

# 가스배관재의 피로균열진전거동과 파괴저항특성곡선에 관한 연구 A Study on Fatigue Crack Growth Behavior and R-Curve Characteristics of Gas Piping Material

손종동 · 임만배

J. D. Son and M. B. Lim

**Key Words** : Elastic Plastic Fracture Toughness(탄소성파괴인성), Side Grooved(측면홈), J R Curve(파괴저항곡선), Single Specimen Unloading Compliance Method(단일시험편 해중법), Gas Piping Material(가스배관재), J Integral(J적분), Crack Length(균열길이), Fatigue Crack Growth(피로균열진전)

**Abstract** : SG 365 steel is an important material and used for manufacturing a pressure vessel which the gas piping. In this investigation, the elastic plastic fracture toughness of this material is evaluated by the unloading compliance method according to the ASTM E813 97 and E1152 97 method on the smooth and side groove ICT specimens. The effect of smooth and side groove is studied on the elastic plastic fracture toughness. The side grooved specimen is very useful in estimation of the  $J_{IC}$ . It is much easier than the smooth specimen to the onset of the ductile tearing by the R curve method. Besides, it improves the accuracy of toughness values, decreases a phenomenon of the tunneling and shear lip by the side groove.

## 1. 서 론

최근 산업이 고도화로 발달함에 따라 가스설비 및 부속설비 등을 구성하는 장치재료는 사용하는 중에 발생하는 손상원인으로 기계적 원인 화학적 원인 사용 중 재료의 열화 및 이들 요인에 의한 복합적인 면을 생각할 수 있다. 기계적 원인으로 연성 파괴, 취성파괴, 피로파괴 등이 있다. 피로파괴원인을 규명하여 설비재료의 잔존수명을 평가하고 분석하여 경제적 손실뿐만 아니라 인명 재해방지에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 본 연구에 사용된 재료는 파이프라인에 이용하여 많은 용접부를 가지고 있기 때문에 우선 모재 부분을 파괴역학적으로 규명할 필요가 있다. 파괴안전성평가로 피로균열진전평가와 함께 탄소성 파괴인성평가가 필수적이라 할 수 있다. 인성이 큰 재료의 파괴인성은 재료가 가지는 내부에너지, 시험편 치수 및 시험편의 장착상태 와 밀접한 관계를 가지고 있으며 균열길이 측정에도 초기균열부분에서는 균열길이 감소

현상이 발생하는 경우가 있다. 파단시험편을 관찰하여 보면 재료내부의 미소결함이나 보이드(void)에서 연성파괴의 전형적인 모델을 관찰할 수 있으며 안정균열과 불안정균열의 경계에서는 응력상태에 지배받는 터널링 현상이 야기된다. 따라서 평면변형률상태를 고려한 균열의 존재를 변수로 명확한 분석이 될 때 충분한 설계수명을 예측할 수 있으며, 시험편 내부 응력상태가 평면변형률상태를 만족하는 물성치 평가가 이루어져야 한다.

본 연구는 SG-365강을 사용하여 측면홈을 0%, 20%, 30%, 40%로 가공하였으며, ASTM E813-89, ASTM E1152<sup>1,2)</sup> 단일시험편법을 적용하여 J-R곡선의 구배에 따른 측면홈의 영향과 안정균열 발생점에 대한 탄소성 파괴인성치를 구하고 신뢰성 및 건전성 확보의 일환으로 실험을 수행하였다. 이러한 연구를 기초로 하여 실제 가스 배관재의 구조설계 및 설비유지보수에 필요한 유용한 설계 자료로 사용하고자 한다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 가스배관 및 압력용기에 사용되는 SG-365강으로 Table1에 화학적 조성

접수일 : 2007년 1월 15일, 채택확정 : 2007년 2월 27일

손종동(책임저자) : 동명대학교 기계공학과

E-mail : dish5@tu.ac.kr Tel. 051-620-3370

임만배 : 경상대학교 정밀기계공학과

을 나타내었으며, 이 강은 층상의 페라이트-퍼얼라이트 조직으로 이루어져 있다.

