는 고강도 알루미늄 합금 Al 7175-T74이다. 인장시험에 의해 구한 Al 7175-T74의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 파괴인성시험을 수행하기 위한 시험편은 Fig. 1과 같은 3점 굽힘 시험편으로 반경을 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4mm로 변화시켜 노치파괴인성 시험을 수행하였고, 이 결과를 재료의 파괴인성치와 비교하여 노치반경 영향을 평가하였다.

파괴인성시험은 ASTM E399[6]에 준한 방법과 스트레인게이지법을 이용한 시험 방법을 적용하여 시험 평가하였다. 파괴인성 시험편의 피로예비균열 삽입은, 전기유압식 피로시험기를 사용하였다. 균열길이는 디지털 이동식 현미경을 사용하여, 최종 균열길이가 0.48W가 되도록 일정하게 유지하였다. 노치파괴인성을 측정하기 위한 시험편은 앞에서 설명한 바와 같이 노치반경을 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 4mm로 가공한 시험편을 피로예비균열 없이 파괴인성 시험을 수행하여 ASTM E399[6]에 준하여 노치파괴인성을 계산하였다. 균열 및 노치 시험편의 a/W 는 0.48로 일정하게 유지하였다.

Table 1 Mechanical properties of Al 7175-T74

Young's Modulus (kg/mm ²)	0.2% Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	ν	Elongation (%)
7,140	50.91	56.51	0.33	10.2

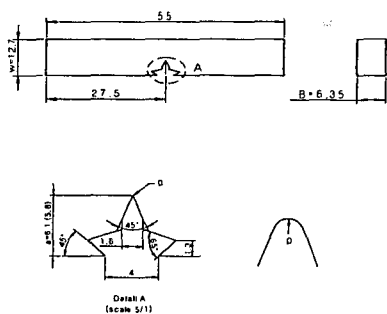


Fig. 1 Shape and dimension of the three point bend specimen

3. 수정된 평균 응력 모델

앞에서 이야기 한 바와 같이 노치와 균열의 파괴인성 상관관계를 연구한 결과는 거의 없다. 최근에 Fenghui[5]등은 파단전전영역(FPZ, fracture process zone) 모델을 근거로 노치 파괴인성(apparent fracture toughness)과 파괴인성(intrinsic fracture toughness)과의 상관관계를 예측할 수 있는 식을 제시하였다. 그러나 이 식은 glass, ceramic과 같은 매우 취성인 재료에 대하여만 적용할 수 있는 식으로, 본 연구에서 사용한 Al 7175-T74와 같은 재료에는 적용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 탄소성 재료에도 적용이 가능한 노치/균열 파괴인성 관계식을 유도하였고, 수정된 평균응력모델(modified average stress model)이라 칭하였다. 이 식의 유도 과정은 다음과 같다.

일반적으로 노치부의 응력 상태는 Fig. 2와 같은 형태로 묘사할 수 있다[3].

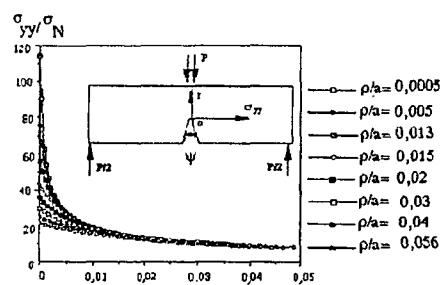


Fig. 2 Non-dimensional stress versus non-dimensional distance. Influence of notch radius

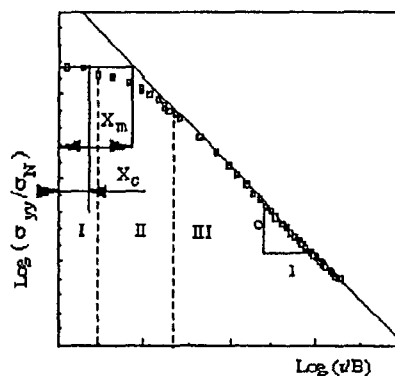


Fig. 3 schematic stress distribution at notch tip[4]

특히, 노치부에서 노치방향으로의 응력 상태를 살펴보면, Fig. 3과 같이 세 영역으로 나타낼 수 있다[2-4]. 여기서, 영역 I 은 응력이 일정한 영역이며, 영역 II는 영역 I 과 영역 III의 천이 영역이다. 영역 III는 응력이 아래의 관계식을 만족하며 감소하는 영역이다.

