

# 구속효과의 정량적 분석을 통한 소형시편의 파괴특성 평가

이 백우, 주 장복, 장 재일, 권 등일  
서울대학교 재료공학부

## Fracture Characteristics Evaluation of Small Specimen from the Quantitative Analysis of Constraint Effect

B.-W. Lee, J.-B. Ju, J.-i. Jang and D. Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University,  
Seoul 151-742, Korea

### 1. 서론

대규모 장치 산업인 원자력 설비, 가스 저장 구조물 등은 사용 중 지속적인 안전성의 검증이 매우 중요하다. 이를 위해 구조물에 존재하는 결함의 모양, 크기 및 결함을 포함하는 구조물의 형상과 구조물에 작용하는 응력을 상호 연관시킴으로서 파괴에 대한 저항성을 평가하는 파괴역학적 인성평가법이 널리 이용되어 왔다.

파괴역학적 인성평가법들은 오랜 기간동안의 검증을 통하여 ASTM[1], BS[2] 등에 표준화되었으며, 현재 여러 분야에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 그러나 표준시험법들은 시편의 크기 및 형상에 대해 일정한 시편요구조건을 가지고 있어서 사용중인 구조물과 같이 한정된 시편으로 파괴특성을 평가해야할 경우나 국부적인 영역에서 파괴특성을 평가할 경우에는 많은 어려움이 있다. 이에 최근에는 표준 파괴인성시험법의 시편요구조건을 완화시킴으로서 보다 소형화된 시편으로 파괴특성을 평가하고자 하는 연구가 수행되고 있다.[3-4] 한편, 소형시편으로부터 파괴특성을 평가하기 위해서는 시편 크기에 대한 역학적 환경의 고려뿐만 아니라 시편이 소형화됨에 따라 시편의 준비 및 시험법의 측면에서 기존방법이 적용 불가능하게 됨으로서 보다 간편한 시편의 준비와 시험법의 개발을 필요로 하게 되었다.

본 연구에서는 소형시편을 이용한 파괴특성 평가를 위하여 피로예비균열의 도입을 하지 않고 기계적 가공에 의한 노치 시편으로부터 파괴특성을 평가하고자 하였다. 즉, 노치반경이 증가함에 따른 구속효과의 정량적 분석을 통하여 노치 효과를 보정하고자 하였다.

### 2. 구속효과 정량화를 통한 노치 시편의 파괴특성 평가

노치의 반경이 증가함에 따라 노치 첨단부의 구속효과가 감소하여 소성역의 크기가 증가한다. 따라서 노치 시편의 파괴인성을 평가하기 위해서는 구속효과 감소에 의한 소성역의 보정이 필요하게 된다. 즉, 선형탄성파괴역학에서 가정한 균열 첨단에 있어서의 무한한 응력이 재분포되어야

하며, 또한 소성변형에 의해 일어나는 응력 완화 효과의 보정이 이루어져야 한다.

## 2-1. 응력 재분포 효과의 보정

선형탄성 파괴역학의 응력해석에 의하면 균열 끝에서의 무한한 응력을 가정한다. 그러나 균열의 끝에서 항복이 일어나면 Fig. 1에서의 응력  $\sigma_{yy}$ 가 평면응력상태의 경우는 항복강도인  $\sigma_{ys}$ 를, 평면변형상태의 경우는  $3\sigma_{ys}$ 를 각각 초과할 수 없기 때문에 균열/노치 끝에서의 무한한 응력이 재분포되어야 한다. 소성역에 의한 응력의 재분포 효과를 보정하기 위해 Irwin의 소성역 보정방법[5]을 이용하였다. Irwin의 소성역 크기 보정 방법은 Fig. 1과 같이 균열의 길이에 소성역의 크기를 더한 값을 유효균열길이(effective crack length,  $a_{eff}$ )로 정의한 후 이로부터 유효파괴인성(effective fracture toughness,  $K_{eff}$ )을 구함으로써 응력 재분포 효과를 보정하는 방법이다. 유효균열길이는 초기 균열길이에 소성역 크기( $r_y$ )를 더하여 다음과 같이 주어진다.

$$a_{eff} = a + r_y \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 초기 균열 길이이고 소성역의 크기는 노치 첨단에서의 응력상태에 따라서 다음과 같이 주어진다.

