

## STS 316L의 재결정 열처리법을 이용한 구속효과 평가

한민수† · 장석기\*

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

### Evaluation of the Plastic Region Using Recrystallization Heat Treatment for Constraint Effect with STS 316L

Min-Su Han<sup>†</sup> and Seok-Ki Jang<sup>\*</sup>

**Abstract :** The constraint effect  $A_2$  has to be evaluated within plastic region near crack tip front using opening displacement. Plastic boundary and stress or strain conditions in the vicinity of the crack tip using recrystallization heat treatment was represented. It was found that the plastic deformation boundary by recrystallization heat treatment method was the true strain of  $\epsilon_t = 0.05\text{mm/mm}$ . With the estimation of constraint effects  $A_2$ , the region of proper displacement measurement point near crack tip was between 0mm and 1mm distance toward direction of crack propagation, and was between 1mm to 3mm distance toward direction of load line.

**Key words :** Recrystallization heat treatment(재결정열처리), Constraint effect  $A_2$ (구속효과  $A_2$ ), Crack tip(균열선단), Crack tip opening displacement (균열선단 개구변위), Crack propagation(균열진전)

### 1. 서 론

균열선단에서 소성영역의 크기와 거동은 연성재료의 파괴해석에 있어서 많은 정보를 제공한다. 최근에 파괴역학은 2매개변수<sup>[1]</sup>를 이용하여 구조물의 파괴와 파손을 평가하고 구속효과를 실험에 의해 정량적으로 평가<sup>[2]-[3]</sup>하기에 이르렀다. 그러나 대부분 연구논문은 수치해석<sup>[4]-[5]</sup>에 머무르거나  $\delta_5$  기법<sup>[6]</sup>과 같은 변위 계측을 이용한 실험적 방법을

병행하였을 때에도 재료에 따라 변위 측정위치가 소성영역 내에 있는지 명확하지 않았다. 구속효과의 평가에 있어서 평가 위치는 반드시 소성영역 이내에서 존재하여야 하며, 대변형영역이나 탄성영역에서의 구속효과 평가는 더 이상 유효하지 못하게 된다<sup>[7]</sup>. 한편, 소성영역의 가시화 및 정량적 규명은 Iino<sup>[8]</sup>와 Shoji<sup>[9]</sup>등이 재결정법으로 소개하였다. 이 방법은 소성영역의 형상과 크기를 시편의 표면뿐만 아니라 내면까지도 관찰이 가능하다.

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

\* 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

본 연구에서는 재결정법을 사용하여 STS 316L CT 시험편의 균열선단 소성영역과 소성의 성장거동을 가시화하고 그 소성영역 내에서 구속의 효과를 평가함으로써  $\delta_5$  기법의 변위측정 시 변위측정 위치 선정의 적합성을 검증한다. 또한 적절한 구속 효과평가를 위하여 균열선단 변위측정 위치를 제안하고자 한다.

### 2. 실험재료 및 시험방법

본 실험에 사용된 두께 25mm인 STS 316L의 기계적 특성과 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서 파괴인성평가에서 소성영역 내의 변형정도를 알아보기 위하여, 파괴인성평가 시험시와 동일한 재질과 동일한 0.254mm/min의 인장속도로 인장시험편을 인장하였다. 진변형율은 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.1, 0.2mm/mm 그리고 0.3mm/mm이 되도록 8종류의 인장시험편을 인장시험한 후 재결정 열처리하여 진변형율 재결정 조직과 모재의 평균입도를 비교하였다.

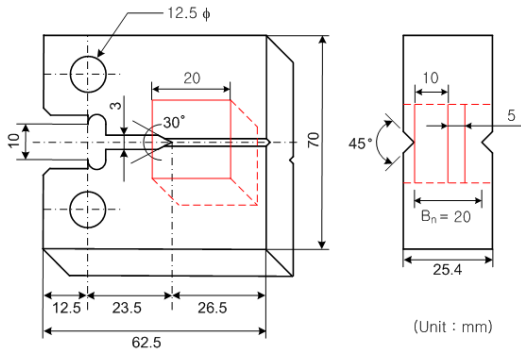


Fig. 1 Dimensions and configuration of CT specimen after fracture toughness test for observing plastic zone by recrystallization