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r^2}} \quad (1)$$

Fig. 3에서, X_m 을 effective distance라고 하며, effective distance는 노치 반경의 함수이고, 노치 반경이 증가할수록 effective distance는 증가한다[2-4]. 본 논문에서는 effective distance를 X_{ef} 로 표기하였다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 Al-7175 T74를 대상으로 다양한 노치 반경을 갖는 3PB 시험편을 대상으로 FEM을 이용하여 effective distance를 계산한 결과이다. Effective distance를 결정한 하중은 하중-COD 선도에서 균열개시하중을 결정하는 방법에 따라, 하중을 변화시켜 가며 결정하였다.

Modified stress fracture model은 식 (2)의 형태로 균열은 일정한 영역내의 평균응력이 강도 한계 이상일 때 진전한다고 가정한다[5].

$$\frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} \sigma(r) dr = \sigma_s \quad (2)$$

여기서, 일정한 영역은 균열 시험편의 경우 Dugdale model에 의한 소성 영역의 크기로 가정하면 식 (3)과 같다.

$$(r_0)_{cracked\ specimen} = r_D = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 \quad (3)$$

노치 시험편은 effective distance, X_{ef} 로 가정하였다.

$$(r_0)_{notched\ specimen} = X_{ef} \quad (4)$$

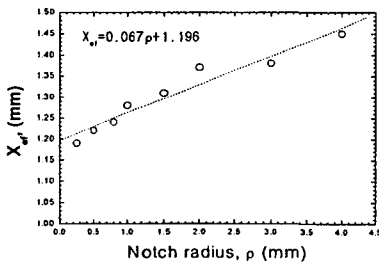


Fig. 4 Effective distance versus notch radius of Al 7175-T74 for 3PB specimen ($a/W=0.48$)

노치 시험편의 노치 전단부 응력 분포는 아래와 같다[7].

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} &= \frac{\sigma}{4} \sqrt{\frac{a}{2r+\rho}} \times \left[\left(5\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{5\theta}{2} \right) + \frac{4\rho}{2r+\rho} \cos\frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{xx} &= \frac{\sigma}{4} \sqrt{\frac{a}{2r+\rho}} \times \left[\left(3\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{5\theta}{2} \right) - \frac{4\rho}{2r+\rho} \cos\frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{xy} &= -\frac{\sigma}{4} \sqrt{\frac{a}{2r+\rho}} \times \left[\left(\sin\frac{\theta}{2} - \cos\frac{\theta}{2} \right) + \frac{4\rho}{2r+\rho} \sin\frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 노치반경(notch radius), a 는 노치 깊이(notch depth)이다.

$\theta=0$ 방향을 따라, 식 (5)의 첫 번째 식은,

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

과 같다. 여기서, $K_{IN} = \sigma\sqrt{\pi a}$ 이다.

식 (6)를 식 (2)에 대입하면, 노치 시험편의 criterion은

$$\sigma_s = \frac{2K_{IN}}{\sqrt{\pi(2r_0+\rho)}} \quad (7)$$

균열 시험편에서, mode crack 근방의 응력 분포는 아래와 같다.

$$\alpha(r) = \frac{\alpha(a+r)}{[r(2a+r)]^{1/2}} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (2)에 대입하면, criterion은

$$\sigma_s = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{r_0} \right)^{1/2} \quad (9)$$

와 같다. 여기서, $K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a}$ 이다. 일반적으로 $a \gg r_0$ 이므로, 식 (9)는 아래와 같이 정리 할 수 있다.