Table 1 Chemical compositions of SG 365(wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.14	0.43	1.32	0.001	0.001

2.2 인장시험편 및 파괴인성시험편

ASTM E8<sup>4)</sup>에 따라 인장시험을 수행하였으며, 인장시험에서 얻은 본 재료의 항복강도, 인장강도 및 연신을 등 실험결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of material

Material	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)	Young ' s modulus (GPa)	Poisson ' s ratio
SG 365	386	560	36	196	0.3

J-R 파괴저항 시험편은 강판의 두께 27mm에서 채취하여 두께 25.4mm로 가공한 ASTM E399<sup>3)</sup> 표준 1T-CT 시험편이다. 피로예비균열 생성 후 시험편 양 측면에 각각 시험편 두께의 0%, 20%, 30%, 40%의 측면홈을 가공하였으며, Fig.1과 2는 인장시험편과 CT 시험편의 형상과 치수를 나타내고 있다. Fig. 1의 인장시험편은 ASTM E8<sup>4)</sup> 규정에 따라 가공하였다. 또한 파괴인성시험을 위한 ICT 시험편의 측면홈은 피로균열의 생성과 소성구속에 따른 평면 변형률 조건을 고찰하고 균열길이의 측정을 위한 COD게이지 부착을 용이하도록 노치부와 선단을 방전가공 하여 제작하였다. 피로균열진전 시험편은 강판에서 채취하여 두께 12.5mm로 가공한 ASTM E647<sup>5)</sup> 표준 시험편이며 채취방향은 균열진전을 고려하여 L-T방향으로 하였다.

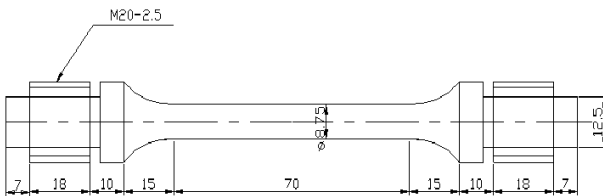


Fig. 1 Geometry and configuration of tensile specimen

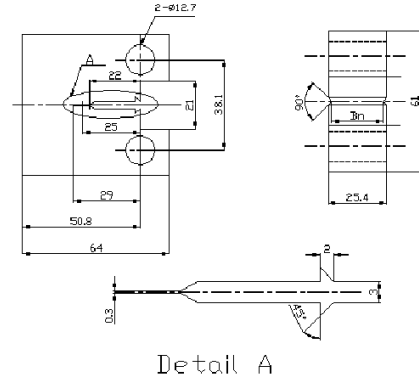


Fig. 2 Geometry and configuration of compact tension specimen

2.3 J-R 파괴저항시험 및 피로균열진전시험

본 재료에 대한 J-R파괴저항시험은 ASTM E813-89 및 E-1152<sup>1,2)</sup> 표준시험 절차에 따라 단일 시험편 해중법을 (single specimen unloading compliance method) 이용하여 상온에서 수행하였다. 시험편의 무차원 균열길이(a/W)가 0.6이 되도록 피로예비균열을 삽입하여 균열선단을 동일하게 유지하였으며, 균열길이 및 파괴인성치는 균열의 직선성과 평면변형률조건의 응력상태에 지배되기 때문에 측면홈을 가공하여 실험을 실시하였다. 시험후 예비균열 생성은 시험하중의 60%로 부하하여 파단 후 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 파단면을 조사하고 응력의 분포 상태를 분석하여 균열길이의 재현성을 평가하였다.

