

균열선단 개구변위를 이용한 파괴인성 평가와 구속효과와의 관계

한민수⁺·장석기⁺⁺·이돈출⁺⁺⁺·김성종⁺⁺⁺⁺·박종식⁺⁺⁺⁺⁺

The Relationship between Fracture Toughness and Constraint Effect using Crack Tip Opening Displacement.

Min-Su Han⁺, Seok-Ki Jang⁺⁺, Don-Chool Lee⁺⁺⁺, Seong-Jong Kim⁺⁺⁺⁺ and Jong-Seek Park⁺⁺⁺⁺⁺

Abstract : For the CT specimen of 25.4mm thickness SS400 steel, the fracture toughness and the magnitude of constraint effect, A_2 on the non-linear elastoplastic fracture behaviors were experimentally estimated by crack tip opening displacement. In order to estimate constraint effect, displacement measurement position near crack front should be the existed within plastic region. But it is found that the displacement measurement positions by the δ_5 method are in elastic region at crack growth initiation. Hence the estimate of constraint effect, A_2 by the δ_5 method was not reliable.

Key words : Fracture toughness(파괴인성), Constraint effect, A_2 (구속효과), δ_5 method(CTOD 측정법), Crack growth initiation(균열성장개시)

1. 서론

재료가 소성유동이 커지면 재료 내부에서 구속효과를 수반하게 되어 J-적분을 표현되는 HRR 특이장으로 균열선단의 응력장과 변형장을 표현하기 어렵다. 그래서 비선형 탄소성 파괴인성 평가에서, 소성유동을 갖는 대변형을 동반한 균열선단 구속수준 정도를 나타내는 부가적인 매개변수를 도입한 두 매개변수(Two Parameter) J- A_2 를 적용하여 실제 구조물의 파괴인성 평가에 사용되었다. J- A_2 이론⁽¹⁻²⁾은 다른 이론과 비교하여 균열선단의 응력이나 변형 또는 응력과 변형이 조합된 파괴해석에 사용된다. 이러한 J- A_2 이론은 구속매개변수인 A_2 를 수치해석 방법과 더불어 δ_5 기법⁽³⁾과 같은 실험적 방법으로 결정할 수 있도록 발전하였다.

본 논문에서는 변위(u_y)의 측정위치에 따른 균열선단 전연에서의 구속효과 A_2 값을 평가하고 δ_5 기법을 이용한 구속효과 A_2 값을 평가하고자 한다.

2. 실험재료 및 시험방법

2.1 시험 재료 및 시험편

본 시험에 사용된 재료는 선박 강재로서 두께가 25.4mm인 SS400구조 연강으로, ASTM E 1290-93 기준에 따라 CT시험편을 제작하여 기계 가공된 노치 선단에 2mm의 피로균열을 삽입하여, CT시험편 폭에 대한 균열길이 비(a_0/W)를 0.53인 형상을 갖는 CT시험편을 제작하였다.

2.2 시험방법

균열선단 개구변위(CTOD)와 균열성장량(Δa)을 변형게이지(strain gauge) 대신 광학현미경($\times 8$)을 사용하여 시험편 표면에서 실측하였다. CT시험편에 파괴인성 시험을 실시하기 위하여 INSTRON 8516 동적 인장 시험장치를 사용하였다. ASTM E 1737-96에 의거하여 모드 I 하중 상태에서 0.05mm/min의 준정적으로 부하하면서 복수 시험편을 이용한 R-곡선법으로 파괴인성을 평가하였다.

2.2 구속효과 A_2 를 평가하기 위한 균열선단 각 위치에서의 변위 측정

CT시험편 균열선단 상의 $r/(J/\sigma_0)$ 이 0 및 임계거리 2의 위치에서 변위를 측정하여 A_2 값을 계산하였다. 즉, $\theta = 68^\circ$ 에서 $r=1.0\text{mm}$, $r=2.8\text{mm}$ 위치, $\theta = \pi/2$ 에서 균열면 상하 $r=1.0\text{mm}$, $r=1.5\text{mm}$, $r=2.0\text{mm}$, $r=2.5\text{mm}$ 떨어진 위치에서 변위를 측정하였다. Fig. 1은 구속효과 A_2 평가를 위한 변위(u_y) 측정위치를 나타낸 그림이다.