Fig.1은 재결정 열처리에 사용된 CT시험편 형상과 치수를 나타낸 것이다. STS 316L에 대한 J-A<sub>2</sub> 파괴인성평가<sup>(1)</sup>에서 하중선변위(LLD)가 3mm, 4mm 그리고 5mm일 때의 소성영역을 비교하였다. 이 때 조직관찰 면은 시험편 두께방향으로 중심인 면과 정미두께 표면 그리고 이 두면의 사이 정미 두께의 1/4인 지점에 해당하는 면에 대하여 실시하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

Fig. 2는 STS 316L 시험편에 대한 파괴인성평가에서 R-곡선법 평가시 균열성장량과 하중선변위 거동을 나타낸 것이다. CT 시험편의 하중선 변위가 4mm 일때 균열성장량이 0.075mm이므로 하중선 변위가 4mm일때를 파괴개시 시점으로 평가하였다.

Fig. 3은 STS 316L 인장시험편에 서로 다른 진변형율로 변형하여 8종류의 인장시험편을 인장 시험하고, 930℃의 온도로 30시간동안 재결정 열처리하여 진변형율에 대한 재결정 조직과 모재를 비교한 것이다. 모재와 비교하여 진변형율이 0.02~0.03mm/mm까지의 입도는 거의 비슷하였으며, 진변형율이 0.04mm/mm인 경우는 입도가 약간 줄어드는 현상을 보였는데 재결정 성장에 필요한 소성변형이 상대적으로 적어 재결정 핵이 생성하였으나 성장을 이루지는 못한 것으로 판단된다. 그리고 진변형율이 0.05~0.06mm/mm에서는 확실한 조직의 성장을 보였다. 또한 진변형율이 0.1mm/mm 이상 증가하면 소성변형이 커지면서 시험편에 전위의 축적이 커지므로 재결정핵이 수도 증가할 것이다. 이러한 많은 재결정핵의 생성으로 차츰 조밀한 조직을 보이게되며 네킹 발생이 시작하는 진변형율 0.3mm/mm에서는 모재보다 입도

Table 1 The mechanical properties and chemical composition of STS 316L.

Mechanical properties	Tensile strength(MPa)				Yield strength(MPa)				Elongation(%)			
	601				273				47.1			
Chemical composition	Element	Fe	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo	N	
		Wt(%)	67.56	17.21	10.48	0.021	1.15	0.75	0.0027	0.012	2.40	0.035

가 78.2% 감소한 조밀한 입도를 보였다. 진변형율이 0.05mm/mm에서는 모재 대비 입도가 약 2.5 배 이상 증가하였으며 이때의 변형량을 STS 316L의 한계변형으로 평가하였다.

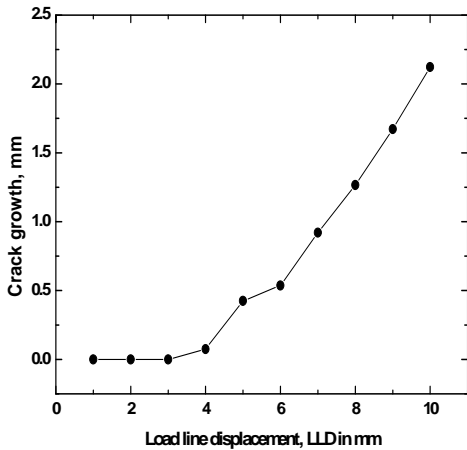


Fig. 2 Crack growth vs. LLD curve of STS 316L CT specimen by R-curve method

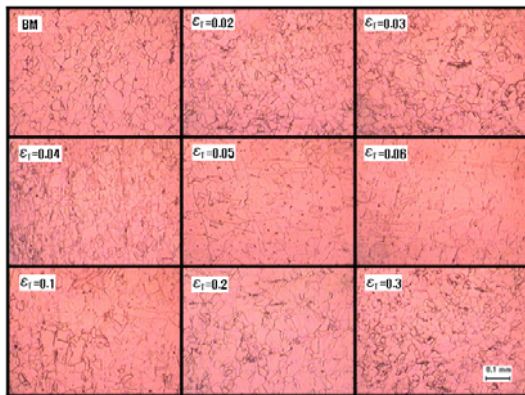


Fig. 3 Microstructures of various true strains,  $\epsilon_t$  under recrystallization annealing heat treatment (930 °C, 30hrs) with STS 316L tensile test specimen

Fig. 4는 STS 316L의 파괴인성평가 시험 중 하중선변위가 3, 4 그리고 5mm일 때 재결정을 통한 시험편 내면의 소성영역을 거시적으로 나타낸 것이다. 조직관찰은 시험편 두께방향으로 중심인 면과 정미두께 표면 그리고 이 두면의 사이 즉, 정미 두께의 1/4인 지점에 해당하는 면에 대하여 조

