韓國精密工學會 2000年度 春季學術大會論文集 pp.300-304

일반 구조용강 열간압연 박판에 대한 CTOD와 CTOA 곡선 결정

이계승*(인하대 대학원 기계공학과), 이억섭(인하대 기계공학부)

Determination of CTOD & CTOA Curve for Structural Steel Hot-Rolled Thin Plates

G. S. Lee(Mechanical Eng. Dept. INHA), O. S. Lee(Mechanical Eng. Dept., INHA)

ABSTRACT

The K-R design curve is an engineering method of linear-elastic fracture analysis under plane-stress loading conditions. By the way, linear-elastic fracture mechanics (LEFM) is valid only as long as nonlinear material deformation is confined to a small region surrounding the crack tip. Like general steels, it is virtually impossible to characterize the fracture behavior with LEFM, in many materials. Critical values of J contour integral or crack tip opening displacement (CTOD) give nearly size independent measures of fracture toughness, even for relatively large amounts of crack tip plasticity. Furthermore, the crack tip opening displacement is the only parameter that can be directly measured in the fracture test. On the other, the crack tip opening angle (CTOA) test is similar to CTOD experimentally. Moreover, the test is easier to measure the fracture toughness than other method. The shape of the CTOA curve depends on material fracture behavior and, on the opening configuration of the cracked structure. CTOA parameter describes crack tip conditions in elastic-plastic materials, and it can be used as a fracture criterion effectively. In this paper, CTOA test is performed for steel JS-SS400 hot-rolled thin plates under plane-stress loading conditions. Special experimental apparatuses are used to prevent specimens from buckling and to measure crack tip opening angle for thin compact tension (CT) specimens.

Key Words : Crack Tip Opening Displacement(CTOD; 균열 선단 열림변위), Crack Tip Opening Angle(CTOA; 균열 선단 열림각), J-integral(J 적분), Elastic-Plastic Fracture Toughness(탄·소성 파괴인성치), Ductile Fracture(연성파괴), Plane Stress(평면응력), Compact Tension specimen(CT; 소형인장시편)

1. 서론

일반 구조용강과 같은 비선형 재료에 선형 탄성 파괴역학(LEFM) 개념을 적용 것은 파괴거동에 있어 균열 선단 부근의 작은 영역에 제한되어 있을 경우에만 유효하다. 그러나 일반 구조용강의 균열 거동은 상당한 소성변형을 수반한다. 그러므로 이러한 재료들의 파괴특성 해석을 위한 여러 가지 방법들 중 CTOD(Crack Tip Opening Displacement)시험은 탄·소성 파괴거동 특성 해석에 있어 효과적인 공학적 방법으로 적용이 가능하다.

과거 20 여년 동안 전산의 발달로 일반적인 금속 재료의 균열개시 후 균열 확장에 따른 CTOA 는 수치적으로 일정한 값을 가지는 것으로 유한요소 해석을 통해 계산될 수 있게 되었다. 본 연구에 적용된 시편이 CT 시편이기 때문에 이러한 내용을 실험적으로 확인하기 위해 ASTM(E 1290-93)에서 정하는 기존의 CTOD 시험법을 적용해야만 했다. 그러나 SENB 시편에 국한한 영국 BS 표준의 CTOD 시험법과는 다르게 CT 시편의 적용을 허용하는 미국의 표준에서 조차도 얇은 CT 시편에 대한 정확한 실험적 접근방법이 소개되지 못한 점을 확인하고, 그 한계성을 극복하기 위해 기존의 실험들을 응용한 시험법을 새롭게 제안하고, 이를 수행하여 정확한 CTOD/CTOA 를 결정하였다. 결국 인성이 큰 압연강의 효과적인 파괴인성시험을 위해서는 개선된 방안이 모색되어야 한다는 것이다. 또한 비선형 재료의 파괴인성치 획득에 있어 고전적인 J 와 CTOD 결정은 다소 정험적인 측면에 의존적일 수 있기 때문에, 이 논문에서는 CTOA 가 지니는 파괴기준으로써의 유효성과 실험적인 정확성 및 제반사항에 대해서도 다루어졌다.