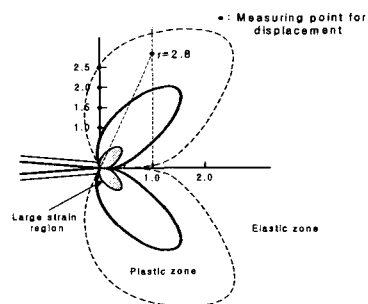


Fig. 1 Measuring points for displacement u_y to calculate the constraint effect, A_2

3. 시험결과 및 고찰

3.1 구속효과 A_2 값의 계산

A_2 값의 계산식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{u_y}{a\epsilon_0 L} = \bar{A}_1^n \left[\left(\frac{r}{L} \right)^{m_1+1} \bar{u}_y^{(1)}(\theta) + A_2 \left(\frac{r}{L} \right)^{s_1(n-1)+s_2+1} \bar{u}_y^{(2)}(\theta) + A_2^2 \left(\frac{r}{L} \right)^{s_1(n-1)+s_3+1} \bar{u}_y^{(3)}(\theta) \right]$$

+ 한민수(목포해양대학교 대학원 응용역학·재료공학전공), E-mail: mp949@mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7101

++ 장석기(목포해양대학교 기관시스템공학부 교수)

+++ 이돈출(목포해양대학교 기관시스템공학부 교수)

++++ 김성종(목포해양대학교 기관시스템공학부 교수)

+++++ 박종식(목포해양대학교 대학원 응용역학·재료공학전공)

$$\bar{A}_1 = \left(\frac{I}{ac_0 \sigma_0 J_{\pi} L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (1)$$

여기서, 경화지수 n , 경화계수 a , 유효항복강도 σ_0 와 유효항복변형을 ϵ_0 는 인장시험을 통하여 구했으며⁽¹⁻²⁾, L 은 특성화 길이로서 시험편 폭 $W=L$ 이며, s_1, s_2, s_3 는 고차항 응력지수,

$\tilde{u}_y^{(1)}(\theta), \tilde{u}_y^{(2)}(\theta), \tilde{u}_y^{(3)}(\theta)$ 인 무차원 각도 변위함수 및 적분상수 I_n 등은 Chao 등이⁽⁴⁾ 모드 I 평면변형을 조건하에서 유한요소해석으로 구한 결과를 활용하였다.