파괴인성시험에 사용된 시험기로는 98kN 용량의 MTS 810 시스템을 사용하였으며, 균열길이 측정은 MTS 632-03F-30의 COD게이지(게이지 길이 12mm)를 이용하였다. 또한 하중부하 조건은 0.1mm/mim로 유지하여 실험을 수행하여 하중과 하중선 변위 선도를 나타내었다. 피로균열진전시험은 일정진폭 하중제어방식으로 반복인장하중을 가하였다. 시험조건은 주파수 10Hz, 정현파, 응력비는 0.1 및 0.5로 실온에서 실험하였으며 하중폭 Δp는 5673N 으로 실험하였다. 균열길이 측정은 시험편에 Extensometer를 장착한 후 컴플라이언스법으로 산출하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 피로균열진전거동

Fig. 3은 상온에서 응력비(R) 0.1과 0.5를 채택하여 ΔP일정 피로시험을 수행하여 피로균열진전속도

da/dN과 응력확대계수범위  $\Delta K$  를 파라미터로 정리한 결과이다. 일반적으로  $\Delta P$  일정 피로시험은  $\Delta K$  로 잘 정리될 수 있지만 본 연구에서는 하중이력영향과 균열이 성장함에 따라 반복하중으로 인하여 소성에 의한 닫힘과 피로균열이 순수한 모드 I 상태에서 균열이 진행되지만 미시구조적 불균질성으로 인한 혼합모드 상태를 유발하여 잔류응력이 양의 부하응력에도 균열면을 닫히게 하였고 균열면은 프래팅이 발생되어 균열폐구 현상을 유발하였다.<sup>6)</sup> 이러한 현상은 응력확대계수의 증가에 따라 감소하였으며 저  $\Delta K$  영역에서 응력비에 의존되는 경향으로 나타났다.  $\Delta K$ 의 증가와 함께 da/dN은 직선적으로 증가하고 있으며 고  $\Delta K$ 영역에서는 응력비에 의존되지 않음을 알 수 있다. 또한 응력비가 높은 0.5가 0.1보다 균열진전속도가 빠르게 진전됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 응력비가 높을수록 최대하중의 증가로 인하여 균열진전속도가 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 따라서 부하과정에 발생하는 인장소성역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타났다. 응력비가 낮게 되면 부하를 반복하면 발생하는 프래팅에 의한 균열닫힘이 야기되어 구동력을 약화시키기 때문에 피로균열진전속도를 감소시키고 균열선단에 발생하는 소성역내의 잔류응력이 작용하여 압축하중이 피로균열진전의 구속력으로 작용하여 진전속도에 영향을 준 것으로 생각된다.

### 3.2 평활 시험편에 대한 파괴저항특성

Fig. 4는 평활시험편에 의한 탄소성 파괴인성 거동을 나타내었으며 균열길이 감소현상은 윤셋 방법에 따라 부 균열 만큼 윤셋하여 R곡선을 구하였다. 둔화직선식은 ASTM E813-97에 의한  $J=2\sigma_Y \Delta a$  를 대입하여 구하면  $J=772 \Delta a$  kN/m 이고  $J_{max}=1175.87$ kN/m 였다. ASTM 규정에 따른 유효점으로 R곡선을 구하고 주어진 R곡선과 0.15mm 배제선과 교점에서  $\Delta a_{min}=1.196$ mm이고 1.5mm 배제선과 교점에서 구한  $\Delta a_{max}=3.02$  mm로 나타났다. 또한 R 곡선과 0.2mm 윤셋선과 교점에서 구한  $J_Q$ 는  $J_Q=848$ kN/m 로서  $J_{IC}$ 의 유효판정 조건을 만족하지 못하였으며  $J_{IC}$ 로 평가 될 수 없었다. 이러한 원인은 평활시험편의 경우 시험편 표면의 응력상태가 평면응력이 지배적인 상태로 되기 때문에 균열의 진전 구동력을 구속하여 표면균열크기와 내부균열크기가 상대적으로 많은 차이를 유발함으로써 변형된 만곡

현상(opposite crack tunneling effect)이 명확하게 나타나지고 인장부하에 의한 표면에는 균열이 거의 일어나지 않고 중앙부에 집중되는 현상이 원인으로 생각된다. 이러한 변형된 균열의 만곡형태가 고인성 고연성재의 평활 시험편에서 나타나는 현상이며 이러한 균열이 진전된 전 파면에 대하여 균열진전량을 단순 평균하면 시험편 양 표면에 나타난 응력 상태 때문에 탄소성과파괴인성치가 과대평가 될 수도 있고 평가 시 구속조건에 부합하지 못하여 평가에 어려움을 가져온다고 생각된다. 따라서 본 소재의 물리적 특성을 고려하여 볼 때 측면홈 가공에 의한 평가가 필요할 것으로 사료 된다.