평면응력상태의 경우

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2-a)$$

평면변형상태의 경우

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2-b)$$

노치시편의 경우 노치 첨단에서는 자유표면상태( $\sigma_{xx}=0$ )이므로 유효파괴인성은 평면응력 상태의 소성역인 식 (2-a)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{eff} = \lambda(a_{eff})\sigma_{nom}\sqrt{\pi \cdot a_{eff}} \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 는 시편과 균열의 형상에 의존하는 인자이고,  $\sigma_{nom}$ 은 공칭응력(nominal stress)이다.

## 2-2. 응력 완화 효과의 보정

노치 첨단에서의 소성변형으로 인한 응력 완화 효과에 대한 보정을 위해 노치 아래의 변형과 파괴의 거동을 지배하는 인자인 탄성응력집중계수를 도입하여 소성변형에 의한 탄성응력집중계수값이 감소되는 정도로부터 보정하고자 한다.

일반적으로 탄성재료에서 응력집중계수( $k_t$ )는 다음과 같이 노치 첨단에서의 최대응력( $\sigma_{max,tip}$ )과 공칭응력의 비로 주어진다.

$$k_t = \frac{\sigma_{\max, tip}}{\sigma_{nom}} \quad (4)$$

그리고, 균열길이와 시편형상 및 하중이 가해지는 방법에 의해 결정되는 파괴인성값은 식 (3)과 같이 주어지게 된다. 여기서 공칭응력  $\sigma_{nom}$ 을 식 (4)로 치환하게 되면 식 (5)와 같이 파괴인성을 탄성응력집중계수에 의해 나타낼 수 있다.

$$K_{IC} = \lambda \frac{\sigma_{\max, tip}}{k_t} \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

노치첨단에서 소성변형 정도에 따른 식 (5)의 탄성응력집중계수 변화정도로부터 응력완화 효과를 보정하고자 하였다. 먼저, 소성변형이 거의 없는 경우에 있어서 탄성응력집중계수를 탄성론에 근거한 Neuber[6]의 nomograph로부터 노치 반경에 따라 다음과 같이 구하였다.

$$k_t = 1 + \frac{(\alpha_{fk} - 1) \cdot (\alpha_{tk} - 1)}{\sqrt{(\alpha_{fk} - 1)^2 + (\alpha_{tk} - 1)^2}} \quad (6)$$

여기서  $\alpha_{fk}$ ,  $\alpha_{tk}$ 는  $a/\rho$ 의 함수이고,  $\rho$ 는 노치 반경이다.

소성변형이 수반된 경우에 노치첨단의 응력장은 노치가 길이의 변화 없이 collapse된다고 가정 한 경우의 응력확대계수( $\overline{K}_I$ )에 의해 다음과 같이 나타내어진다.[7]

$$\sigma_{\max, tip} = \frac{2\overline{K}_I}{\sqrt{\pi\rho}} \quad (7)$$

노치 첨단에서의 응력장인 식 (7)로부터 소성변형이 큰 경우에 있어서 탄성응력집중계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{k}_t = \frac{2\overline{K}_I}{\sigma_{nom}\sqrt{\pi\rho}} \quad (8)$$

즉,  $\overline{k}_t$ 는 소성변형에 의해 감소된 탄성응력집중계수를 의미하며, 식 (4)의 탄성응력집중계수 값보다 작다. 이를 이용하여 노치 시편의 소성변형이 큰 경우에서 파괴인성 값을 겉보기 파괴인성 값( $K_{IC}^{app}$ )이라 하여 식 (5)와 유사하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{IC}^{app} = \lambda \overline{\sigma}_{nom} \sqrt{\pi a} = \lambda \frac{\sigma_{\max, tip}}{\overline{k}_t} \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