직을 관찰하였다. 하중선변위가 증가할수록 소성영역의 크기가 크게 나타났으며, 사진에 선으로 그 변형량을 표시하였다. 넓게 나타난 영역이 재결정에 의한 소성한계 변형량인 0.05mm/mm의 경계이며, 균열선단에 작게 나타난 영역이 진변형량 0.3mm/mm의 경계이다. 시험편 두께 중앙과 정미두께의 1/4인 지점의 소성영역 형상은 유사하였고 소성면적도 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 정미두께 표면은 은행나무잎과 같은 형상을 하며 소성면적도 크게 나타났다. 이것은 시험편 내면은 3차원 평면변형 상태를 유지하고 있어 그 모양과 크기가 일정하고 소성유동이 균열선단에서 45° 방향으로 진행한 나비모양을 나타냈으나 정미 두께 표면은 측면 홈을 가공하였음에도 불구하고 평면응력 상태에서 완전히 벗어나지 못하여 평면응력 상태의 소성영역형상과 평면변형률상태의 소성영역형상을 동시에 나타낸 것으로 판단된다.

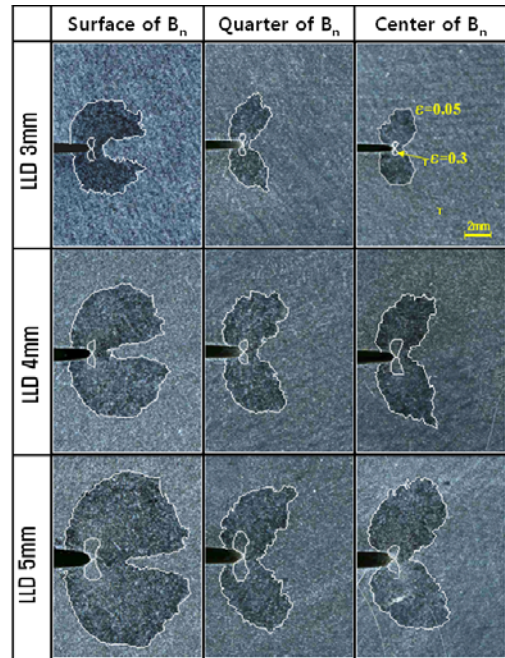


Fig. 4 Plastic region near crack tip according to load line displacement of STS 316L CT specimen

Fig. 5는 하중선변위가 4mm일 때 정미두께의 중앙에서 재결정된 소성영역의 미세조직을 나타낸

것이다. 균열선단에 진변형이 0.3mm/mm 이상인 대변형 구간이 존재하였고, 대변형 구간을 진변형을 0.05 mm/mm인 소성한계변형 영역이 감싸고 있었다. 그리고 Fig. 5에서 4번과 같이 진변형을 경계를 확대 하여 보면, 소성거동에 있어서 소성영역이 균열선단에서 45°방향으로 성장하는 동안 균열선단 전연에서 균열진진방향인 x축 방향으로 약 1.0mm 전진한 영역에서 소성한계변형이 발생하지 않은 영역이 관찰되었다. 이러한 소성한계변형이 나타나지 않은 영역은 진변형을 0.05mm/mm 이내이거나 공학적 탄성한계 0.02 mm/mm 이내라 판단된다. 그러므로 구속효과 A<sub>2</sub>의 평가가 균열선단 상하 변위거동을 평가한다고 했을 때 균열진진방향인 x축 방향으로 1.0mm 이상 전진하여 평가하는 것은 탄성을 포함할 수 있어 바람직하지 못할 것으로 평가된다.