본 연구에서는 국내 유명 철강업체에서 생산되는 일반 구조용강 열간 압연 박판 중 JS-SS400 에 대해 CT 시편으로 제작하여, ASTM(E 1290-93, E 1737-96)에서 제시하는 CTOD 와 J 시험법을 응용하여 CTOA 시험을 수행하였다[1,3].

2. 이론

2.1 균열선단 열림변위

비교적 인성이 큰 일반 구조용강의 파괴 특성은 LEFM 으로 해석되기 어렵기 때문에 균열선단에서의 열림 변위를 측정함으로써 그 것이 가지는 경향으로 파괴인성을 특성화 할 수 있다. Fig. 1 은 균열선단 열림변위(CTOD)의 발생을 개략적으로 나타내고 있으며, 초기의 예리한 균열선단이 소성변형에 의해 둔화되며 균열선단에서 유한변위(δ)가 발생하게 된다[1].

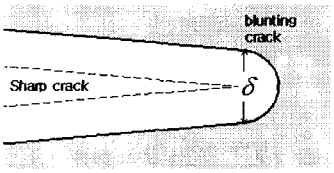

Fig. 1 Schematic of blunting crack tip region

2.2 CTOD 의 탄성과 소성성분

균열 무뎌짐에 의한 δ 는 CTOD 이며, 평면변형조건에서의 CT 시편 적용시, 식 (3)과 같이 구해질 수 있다. 이때 식 (1a)는 CTOD 의 탄성성분이고 탄성 K 로부터 얻어지며, 식 (1b)는 소성회전계수 r_p 를 활용하여 얻어지는 CTOD 의 소성성분이다.

$$\delta_{el} = \frac{K^2}{2\sigma_{ys}E} \tag{1a}$$

$$\delta_{pl} = \frac{r_p(W-a)V_p}{r_p(W-a)+a+z} \tag{1b}$$

여기서 K 는 응력확대계수, σ_{ys} 는 항복응력, E 는 탄성계수, W 는 시편의 너비, a 는 균열길이, V_p 는 균열개구변위의 소성성분, z 는 하중선과 V_p 측정선과의 이격거리이며, CT 시편의 경우 소성회전계수 r_p 는 식 (2)와 같이 적용된다.

$$r_p = 0.4\left[1+2\left\{\left(\frac{a_0}{b_0}\right)^2+\frac{a_0}{b_0}+0.5\right\}^{1/2}-2\left\{\frac{a_0}{b_0}+0.5\right\}\right] \tag{2}$$

단, a_0 는 초기균열길이이고, b_0 는 시편의 리가먼트 길이 이다.

즉, 식 (1a)와 (1b)를 더하여 전체 균열거동에 있어서의 CTOD 값을 식 (3)과 같이 산정한다[1,2].

$$\delta = \delta_{el} + \delta_{pl} \tag{3}$$

2.3 비선형 에너지 해방률과 CTOD 의 관계

CTOD 특성은 일반적으로 소규모 항복의 한계내에서 비선형 에너지 해방률인 J 와 일정한 관계를 가지며, 식 (4)와 같이 나타난다.

$$J = m\sigma_{ys}\delta \tag{4}$$

여기서 m 은 무차원 상수로써 plastic constraint factor 이고, 평면응력조건에서 m =1.0 을 취한다[1].

3. 실험

3.1 시험편

3.1.1 재료의 특성

Table 1 에서는 본 시험에 시편의 재료로 사용된 POSCO 에서 생산되는 JS-SS400 일반 구조용 열간 압연 강판의 기본적인 기계적 특성과 기본조성 및 재료의 성질을 나타내고 있으며, 이를 바탕으로 추정되는 K_{Ic} 는 시편의 형상 설계에 적용 되었다[4].

