

균열선단 변위측정위치에 따른 STS 316L의 구속효과 A_2 거동

한민수[†] · 장석기^{*}

(원고접수일 : 2009년 5월 6일, 원고수정일 : 2009년 5월 22일, 심사완료일 : 2009년 5월 25일)

Experimental Behaviors of the Constraint Effects A_2 Depending on Displacement at Various Measuring Positions near Crack Front for STS 316L CT Specimen

Min-Su Han[†] and Seok-Ki Jang^{*}

Abstract : The magnitude of constraint effect A_2 values on the non-linear elastic plastic fracture toughness was experimentally estimated by using displacement at various measuring positions near crack tip. Constraint effect A_2 value was dependent on specimen configuration and on the measured displacement near crack front. The crack tip opening displacement in the vicinity of the crack tip front should be estimated within plastic region when appropriately constraint effect was calculated. It was found that the magnitude of constrain effect $|A_2|$ is below 8.0 at the crack tip. But an appropriate location to measure the effective constraint effects A_2 at the critical value of J that crack initiation is characterizable by is $r = 2\text{mm}$ and $\Theta = 90^\circ$ away from original crack tip, and the constraint effect $|A_2|$ estimated is 5.3.

Key words : Constraint effects A_2 (구속효과 A_2), Near crack front(균열선단), Fracture toughness(파괴인성), Crack tip opening displacement(균열선단 개구변위), Crack propagation(균열진전)

1. 서 론

균열선단 전연의 소성영역의 분포와 거동은 J-Q, J- A_2 이론과 같은 연성재료의 2매개변수 파괴해석에서 중요한 요소이다. 연성재료에 있어서 하중을 받은 균열은 균열선단에 소성영역을 형성하고 그 소성영역을 가로질러 균열이 진전하게 된다. 그리고 균열의 진전방향으로 균열선단 근접영역에서 소성영역이 크게 성장하게 된다. Zhonghua

Li와 K. H. Schwalbe^[1] 등은 구속효과의 크기를 균열선단에서만 평가하였는데, 균열선단뿐만 아니라 균열선단 근접영역에서도 구속효과의 크기를 평가^{[2]-[3]}할 필요가 있다.

본 연구에서는 연성이 큰 STS 316L의 CT시험편의 균열선단 그리고 균열선단 근접영역 균열 진전방향인 x축 방향 1, 2, 3mm 및 하중 방향인 y축 방향 1, 1.5, 2, 2.5mm, 및 3mm점의 위치에 서의 변위측정치를 활용하여 구속효과 A_2 를 실험

[†] 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail:mp949@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7471)

^{*} 목포해양대학교 기관시스템공학부

적 방법⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾으로 평가하고자 한다. 그리고 δ_5 기법⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾에 의한 A_2 와 비교하여 타당성을 검증하기 위하여 균열선단 상하 2.5mm에서 소성역 구속효과의 크기를 평가한다. 또한 균열성장과 소성역의 변화에 따른 변위측정 위치에 따른 구속효과의 변화 거동을 고찰한다.

2. 실험재료 및 시험방법

본 실험에 사용된 재료는 STS 316L로 그 기계적 특성을 Table 1에 나타내었다. 본 시험에 사용된 두께 25.4mm인 STS 316L CT시험편은 ASTM E 1290 기준에 따라 제작하였다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 측면홈이 기계가공된 CT시험편 노치선단에 1.5mm의 피로 예균열을 삽입하여, 시험편 폭에 대한 균열비(a_0/W)를 0.54이 되도록 CT시험편을 제작하였다. 파괴인성 시험 장치는 INSTRON 8516이다. ASTM E1820에 의거하여 복수 시험편을 이용한 R-곡선법으로 J-적분⁽⁸⁾을 평가하였다. 모드 I 하중 상태에서 0.05mm/min의 준정적으로 부하하면서 변위제어에 의하여 파괴시험을 실시하였다. 또한 δ_5 기법을 적용하기 위하여 Leica사의 MZ 12-5 광학현미경(X8)을 사용하여 균열선단 개구변위와 균열성장량(Δa)을 측정하였다. 광학현미경은 재료표면의 음영과 빛의 반사로 인하여 정확한 균열진전과 변위를 측정하기 어렵다. 그래서 CT시험편 표면을 비파괴 검사장비의 하나인 침투탐상용 세척액으로 충분히 세척하고

건조시킨 후 탄산염분말(Carbonate powder)이 주성분인 침투탐상용 현상제를 CT시험편 표면에 미세하게 도포하고 건조시켰다.