식 (5)와 (9)로부터 파괴가 일어나기 위해서는  $\sigma_{\max, tip}$ ,  $\overline{\sigma}_{nom}$ 가 각각 임계값  $\sigma_1$ 에 도달하여야 한다고 가정하면 노치를 가진 시편에서 파괴역학적 파괴인성값은 다음과 같이 주어진다.

$$K_{IC} = \frac{\overline{k_t}}{k_t} K_{IC}^{app} = C_f \cdot K_{IC}^{app} \quad (10)$$

즉, 소성변형이 거의 없는 경우에서의 탄성응력집중계수값과 소성변형에 의해 감소된 탄성응력 집중계수값의 비인 보정상수( $C_f$ )로 결보기 파괴인성값을 보정함으로써 응력 완화효과를 보정할 수 있게 된다.

### 3. 실험방법

본 연구에서는 원자로용 압력용기강인 SA 508 Gr. 3강을 시험재료로 사용하였으며, 이의 기계적 물성은 Table 1과 같다.

표준 샐피 크기( $10 \times 10 \times 55\text{mm}$ )의 시편에  $50\mu\text{m}$ 에서부터 샐피충격시편의 노치 반경인  $250\mu\text{m}$ 에 이르기까지 다양한 노치 반경의 시편을 준비함으로써 노치반경효과를 고려하였으며, ASTM E399[1]에 따라 피로예비균열을 도입함으로써 기준되는 파괴인성 값을 구하였다.

시험은 정적하중과 동적하중에서 이루어졌다. 정적하중에서의 시험은 Instron 5582의 3점굽힘 시험기를 이용하였으며, 동적하중에서의 파괴역학시험을 위해 Tinius-Olsen사의 충격시험기를 이용하여 계장화 충격시험기를 구성하였다. 시험은 선형탄성 파괴역학적 접근을 위해 액체 질소 온도( $-196^\circ\text{C}$ )에서 행하였다.

파면관찰을 위해 시험이 행해진 시편의 파면을 절단한 후 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 파괴된 시편의 노치 첨단에서 두께의 1/2되는 지점으로부터 아래쪽으로 내려오면서 파원의 위치를 관찰하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

노치반경에 따른 정적하중과 동적하중에서의 파괴인성값을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 이에 의하면 예비균열이 도입된 시편에서 시편 요구조건을 만족시키는 기준 파괴인성값을 구할 수 있었으며, 노치 반경이 증가함에도 불구하고 파괴인성 값이 증가하지 않는 limiting notch root radius( $\rho_0$ )를 관찰하였다. 그리고  $\rho_0$ 이상의 노치 반경에서는 노치반경이 증가함에 따라 파괴인성 값이 노치반경의 제곱근에 비례하였다.

노치시편으로부터 얻어진 결보기 파괴인성 값에 대해 식 (3)을 이용하여 유효균열길이로부터 응력의 재분포효과를 보정함으로써 유효파괴인성값을 정적하중과 동적하중에서 각각 Fig. 4, Fig. 5와 같이 구하였다.

응력 재분포 효과가 보정된 유효파괴인성에 대해 응력 완화효과를 보정함으로써 최종적으로 Fig. 6, Fig. 7과 같이 노치효과인 응력 재분포 및 응력 완화효과가 보정된 파괴인성값을 얻었다. 보정된 노치시편의 결보기 파괴인성값이 기준 파괴인성값에 접근함을 알 수 있었다.

Fig. 2와 Fig. 3에서 나타난 것처럼 노치 반경이 증가함에도 불구하고 일정한 파괴인성값을 가지는 임계 노치 반경인 limiting notch root radius의 의미를 본 실험의 파괴메커니즘인 벽개파괴의 파괴메커니즘으로부터 알아보았다. 일반적으로 벽개파괴가 일어나기 위해서는 충분한 응력과 이러한 응력이 집중될 수 있는 결정립계, 계재물과 같은 제 2상입자의 존재를 요구한다.[8] 본 연구결과에서는  $\rho_0$  이하의 시편의 경우 비록 소성변형에 의한 응력완화가 있을지라도 파괴를 일으키는데 충분한 응력요구조건을 만족시키게 된다고 가정하면, 파괴는 이러한 미세조직에 의해 결정되게 된다고 할 수 있다. 이를 확인하기 위해 Fig. 8과 같이 SEM을 통해 파면을 관찰한 결과  $\rho_0$  이하의 시편에서 파원의 발견 위치가 균열/노치 끝에서 약  $30\mu\text{m}$  근처임을 알 수 있다. 그