Table 1 Mechanical properties of specimens

Hot-Rolled Steel	Nominal composition (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Al	Other
JS-SS400	0.158	0.01	0.67	0.016	0.010	0.032	-

Mechanical properties					
Thick-ness (㎜)	Yield Stress (㎫)	Tensile Stress (㎫)	Elong-ation (%)	Young's modulus (㎓)	Expected Fracture Toughness, K_{Ic} (㎫√㎜)
4.3	313.6	482.2	33	163.9	77

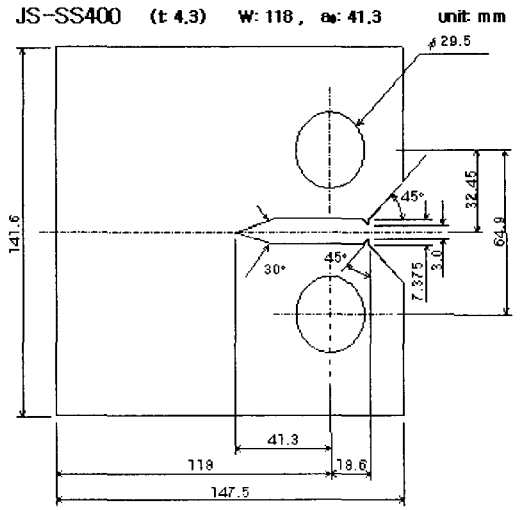

Fig. 2 Configuration of test CT specimens

3.1.2 시편 형상

시편의 형상은 ASTM(E 1290-93, E 1737-96)에서 정하는 일반적인 소형인장 CT 시편의 형상 기준에 준하여 설계 제작되었으며, 기본적인 형상은 Fig. 2 에서 보는 바와 같다.

3.2 실험장치 구성 및 데이터처리 과정

실험장치는 Fig. 3 에서 나타낸 것과 같이 구성되어 있고, 얻어지는 데이터의 처리 과정이 도식적으로 설명되고 있다. 만능인장시험기를 이용하여 하중속도 0.5mm/min 를 유지하는 정하중을 부여하고 로드셀로 하중 값을 도출하며, COD 게이지의 변위차는 데이터로거로 기록하였다. 또한 거치형으로 개조된 CCD 장비를 장착하여 CT 시편의 균열확장 및 전파 과정을 주기적으로 100 배, 300 배, 800 배율로 촬영하고 이를 통해 얻어진 영상을 분석하여 CTOD 및 CTOA 측정치를 결정하였다[4,5].