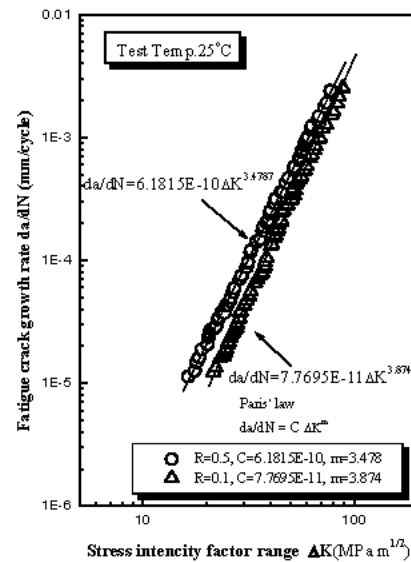


Fig. 3 Relation between stress intensity factor range and fatigue crack growth rate at 25°C

### 3.3 파괴저항에 미치는 측면홈 영향

Fig. 5는 측면홈이 20% 삽입된 시험편의 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것이며 평활시험편 보다 응력상태의 구속조건은 완화되었지만 표면균열이 중앙부 균열과 차이가 있었다. 균열길이 감소현상은 평활시험편 보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며 윤셋 방법에 따라 R곡선을 구하였다. R곡선으로부터 구한  $J_{max}=1116.45$ kN/m, 윤셋선과 교점에서  $\Delta a_{min}=1.14$ mm,  $\Delta a_{max}=2.94$ mm로 나타났다. R곡선과 0.2mm 윤셋선과 교점에서 구한  $J_Q$ 는  $J_Q=793.52$ kN/m 로서 균열길이는 평활시험편보다 약간 증가하였으며 터널링현상과 Shear lip 현상이 공존되어 일어났다. 이러한 현상은 균열길이가 시험편 표면부 보다 중앙에 집중되는 양상을 초래할 뿐만 아니라 균열

길이 산출시 과소평가 될 우려가 있다.<sup>7,8)</sup> 측면홈이 20%인 경우 탄소성파괴인성의 정량적인 평가인  $J_{IC}$  는 유효판정 조건을 만족하였지만 약간 과대평가 되는 경향이 나타났다.

Fig. 6은 측면홈이 30% 삽입된 시험편의 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것이며 20% 보다 응력상태의 조건은 평면변형률이 지배되는 상태지만 표면균열이 중앙부 균열과 차이는 조금 있었다. 표면부와 중앙부의 응력상태 및 하중제하의 반복에 의한 크래비스와 시험편 편환의 정열상태로 인한 균열길이 감소현상도 20% 보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였다. R곡선에 의한  $J_{max}=1019.80\text{kN/m}$ ,  $\Delta a_{min}=1.03\text{mm}$ ,  $\Delta a_{max}=2.82\text{mm}$ 로 나타났다. R곡선과 0.2mm 윗선과 교점에서 구한  $J_Q$ 는  $J_Q=722.09\text{kN/m}$  로서  $J_{IC}$ 의 유효판정 조건을 만족하였지만 약간 과대평가 되는 경향이 나타났다.