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2}{\pi r_0}} K_{IC} \quad (10)$$

따라서, 식 (7)과 (10)에 식 (3)과 (4)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{K_{IN}}{K_{IC}} = 0.7071 \sqrt{\frac{2X_{ef} + \rho}{r_D}} \quad (11)$$

본 연구에서 사용한 Al 7175-T74의 r_D 를 계산하여 식 (11)에 대입하면,

$$\frac{K_{IN}}{K_{IC}} = 0.65 \sqrt{2X_{ef} + \rho} \quad (12)$$

와 같다. Fig. 5는 식 (12)와 시험 결과를 나타낸 결과이다.

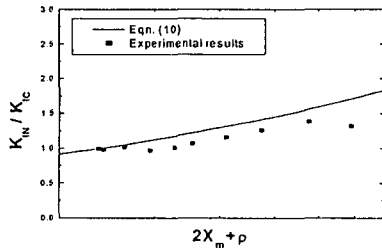


Fig. 5 K_{IN}/K_{IC} ratio as a function of $2X_m+p$

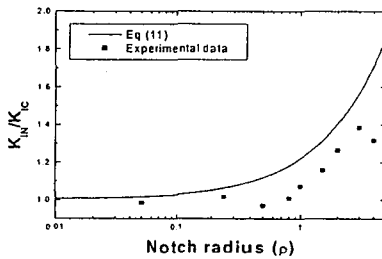


Fig. 6 K_{IN}/K_{IC} ratio as a function of ρ

식 (12)에 Fig. 4의 X_{ef} 와 ρ 사이의 관계식을 대입하여 정리하면, 식 (12)는 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$\frac{K_{IN}}{K_{IC}} = 0.65\sqrt{1.134\rho + 2.392} \quad (13)$$

식 (13)과 시험결과를 도시하면 Fig. 6과 같다. 시험결과에서 볼 수 있듯이 노치 반경이 1mm 이내에서는 파괴인성과 노치인성이 약 10% 이내의 차이를 보이고 있다. 그러나 노치 반경이 1mm 이상으로 증가할수록 노치반경 증가에 따라 노치인성은 급격히 증가하고 있다. 식 (13)을 이용한 노치/균열 파괴인성-노치반경 관계는 시험결과와 약간 오차를 보이며 증가하는 동일한 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

1) 본 연구에서는 수정된 평균응력모델을 개발하였고, 이 관계식을 이용하여 노치/균열 파괴인성-노치반경의 관계를 묘사할 수 있다.

2) 노치파괴인성(apparent fracture toughness)은 노치 반경이 감소할수록 증가하고 있다.

3) 식 (10)을 이용하면, 노치 시험편에서 얻은 노치 파괴인성을 이용하여, 파괴인성을 예측할 수 있다.

참고 문헌

- 1) 김재훈, 임동규, 김덕희, 문순일, 임성택, "추진기관용 연소관 소재의 정적파괴인성에 미치는 노치반경 영향," 제11차 유도무기학술대회논문집, 2001, pp. 557-560.
- 2) L. S. Nui, C. Chehimi and G. Pluvinage, "Stress Field Near a Large Blunted Tip V-Notch and Application of the Concept of the Critical Notch Stress Intensity Factor(NSIF) to the Fracture Toughness of Very Brittle Materials," Engineering Fracture Mechanics, 49(3), 1994, pp. 325-335.
- 3) G. Pluvinage, "Fatigue and Fracture Emanating from Notch; the Use of the Notch Stress Intensity Factor," Nuclear Engineering Design, 185, pp. 173-184.
- 4) O. Akourri, M. Louah, A. Kifani, G. Gilgert and G. Pluvinage, "The Effect of Notch Radius on Fracture Toughness J_{IC} ," Engineering Fracture Mechanics, 65, 2000, pp. 491-505.
- 5) W. Fenghui, "Prediction of Intrinsic Fracture Toughness for Brittle Materials from the Apparent Toughness of Notched-Crack Specimen," Journal of Materials Science, 35, 2000, pp. 2543-2546.
- 6) ASTM E399-90, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," Metals Test Methods and Analytical Procedures, Vol. 3, 1997, pp. 408~438.
- 7) Z. B. Kuang, "The Stress Field Near the Blunt Crack Tip and the Fracture Criterion," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 16, No. 1, 1982, pp. 19~33.