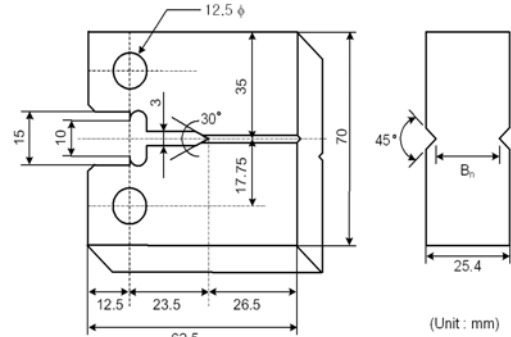


Fig. 1 Dimension and configuration of CT specimen for STS 316L

현상액이 완전 건조된 후 그 표면 위에 유색의 미세한 도료 입자($\Phi=0.02\sim 0.03$)를 분무하였고 균열선단 근방에서 분무된 특정 점들의 상대 변위를 계측하였다. 이 때 실시간으로 디지털카메라에 의해 화상으로 전송된 화상 데이터 처리는 프로그램 IMT(VT) IA을 사용하였다.

Fig. 2은 구속효과 A_2 평가를 위하여 계측한 변위 측정위치를 나타낸 것이다. 각점의 위치를 극좌표계로 표시하였는데 OD는 (r, θ)의 극좌표상의 (2.5mm, 90°)이 된다. 즉 OD는 균열선단에 대하여 균열선단에서 하중방향인 상하 90° 방향에 위치하며 균열선단으로부터 상하 2.5mm씩 떨어진 위치에서의 변위 측정점이다. 즉 δ_5 기법과 동일한 변위 측정위치에 해당한다. 그리고 구속효과 A_2 의 평가 식은 식(1)⁽⁵⁾과 같다.

Table 1 Mechanical properties of STS 316L

Name of properties	Test value
Yield strength, σ_Y (MPa)	273
Tensile strength, σ_U (MPa)	601
Elongation, ϵ (%)	47.1
Elastic modulus, E (MPa)	19.92×10^4
Strain hardening exponent, n	4.18
Plastic modulus, α	1.0
effective yield strength, σ_0 (MPa)	437
Effective yield strain, ϵ_0	0.04

$$\frac{u_y}{\alpha \epsilon_0 L} = \overline{A_1} \left[\left(\frac{r}{L} \right)^{ns_1+1} \tilde{u}_y^{(1)}(\theta) \right] + A_2 \left(\frac{r}{L} \right)^{s_1(n-1)+s_2+1} \tilde{u}_y^{(2)}(\theta) + A_2^2 \left(\frac{r}{L} \right)^{s_1(n-1)+s_3+1} \tilde{u}_y^{(3)}(\theta) \quad (1)$$

$$\overline{A_1} = \left(\frac{J}{\alpha \epsilon_0 \sigma_0 J_n L} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

Table 2 Stress exponents of high order terms and material constants for A_2 estimating

	Notation	Values				
		$\theta=90^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=33.7^\circ$	$\theta=26.6^\circ$	$\theta=18.4^\circ$
Dimensionless angular displacement function	$\tilde{u}_y^{(1)}(\theta)$	0.9212	0.0429	-0.0326	-0.0607	-0.0810
	$\tilde{u}_y^{(2)}(\theta)$	-0.6086	-0.1054	0.0261	0.0704	0.1179
	$\tilde{u}_y^{(3)}(\theta)$	1.5714	0.1781	0.0514	0.0163	-0.0013
Integration constant	I_n	5.1856				
Stress exponent of high order term	s_1	-0.1940				
	s_2	0.0367				
	s_3	0.2675				

여기서, 경화지수 n , 경화계수 α , 유효항복강도 σ_0 와 유효항복변형을 ϵ_0 는 시험을 통하여 구했으며, 그 값을 Table 1에 나타내었다. 또한, L 은 특성 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⁽⁹⁾등이 모드 I 평면변형을 조건하에서 유한요소해석으로 구한 결과를 활용하였고, 그 값을 Table 2에 나타내었다. 측정위치에 따라 실측된 변위 및 각각의 특성화 값을 식 (1)에 대입하여 계산된 구속효과 A_2 의 값을 평가하였다.