Fig. 7은 측면홈이 40% 삽입된 시험편의 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것이며, 20%, 30% 보다 표면균열과 중앙부 균열과 차이는 거의 없는 상태로 나타났다. 균열길이 감소현상은 20%, 30% 보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며, 균열길이 감소현상은 시험편 응력상태에 따라 변화될 뿐만 아니라 크래비스와 편환의 고정 문제등 여러 원인에 의한 현상으로 생각되며 정확하고 신뢰성을 갖는 파괴저항특성을 필요로 하는 구조물의 경우 응력상태와 시험방법에 충분한 해석을 동반하여 선택할 필요가 있다.<sup>9,10)</sup> 본 연구에서 실험의 최적조건은 측면홈 깊이 40% 일 때 유효성을 입증할 수 있었으며, 본 연구에 사용된 소재 경우 실험적인 고찰을 기준으로 비교하여 볼 때 탄소성파괴인성평가의 최적의 조건으로 생각된다. 파괴인성시험을 실시한 결과 측면홈 가공이 40%의 시험편의 경우  $J_{max}=835.53\text{kN/m}$ ,  $\Delta a_{p\ min}=0.78\text{mm}$ ,  $\Delta a_{p\ max}=2.57\text{mm}$ 이며 윗선과 교점에서 구한  $J_Q=527.01\text{kN/m}$ 로 나타났으며,  $J_{IC}$ 의 유효판정 조건에 만족하여  $J_{IC}$ 로 평가 될 수 있었다. 따라서 고연성과 고인성을 동반하는 구조물의 파괴저항 평가는 응력상태를 고려한 측면홈 가공이 필요하며 균열길이 감소현상 뿐만 아니라 표면 균열진전 구속력을 완화시킬 필요가 있다고 생각한다. 측면 홈이 소성구속의 영향을 받아 파괴저항곡선의 특성치를 변화시킬 수 있으며, 측면홈의 깊이가 변화됨에 따라 R곡선의 기울기에 영향을 주고 있고 깊이가 증가 할수록 기울기가 감소함을 보여주고 있다는 사실에서 탄소성파괴인성

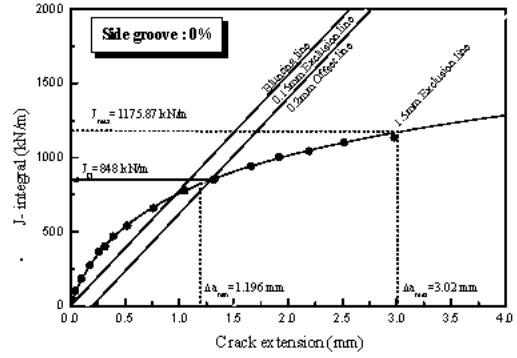


Fig. 4 Relations between J-integral and crack extension by 0% side groove specimen

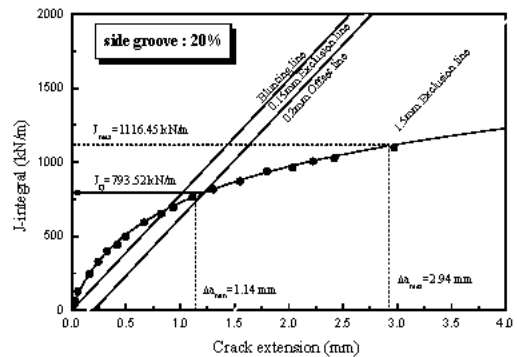


Fig. 5 Relations between J-integral and crack extension by 20% side groove specimen

평가에 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 이것은 측면홈 깊이가 증가됨에 따라 표면근방에서 소성구속 완화에 의한 균열길이의 감소현상을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 단일시험편법이 가지고 있는 균열길이 검증문제를 해결할 수 있다. 따라서 정확한 균열길이 산출을 위하여 평면변형률조건외의 파괴인성 평가는 필수적임을 알 수 있다.

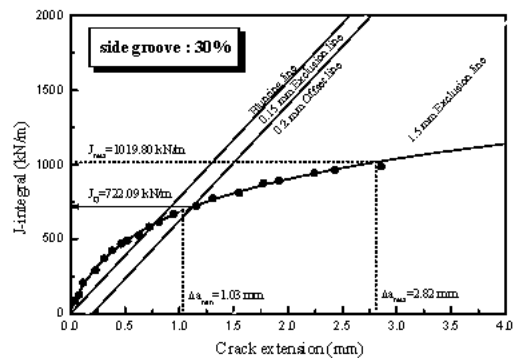


Fig. 6 Relations between J-integral and crack extension by 30% side groove specimen

Fig. 8은 R곡선에서 유효영역에 있는 데이터를 이용하여 선형 근사하여 나타낸 것이다. 측면 홈 깊이가 0%, 20%, 30%, 40%의 경우 선형 근사식  $J=170.29\Delta a+656.40$ ,  $J=168.67\Delta a+613.95$ ,  $J=188.44\Delta a+520.78$ ,  $J=191.14\Delta a+375.42$ 로 나타났다.