3.2 균열성장에 따른 구속효과 A_2 값의 거동

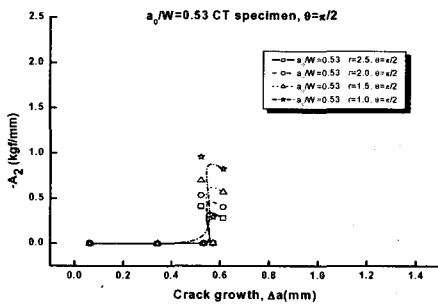


Fig. 2 $-A_2$ vs Δa curves at $\Theta = \pi/2$

Fig. 2는 균열선단 근방에서 A_2 값의 측정방향이 $\Theta = \pi/2$ 로 일정할 때, 거리 $r=1.0\text{mm}$, $r=1.5\text{mm}$, $r=2.0\text{mm}$, $r=2.5\text{mm}$ 에 따른 균열성장량 대 A_2 값의 거동을 비교한 것이다. 균열성장에 대한 A_2 값의 변화거동은 모두 균열성장량이 대략 0.5mm 까지 성장하는 동안 평면 변형을 구속효과의 크기, 즉 소성유동의 크기를 나타내는 A_2 값의 크기는 “0”을 나타내었다. 한편 측정위치가 소성영역내에 포함되었을 때 균열선단으로부터 변위 측정위치가 멀수록 변형에 따른 구속효과 A_2 의 값이 작게 나타났다. 즉, Schwalbe⁽⁹⁻¹⁰⁾가 제안한 δ_5 기법에 의한 $\Theta = \pi/2$, $r=2.5\text{mm}$ 영역에서 측정된 변위를 사용하여 균열성장개시 또는 소규모 균열성장 상태에서 A_2 값을 평가하는 것은 측정점이 탄성구간에 존재하기 때문에 부적절함을 알 수 있다.

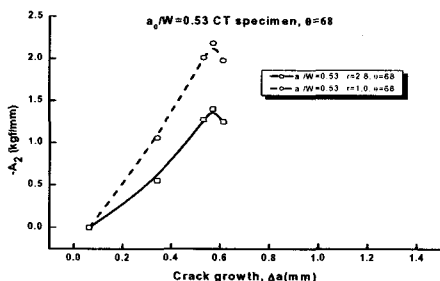


Fig. 3 $-A_2$ vs Δa curves at $\Theta = 68^\circ$

또한 Fig. 3는 동일한 방법으로 A_2 값의 측정방향이 균열선단에서 $\Theta = 68^\circ$ 로 일정할 때, 하중 증가에 따라 거리 $r=1.0\text{mm}$, $r=2.8\text{mm}$ 에서 측정된 균열성장량과 A_2 값을 비교한 것이다. 균열

성장 초기부터 균열선단 근방에서 구속효과가 나타나기 시작하였으며 균열선단에 가까워 변형이 상대적으로 큰 $r=1\text{mm}$ 인 영역에서 구속효과 A_2 값이 $r=2.8\text{mm}$ 에의 A_2 값 보다 크게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

두께 25mm 인 SS400 구조 연강에 CT시험편에 대한 균열선단 CTOD 측정위치에 따른 구속효과 A_2 의 비교를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

구속효과의 크기 A_2 는 변위의 측정위치 (r, θ)에 크게 종속하였다. 변위 측정위치가 소성영역 이내인 경우와 탄성영역인 경우에 따라 구속효과 A_2 값이 크게 차이가 있었다.

균열선단 균열 진전면에서 변위 측정방향이 $\Theta = \pi/2$ 일 때 변위 측정거리에 따른 구속효과 A_2 는 대체적으로 균열성장 초기인 $\Delta a = 0.5\text{mm}$ 까지 “0”의 값을 갖는 반면, 변위 측정 방향이 $\Theta = 68^\circ$ 일 때는 균열성장 초기부터 구속효과 A_2 의 값을 평가할 수 있었다. 따라서 균열성장 초기에 균열선단 근방의 구속효과를 평가함에 있어 δ_5 기법에 의한 균열선단 변위($\Theta = \pi/2$, $r = 2.5\text{mm}$)에서 구속효과 평가는 문제가 있다고 사료된다. 반면, $\Theta = 68^\circ$ 이고 균열선단으로부터의 거리가 $r = 1\text{mm}$ 떨어진 근방 소성영역에서 구속효과 A_2 값을 평가하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] S. Yang, Y. J. Chao and M. A. Sutton, “Higher order asymptotic crack tip fields in a power-law hardening material”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 45, No. 1, pp. 1-20, 1993.
- [2] Y. L. Chao, S. Yang and M. A. Sutton, “On the fracture of solids characterized by one or two parameters : Theory and practice”, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 42, No. 4, pp. 629-647, 1994.
- [3] Zhonghua Li and K. H. Schwalbe, Engineering treatment model for creep crack driving force estimation: CTOD in terms of δ_5 , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 68, pp. 221-233, 2001.
- [4] Chao, Y. J and Zhang L., “Table of plane strain crack tip fields : HRR and high order terms”, ME-report 97-1, University of South Carolina, 1996.