리고 본 실험재료의 결정립 크기가 약 20~30 $\mu\text{m}$ 임을 고려하면 상기 사실을 뒷받침하는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

노치반경이 증가함에 따른 구속효과의 정량적 분석으로, 노치 효과를 응력 재분포와 응력 완화 효과로 보정을 함으로서 예비균열의 도입이 어려운 소형 시편에서 노치를 이용하여 파괴인성을 평가할 수 있었다.

1) 응력 재분포 효과를 다음과 같이 유효균열길이로부터의 파괴인성, 즉 유효파괴인성값을 구하여 보정하였다.

$$K_{eff} = \lambda(a_{eff})\sigma_{nom}\sqrt{\pi \cdot a_{eff}}$$

2) 노치 주위의 구속도 감소에 의한 소성변형으로부터의 응력 완화 효과를 소성변형시 탄성응력 집중계수의 감소로부터 다음과 같이 보정하였다.

$$K_{IC} = \frac{\bar{k}_t}{k_t} K_{IC}^{app} = C_f \cdot K_{IC}^{app}$$

3) 예비균열을 도입한 시편에서 얻어진 기준 파괴인성값과 노치시편에서의 겉보기 파괴인성값을 보정하여 얻은 파괴인성값이 일치함으로부터 상기 이론적 보정방법이 타당함을 확인하였다.

4) 노치 반경이 증가함에도 불구하고 파괴인성값이 일정한 limiting notch root radius( $\rho_0$ )가 관찰되었으며 이는 결정립 크기 등의 미세조직학적인 인자와 관련이 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

1. ASTM standard E399, (1990)
2. BS 7448, (1991)
3. G.E. Lucas, Metall. Trans. A, 21A (1990) 1105.
4. P. Jung, A. Hishinuma, G.E. Lucas and H. Ullmaier, J. Nucl. Mater., 232 (1996) 186.
5. G. R. Irwin, Sagamore Research Conference Proceedings, 4 (1961)
6. H. Neuber, Kerbspannungslehre, 2nd ed., Berlin, Springer-Verlag, (1958)
7. M. Creager and P.C. Paris, Int. J. Frac. Mech., 3 (1967) 247
8. T.L. Anderson, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, CRC Press, Inc, (1995)

Table 1. Mechanical properties of SA 508 Gr.3 used in this study

Temperature	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation(%)
R.T.	457	602	29
-196°C	918	968	10.3

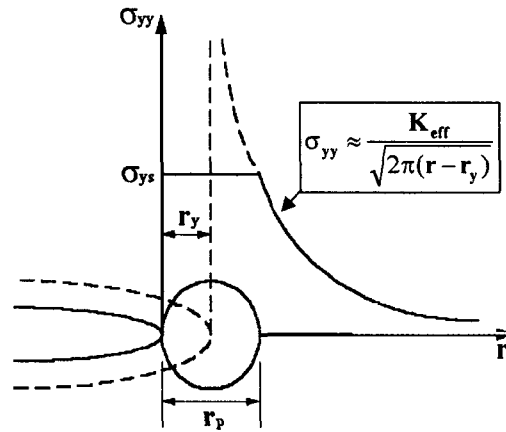


Fig. 1 The Irwin's plastic zone correction.

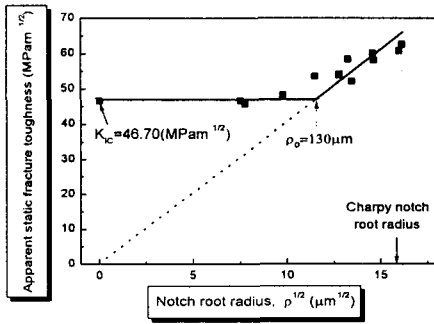


Fig. 2 Apparent fracture toughness as a function of notch root radius under static loading.