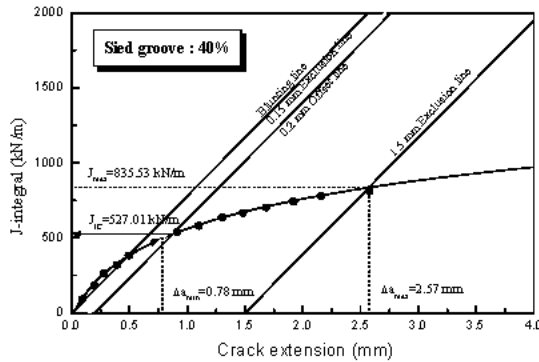


Fig. 7 Relations between J-integral and crack extension by 40% side groove specimen

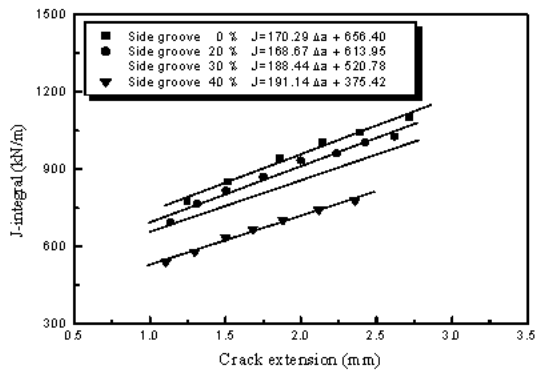


Fig. 8 Comparison with linear curve fitting for R-curve by unloading compliance method

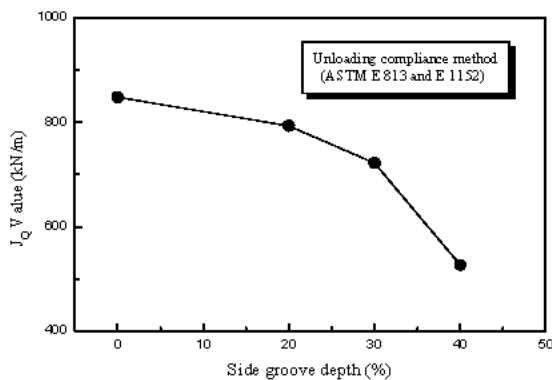


Fig. 9 Relation between JQ value and side groove depth by ASTM E813 and E1152 unloading compliance method

Fig. 9는 측면 홈의 깊이에 따른 JQ값의 거동을 나타내고 있다. 이러한 정량적인 분석을 통하여 측면홈의 깊이가 깊어짐에 따라 JQ값이 감소되고 있음을 알 수 있고 특히 측면홈의 깊이가 40%에서 감소의 경향이 현저하게 나타났다. 이러한 경향은 응력상태가 평면변형을 파괴현상에 지배되기 때문에 균열의 저항성이 다르게 나타나 정량적인 분석에서 차이가 난 것으로 생각된다. 즉 측면 홈의 깊이는 균열길이와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

### 3.4 측면홈 깊이에 의한 Shear lip 영향

Fig. 10은 측면홈 깊이를 나타낸 거시적인 파단면이다. 측면홈 깊이가 0%~30%에서는 시험편 표면부에서 중앙부로 shear lip의 양이 시험편폭의 약 15%~5%정도로 관찰되었고 shear lip이 거의 발생되지 않는 40%인 경우와 비교하여 볼 때 표면의 소성구속효과로 인한 균열길이의 차이가 파괴저항을 증가시키는 원인으로 생각된다.<sup>11,12)</sup> 그러나 40%는 표면근방에서 소성구속 완화와 더불어 시험편 외부와 중앙 방향으로 균열길이와 균열진전 구동력이 일정한 평면변형률조건에 따른 파괴저항거동을 보였다.