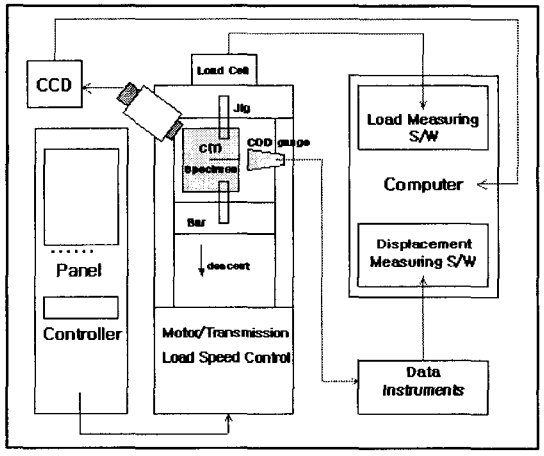

Fig. 3 Block diagram of experimental apparatus

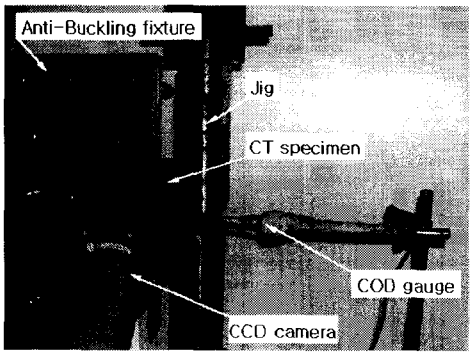

Fig. 4 Anti-buckling fixture for testing thin CT specimens

3.3 초기균열 삽입 및 시편의 버클링 방지

초기균열은 일반적으로 피로균열삽입을 원칙으로 하지만, 해당 시편과 같이 연성파괴를 일으키는 박판의 경우 피로균열삽입 과정이 용이하지 못하여, 매우 예리한 톱가공으로 대체할 수 있다. 그리고 박판 시편의 경우 하중 Mode III 에 의해 시편이 비정상적으로 뒤틀리기 때문에 버클링 방지판을 제작하여 장착해야 하므로, 본 실험에서는 고강도 스테인리스강으로 제작하여 적용하였다. Fig. 4 는 만능인장시험기에 장착된 시편의 모습이다[5].

3.4 CTOA 측정

CCD 광학영상장비를 활용하여 CTOA 를 실시간으로 촬영할 수 있으며, Fig. 5 에서와 같이 인접한 지점에서의 변화를 연속적으로 다중 측정한다.

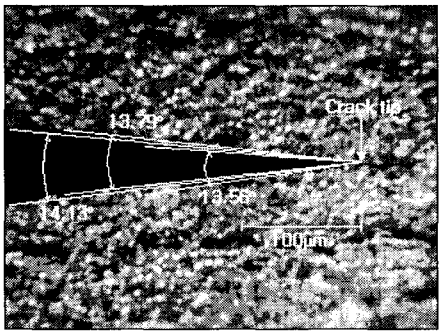

Fig. 5 Measurement of angles at the crack tip by using CCD

4. 실험결과

JS-SS400 이 압연강이므로 TL 과 LT 방향으로 구분된 시편을 적용하여 실험한 결과는 다음과 같다.

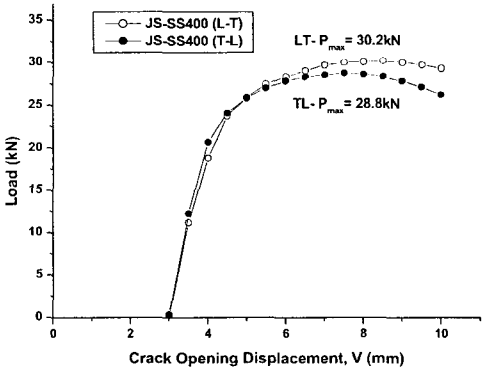

Fig. 6 Load vs. crack opening displacement curves

Fig. 6 은 개구변위(COD)에 따른 하중 값의 변화이고, TL 시편의 경우가 LT 의 경우보다 다소 낮은 하중상승을 나타낸다.

Fig. 7 은 균열성장에 따른 광학적인 측정을 통

한 CTOD 곡선의 거동을 나타낸 것이다. TL 시편의 경우가 LT 의 경우보다 다소 낮은 CTOD 값을 나타낸다. 또한 비선형 에너지 해방률(J)로부터 계산되는 이론치와 비교되었을 때. CCD 장비를 통한 실제로 측정된 CTOD 값이 파괴인성 측면에서 과대평가되지 않았음을 알 수 있다.

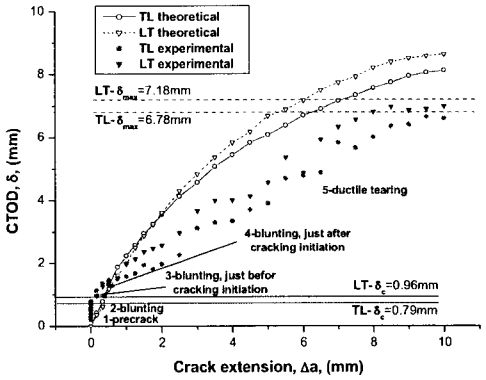

Fig. 7 Crack tip opening displacement vs. crack extension

Fig. 8 은 균열성장에 따른 CTOA 곡선의 거동을 나타낸 것이다. 임계 CTOA 값은 TL 시편의 경우가 LT 의 경우보다 약 2.5° 정도 작게 나타낸다.