Fig. 6은 STS 316L의 변위측정을 통한 구속효과 A<sub>2</sub> 평가에 있어서 하중선변위가 3, 4 그리고

5mm일 때를 재결정을 통한 소성영역과 구속효과 A<sub>2</sub>의 평가 위치를 선으로 나타낸 것이다. 하중선변위가 4mm와 5mm에서는 균열선단과 x축 방향으로 1mm 선상에서 평가된 구속효과 A<sub>2</sub>는 소성영역이내에서 평가된 결과이므로 구속의 정도가 충분히 표현되었다고 판단된다. 그러나 다른 측정 위치에서 구속효과 A<sub>2</sub>의 평가는 하중선변위가 3mm일 때와 마찬가지로 탄성영역이 구속효과 평가 범위에 내재될 수 있어 구속효과 A<sub>2</sub>의 크기를 완전히 신뢰하기는 어려웠다. 그러므로 파괴개시 시점 소성영역 내에서 구속효과 A<sub>2</sub> 평가를 위한 바람직한 변위 측정위치는 x축 방향으로 0 ~ 1mm, y축 방향으로 1 ~ 3mm를 제안하였다. 이와 같이 구속효과 A<sub>2</sub>의 평가는 소성영역 내에서 변위를 계측하고 평가할 뿐만 아니라 균열선단으로부터 방향과 거리에 한계가 있음을 보여주고 있다. 따라서 실험에 사용된 STS 316L에 대하여 보다 엄격한 구속효과 A<sub>2</sub>를 평가하기 위해서는 균열선단 개구변위 선상에서

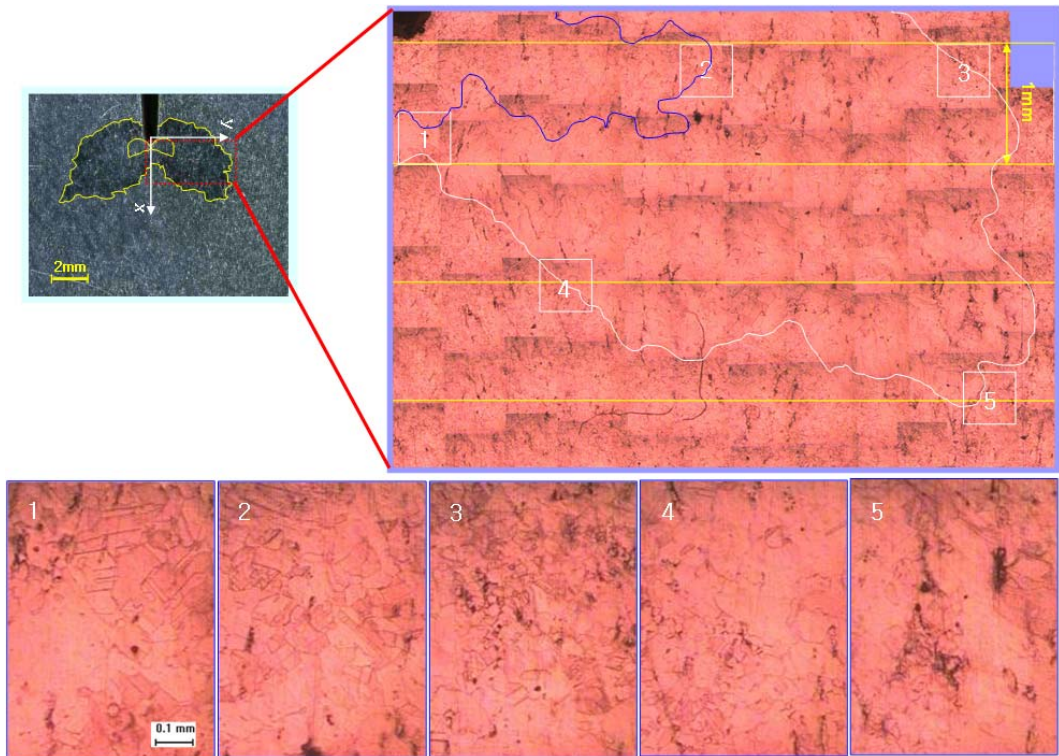


Fig. 5 Microstructures of plastic region near crack tip at center of net thickness under LLD 4mm

균열선단 상하 2mm이내에서 평가하는 것을 권장한다.

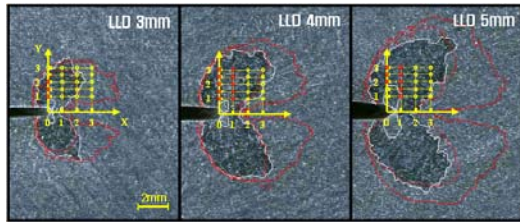


Fig. 6 Compared plastic zone with measuring points of constraint effect  $A_2$  for STS 316L