### 3.5 파단면 해석

Fig. 11은 본 소재의 파단면을 통하여 파괴과정을 고찰하고 파괴현상에 따른 응력상태와 균열길이에 미치는 변형된 터널링 현상을 비교 고찰을 위한 것이다. Fig. 11(a)는 측면홈 0%인 파단면 형태를 나타내고 있으며 시험편 표면부가 완전한 평면변형률 조건을 만족하지 못하고 평면응력 상태를 유지하고 있으며 터널링 현상이 현저히 나타남을 알 수 있다. 이것은 평면변형률 상태가 3축 응력 상태에서 소성구속을 유발한 것으로 사료되며 균열길이의 산출과정에서 정확한 정량적인 분석과 탄소성파괴인성치에 영향을 가져왔다.

Fig. 11(b), (c), (d)는 20%, 30%, 40% 측면 홈을 가진 파단면이며 사진에서 알 수 있듯이 0%에 비하여 표면부의 균열진전 상태가 많이 진전되어 육안으로 충분히 관찰할 수 있음을 알 수 있으며, 30%가 20%에 비하여 평면변형률 상태로 표면부의 소성구속 상태가 완화된 것을 확인할 수 있다. 측면홈 깊이가 시험편 두께의 40%인 경우 표면부와 중앙부에서 비슷한 균열진전의 양상을 관찰 할 수 있으며, Shear lip과 터널링 현상은 거의 일어나지 않았다.

따라서 소성구속에 의한 균열의 거동이 없이 평면 변형률 조건을 만족하는 균열형태를 파면관찰을 통해 알 수 있었다.

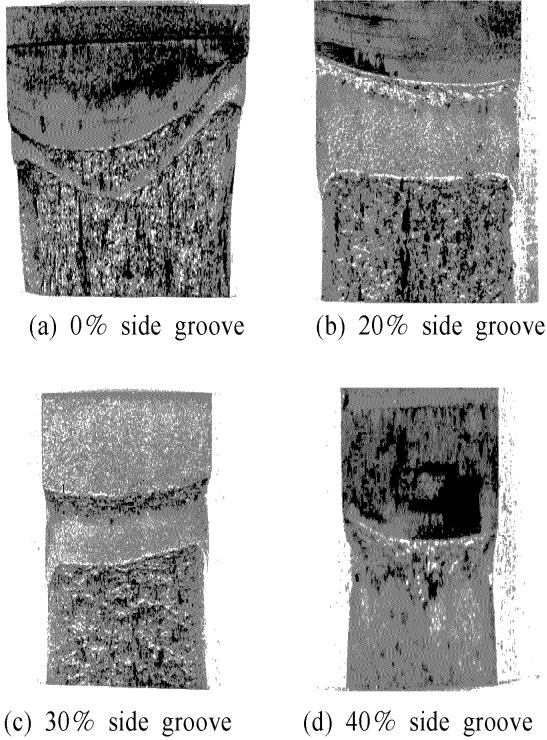


Fig. 10 Photomicrograph of fracture surface and various side groove depth

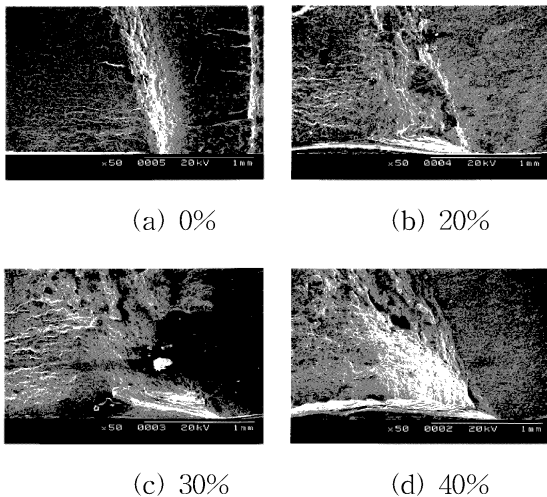


Fig. 11 SEM fractograph showing fracture surface of side groove depth

Fig. 12는 측면홈 40%의 파단면을 미시적으로 관찰한 전자현미경사진을 나타내고 있다.