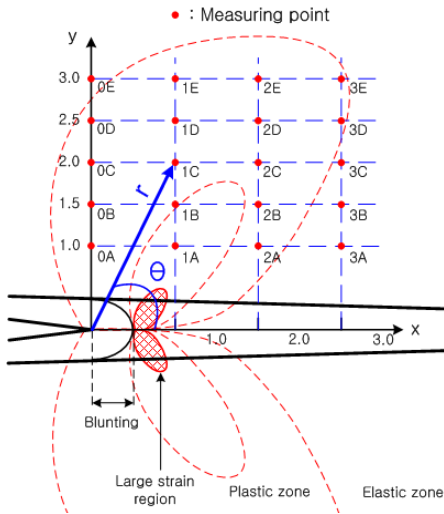


Fig. 2 Measuring points of displacement, δ to calculate the constraint effect, A_2 value

3. 시험결과 및 고찰

Fig. 3는 STS 316L CT시험편에 대한 균열선단 전과 J -적분과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 R -곡선과 둔화직선이 교차하는 점에 해당하는 J 값을 J_c 라고 하며, J_c 는 STS 316L의 탄소성과 피인성에 해당한다. 그리고 그 값은 414 KJ/m^2 이었다.

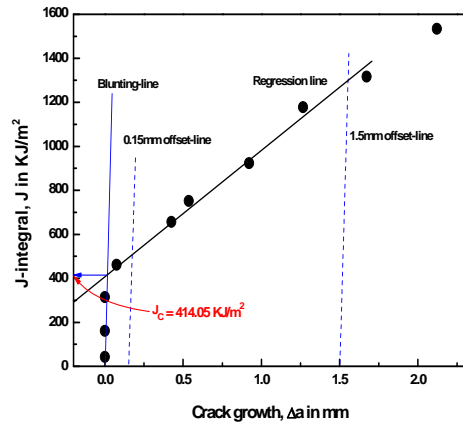


Fig. 3 J- Δa curve for STS 316L CT specimen to determine J_c

Fig. 4은 하중선변위의 증가에 대하여 변위측정 위치에 따른 균열선단 상하 변위 변화거동을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 균열선단에서는 변위측정 위치를 균열선단 상하 0.5mm 간격으로 달리하여도 변위 측정위치 전면에 걸쳐 하중선 변위에서 변

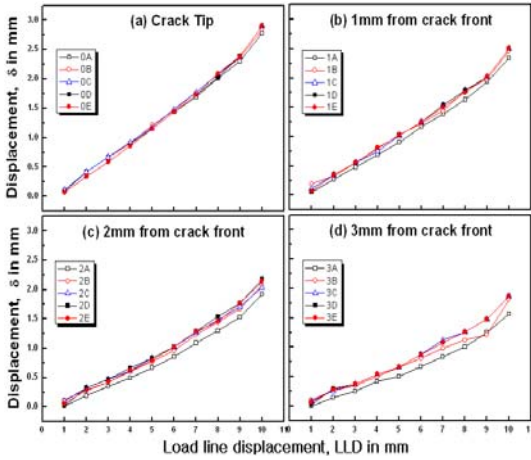


Fig. 4 Displacement vs. Load line displacement curves according to different y-direction measuring position