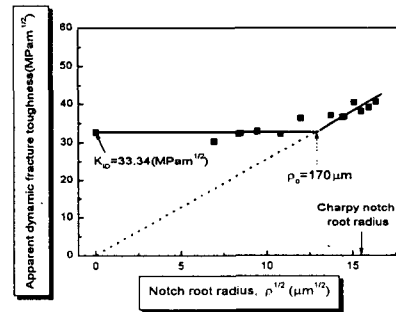


Fig. 3 Apparent fracture toughness as a function of notch root radius under dynamic loading.

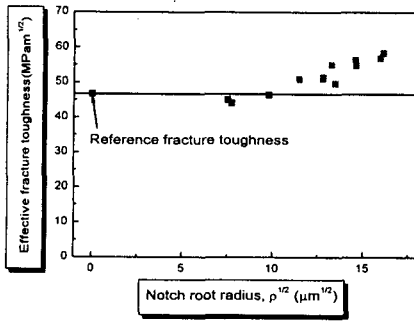


Fig. 4 Effective fracture toughness obtained by correction of stress redistribution effect under static loading.

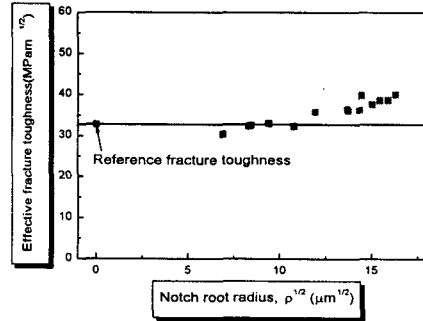


Fig. 5 Effective fracture toughness obtained by correction of stress redistribution effect under dynamic loading.

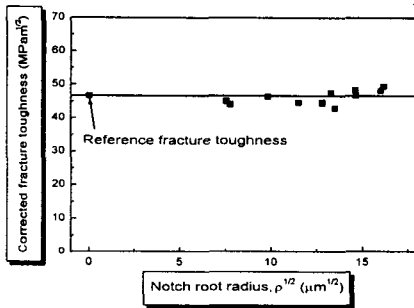


Fig. 6 Fracture toughness obtained by correction of stress redistribution and stress relaxation effect under static loading.

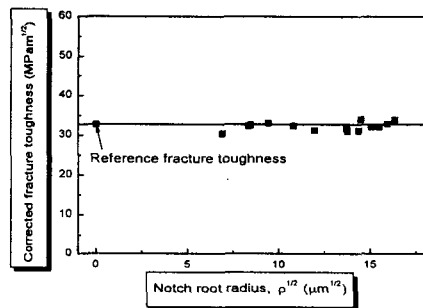


Fig. 7 Fracture toughness obtained by correction of stress redistribution and stress relaxation effect under dynamic loading.

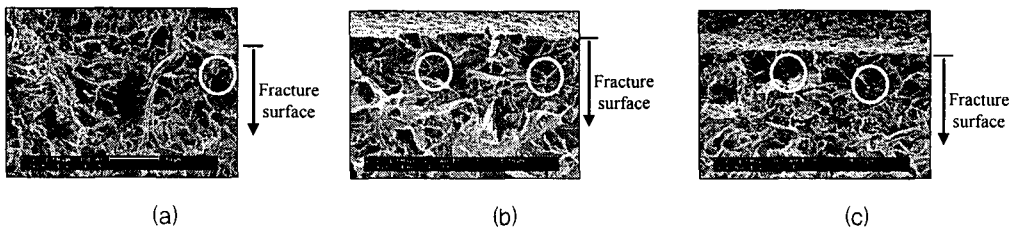


Fig. 8 SEM photographs of fracture origin location below limiting notch root radius (a) precracked, (b)  $\rho = 58 \mu\text{m}$  and (c)  $\rho = 91 \mu\text{m}$ .