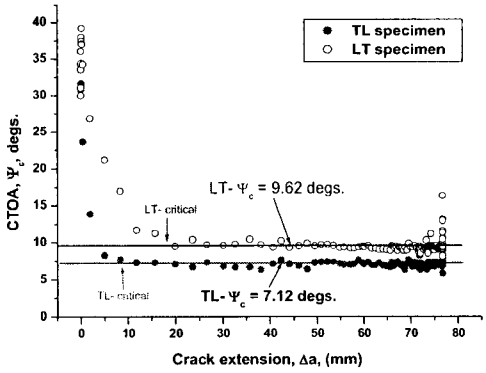

Fig. 8 Crack tip opening angle vs. crack extension

5. 결론

본 연구에서는 ASTM(E 1290-93)에서 표준으로 정한 CTOD 실험에 관한 내용의 한계성을 극복하고자, 국산 주요 일반 구조용 압연 강판인 JS-SS400 을 재료로 박판시편에 대한 적용성을 확인하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인성이 큰 박판재료의 파괴특성을 규명하기 위해 CTOA 의 측정은 기존의 CTOD 의 측정보다 더욱 용이하며 효과적인 방법임을 확인하였다.

(2) CTOD 와 CTOA 모두의 경우 TL 시편이 LT 시편의 경우보다 다소 낮은 수치를 나타내므로, 실제 파손기준도 TL 의 경우를 취해야 할 것이다.

(3) CTOA 거동에 있어 임계값의 산정은 균열의 불안정성장을 기준으로 균열전파의 80%, 즉 리가먼트의 80% 정도까지의 측정값을 고려해야 한다. 이는 초반의 균열 무뎌짐과 후반의 시편 경계 영향에 따른 불규칙한 CTOA 값을 배제하기 위함이다.

(4) 두께가 얇은 압연강의 경우이지만, 균열전파 시 연성파괴거동에 따른 두께방향으로 shear lips 이 발생하므로 CTOA 는 시편 표면을 촬영하여 획득되므로 내부의 crack tunneling 을 기준하기 위해서는 여러 번의 시험을 통해 보정 되어야 한다. 하지만, 그 오차는 압연강에 있어 무시할만하다.

(5) 시편에서 균열전파 시 연성찢어짐은 거의 일직선을으로 전파되지만, 균열선단에서는 실제로 미소한 kink 현상이 다수 발생하므로 동일 지점 인근에 대한 CTOA 는 최소한 3 회 이상 측정되어 평균 산정되어야 오차를 최소화 할 수 있다.

(6) 균열이 리가먼트의 80%정도에 이르기 전까지는 버클링 방지판을 적극적으로 활용해야 한다. 이는 Mode I 하중인 일축응력상태 조건을 단속하기 위해 필수적이다.

후 기

POSCO 시편협조에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

1. T.L. Anderson, "Fracture Mechanics" CRC, 2nd edition, pp. 117 - 181, 1995.
2. T. Pardoen and F. Delannay, "A method for the metallographical measurement of the CTOD at cracking initiation and the role reverse plasticity on unloding" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, pp. 455 - 466, 2000.
3. J.C. Newman Jr., M.A. James and U. Zerbst, "A review of the CTOA/CTOD fracture criterion" Engineering Fracture Mechanics, Vol. 70, pp. 371 - 385, 2003.
4. 이계승, 이억섭, "일반구조용강 열간압연 박판의 K 와 J 파라미터에 대한 R 곡선 거동의 비교" 한국 정밀공학회, 추계학술대회 논문집, pp. 812-815, 2002.
5. 이억섭, 이계승, 백준호, 편장식 "일반구조용강 열간압연 박판에 대한 K-R 곡선 결정" 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 9 호, pp. 98-105, 2002.