위 크기가 일정한 거의 유사한 거동을 보였다. 또한 0D(2.5mm, 90°)는 δ_5 기법에 해당하는 위치로 본 연구에 사용된 재료의 경우 균열선단 균열 축에 수직인 방향으로 2.5mm에서 일정 하중선 변위에서 변위 거동이 거의 같음을 알 수 있었다. 즉 균열선단에서의 변위거동은 측정위치에 무관하였다. Fig. 4 (b)와 (c)에서는 균열선단에서 멀어질수록 측정변위가 하중선 변위 크기에 비례하여 약간 크게 나타났다. θ 가 작은 위치일수록 변위 기울기는 작아졌다. 이것은 균열선단에서 균열진전 방향으로 멀어질수록 소성의 정도가 낮아지기 때문이다. 그림에서 1A(1.4mm, 45°)와 2A(2.2mm, 26.6°) 측정 위치에서의 변위는 다른 측정위치에서의 변위 값보다 다소 작게 나타났다. 1A와 2A는 균열진전방향인 x축 방향으로 균열선단에서 떨어져 있지만 측정 위치상으로는 균열선단에서 가장 가까운 측정위치이다. 균열선단 근방은 소성의 영향을 가장 많이 받아 변위가 크게 나타나야 하지만 반대로 그 값이 작아지고 있다. 이것은 균열선단에서 균열 진전방향으로 측정위치가 멀어질수록 소성 변형이 크지 않고 소성영역이 특정한 형상을 갖고 있음을 의미한다. Fig. 4 (d)에서 변위 거동은 상대적으로 가장 적게 나타났으며 3A(3.2mm, 18.4°)와 3B(3.35mm, 26.6°) 측정위치에서도 낮은 변위의 변화를 보였다. 이처럼 균열선단에서 균열진

전방향으로 일정 거리 멀어지면 소성변형이 하중 방향인 y축 방향으로 다소 거리를 두고 나타나는 것은 재료가 균열선단에서 평면변형율상태의 나비모양⁽¹⁰⁾의 소성유동을 보이기 때문으로 사료된다. 그러므로 지금까지의 변위거동을 통해 변위의 오차가 적은 균열선단에서 변위 측정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

Fig. 5 (a)는 시험편 표면균열성장대하여 균열선단에서 균열진전방향과 하중 방향인 y축 방향으로 변위 측정위치에 따른 구속효과 A_2 의 크기를 나타낸 것이다. 시험편 표면균열이 0.3mm 근방까지 성장하는 동안 구속효과는 미소하게 감소하였으나 거의 일정한 거동을 보였다. 균열선단에서는 변위측정위치를 하중방향인 y축 방향으로 0.5mm 간격으로 달리하여도 변위 측정위치 전반에 걸쳐 구속효과 크기는 8.0 이하인 거의 유사한 거동을 보였다. 여기서 0D는 δ_5 기법에 해당하는 위치로 균열선단 상하 2.5mm 전후 모든 계측점에서 거의 같은 구속효과를 보였다. Fig. 5 (b), (c), (d)에서는 2A(2.2mm, 26.6°)와 3A(3.2mm, 18.4°) 측정점을 제외하고 표면균열성장대 더불어 구속효과 A_2 의 변화거동은 균열성장이 0.2mm 이상부터는 일정한 값을 유지하였으나 측정위치에 따라 구속의 크기는 차이를 보였다. 특히 각각의 측정위치가 균열면으로부터 1mm 떨어진 A점상에서의 구속효과 거동이 급변하는 현상을 보였으며 구속효

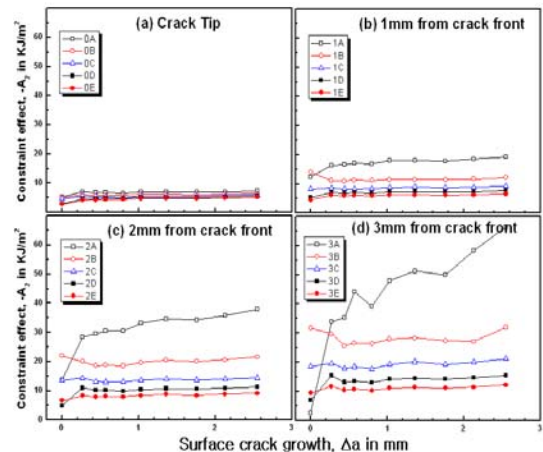


Fig. 5 $-A_2$ vs. surface crack growth curves according to different y-direction measuring position

과의 크기도 상대적으로 낮게 나타났다. 이러한 변화는 구속효과의 크기가 초기 감소하였다가 일정한 크기를 유지하는 Yang과 Chao등⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾의 평가한 구속효과 A_2 의 거동과는 차이를 보인다. 3B (3.4mm, 26.6°)와 3C(3.6mm, 33.7°) 측정점 역시 변위 δ 측정점 사이가 소성영역만으로 구성되었는지는 의심해 볼 필요가 있다.