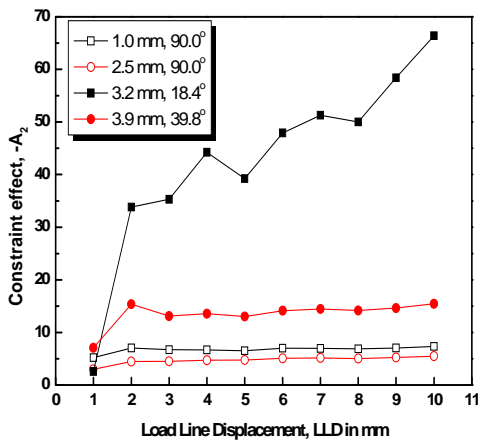


Fig. 7  $A_2$  behaviors of both plastic and included elastic regions for STS 316L

Fig. 7은 구속효과  $A_2$  평가에서 구속효과의 유효성을 평가하기 위하여 소성영역 이내의 영역과 탄성영역에서 구속효과를 비교<sup>[3]</sup>하였다.  $\delta_5$  기법에 의한 구속효과 평가위치를 포함하여 균열선단으로부터 입계거리가 가장 가까운 균열선단 상하 1mm, 90°점은 소성영역 이내에 해당하며, 균열선단 상하 3.9mm, 39.8°점과 균열선단 상하 3.2mm, 18.4°점은 탄성영역을 포함한 구속효과  $A_2$  평가 위치에 해당한다. 소성영역에서 구속효과를 평가는 하중선변위가 2mm 지나면서 약간의 변화는 보였으나 일정한 값을 유지하였다. 이것은  $J-A_2$ 이론<sup>[1]</sup>에서 HRR<sup>[10]-[11]</sup>과의 차이를  $A_2$ 로 표현한 내용과 일치하는 것으로 평가되어진다. 그러나 탄성영역을 포함하는 구속효과 계측 범위에서는

구속효과의 크기가 대단히 높게 나타났으며, 그 변화도 불규칙적임을 알 수 있었다. 이것은  $J-A_2$ 이론에서 구속효과의 평가가 소성영역이내에서 평가되어야 한다는 기본 가정에 위배되었기 때문에 초래된 결과로 판단된다.

#### 4. 결 론

STS 316L에 재결정법으로 소성유동을 가시화하고 소성영역 내에서 2 매개변수 중 하나인 구속 정도의 평가를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인장시험편의 진변형율에 의한 재결정 입도를 관찰한 결과 모재와 비교하여 진변형율이 0.02~0.04mm/mm까지는 재결정 핵의 성장이 거의 관찰되지 않았으며, 진변형율이 0.05~0.06mm/mm에서는 재결정상이 뚜렷하였다. 또한 진변형율이 그 이상 증가할수록 재결정핵 생성량이 증가하여 조직이 모재와 비교하여 조밀하였다.
2. 파괴개시 시점 소성영역 내에서 구속효과  $A_2$  평가를 위한 바람직한 변위 측정위치는 균열진전 방향으로 0~1mm, 하중선 방향으로 1~3mm범위였다.

#### 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 한민수, 장석기, 이돈출, 김성중, 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, 제46권, 제6호, pp. 345-350, 2008.
- [4] Y. J. Chao and X. K. Zhu, "A simple theory for describing the transition

between tensile and shear mechanisms in mode I, II, III, and mixed-mode fracture”, Mixed-Mode Crack Behavior, ASTM STP 1359, pp. 41-57, 1999.

- [5] Chongmin Song, John P. Wolf, “Semi-analytical representation of stress singularities as occurring in crack in anisotropic multi-materials with the scaled boundary finite-element method”, Computers and Structures, Vol. 80, pp. 183-197, 2002.
- [6] Zhonghua Li and K. H. Schwalbe, “Engineering treatment model for creep crack driving force estimation: CTOD in terms of  $\delta_5$ ”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 68, pp. 221-233, 2001.
- [7] 한민수, 장석기, “실험적 변위측정위치에 따른 구속효과  $A_2$ 의 거동”, 대한금속·재료학회지, 제 46권, 제 6호, pp. 345-350, 2008.
- [8] Y. Iino, “Accumulated plastic zone around fatigue crack in type 304 stainless steel”, Metal Sci. Vol. 10, pp. 159-164, 1976.
- [9] T. Shoji, “Deformation of crack tip energy dissipation and elastic-plastic toughness parameter with ductile crack extension” Journal of Testing and Evaluation, Vol. 6, pp. 324-334, 1981.
- [10] J. W. Hutchinson, “Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material”, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 16, pp. 13-31, 1968.
- [11] J. R. Rice and G. F. Rosengren, “Plane strain deformation near a crack tip in a power law hardening material”, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 16, pp. 1-12, 1968.

## 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