Fig. 6는 하중선 변위가 4mm일 때 임계거리 ($r/(J/\sigma_0)$)에 따른 구속효과의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 균열선단에서 하중방향인 y축 방향으로 임계거리에 따른 구속효과 A_2 의 거동을 살펴보면 거의 일정하였다. 이와 같이 구속효과 A_2 의 크기가 Chao⁽⁵⁾의 임계거리 이내에서 크고 일정하게 나타난 것은 J- A_2 이론에 적합하며 재료가 갖는 구속효과를 잘 표현하고 있음을 나타내는 것이다. 한편 Yang⁽⁴⁾과 Chao⁽⁵⁾는 임계거리가 2일 때 구속효과 A_2 의 크기를 가장 잘 표현한다고 평가하였다. 따라서 임계거리 2 근방에 해당하는 0C(2mm, 90°)점에서 평가된 구속효과의 크기가 STS 316L의 구속정도를 가장 잘 표현한다고 할 수 있다. 지금까지 구속효과 A_2 의 거동으로 볼 때 STS 316L에 대하여 바람직한 구속효과의 평가 위치는 0C(2mm, 90°)로 판단되며, 그때의 구속효과 $|A_2|$ 의 크기는 5.3이었다.

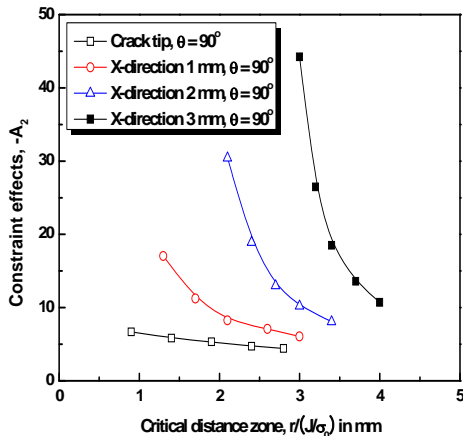


Fig. 6 Critical distance zone by Chao vs. $-A_2$ curves according to different y-direction($\Theta=90^\circ$) measuring position at load line displacement of 4mm

4. 결 론

측면 홈이 가공된 STS 316L CT시험편에 대하여 평면변형을 모드 I 인장하중 상태 하에서 구속효과 A_2 평가에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 균열선단에서 하중방향인 y축 방향으로 측정 위치에 따른 구속효과 $|A_2|$ 의 크기는 8.0 이하이며 거동 또한 유사하였다.
2. 측정범위 내에서 균열선단에 수직한 방향으로 구속효과 A_2 의 크기는 임계거리에 대한 영향이 거의 나타나지 않았다.
3. 균열개시 시점에서 임계거리에 대한 구속효과 A_2 의 거동으로 판단할 때 바람직한 구속효과 A_2 의 평가 위치는 균열선단에서 극좌표상으로 (2mm, 90°)로 판단되며, 그때의 구속효과 $|A_2|$ 의 크기는 5.3이었다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 한민수, 장석기, 이돈출, 김성종, 박종식, "균열선단 개구변위를 이용한 파괴인성평가와 구속효과와의 관계", 2006년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회, pp. 91-92, 2006.
- [3] 한민수, 장석기, "실험적 변위측정위치에 따른 구속효과 A_2 의 거동", 대한금속·재료학회지, 제 46권, 제 6호, pp. 345-350, 2008.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] Y. J. Chao and P. S. Lam., “On the use of constraint parameter A_2 determined from displacement in predicting fracture event”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 61, pp. 487-502, 1998.
- [7] G. P. Nikishkov, J. Heerens, K. H. Schwalbe, “Transformation of CTOD δ_5 to CTOD δ_{BS} and J-integral for 3PB- and CT-specimens”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 63, pp. 573-589, 1999.
- [8] J. R. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks”, Journal of Applied Mechanics, Vol. 1, pp. 379-386, 1968.
- [9] Y. J. Chao and L. Zhang, “Table of plane strain crack tip fields : HRR and high order terms”, ME-report 97-1, University of South Carolina, 1996.
- [10] 한민수, 장석기, 김성중, 고재용, 오영철, “균열선단 개구변위와 유한요소해석을 이용한 구속효과 평가”, 2007년도 한국마린엔지니어링학회, 전기학술대회, pp. 359 -360, 2007.

저 자 소 개



한민수

1997년 목포해양대학교 기관공학과 졸업, 2009년 목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과 졸업(공학박사)



장석기

1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수