Fig. 12(a)는 평탄한 면을 갖는 스트레치 존 영역을 보여주고 있으며 연성파괴의 특징인 미끄럼면

분리에 의한 사행 미끄럼(serpentine glide)과 같은 물결형의 줄무늬 모양과 이것을 잘게 한 립플(ripple)과 같은 잔물결의 모양이 관찰되었다. 파단면은 평탄한 파면의 양상을 가지고 있으며 소성미끄럼이 하나의 면이 아니고 서로 교차하는 두 개 이상의 미끄럼면에서 일어나기 때문에 줄무늬 모양의 사행미끄럼이 나타난 것으로 생각된다. 따라서 소성 변형이 커지면 이 무늬가 퍼져서 립플이 되고 결국에는 무늬가 없는 면이 되어 스트레치영역으로 됨을 알 수 있다.

Fig. 12(b)는 재료의 소성변형에 의해 재료내의 석출물, 개재물의 미립자 등이 핵이되어 미소공동의 합체(microvoid coalescence)에 의한 신장형딴플과 등축딴플(dimple)이 혼합된 형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

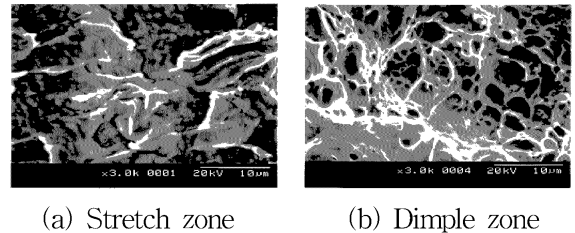


Fig. 12 SEM fractograph showing fracture surface

#### 4. 결 론

본 연구는 가스 배관재 SG-365강을 이용하여 시험편에 측면홈의 깊이 0%, 20%, 30%, 40%를 가공하여 응력상태 및 소성구속 정도를 비교, 고찰하여 탄소성파괴인성치를 정량적으로 평가 한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중부하 과정 시 인장소성역내에 발생하는 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 응력비가 높을수록 진전속도가 빠르게 나타났다.
- 2) 평활시험은 표면의 응력상태가 평면응력이 지배적인 상태가 되어 균열진전구동력을 구속하여 변형된 만곡현상이 나타났으며 파괴인성평가의 부대조건에 만족하지 못했다.
- 3) 본 소재의 경우 측면홈의 깊이를 40%로 하였을 때 평면변형률이 지배적인 상태이며, 파괴인성평가에 유효한 부대조건을 만족하는 최적조건으로 추천하고자 한다.
- 4) 측면홈의 깊이가 증가됨에 따라 스트레치 영역의 크기와 딴플영역 크기가 증가 하였으며, 위의

영역에서 연성파괴의 특징인 미끄럼면 분리에 의한 사행미끄럼과 립플이 관찰되었다.

5) 평면응력이 지배적인 홈의 깊이가 0%의 경우 파단면에서 인장하중에 의한 소성변형이 표면부분에 소성구속으로 작용하고 shear lip의 영향을 받아서 균열의 진전이 거의 일어나지 않았다.

학회지 Vol. 14, No. 1, pp. 44-51.

12. 오세욱, 임만배, 김진선, 1995, "J적분을 이용한 원자로 압력용기강의 파괴인성치의 결정", 한국해양공학회지 Vol. 9, No. 1, pp. 111-119.

### 참고 문헌

1. ASTM E813, 1997, "Standard test method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness", pp. 646-660.
2. ASTM E1152, 1997, "Standard test method for Determining Fracture Resistance Curve", pp. 763-773.
3. ASTM E399, 1997, "Standard test method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", pp. 412-442.
4. ASTM E8, 1997, "Standard test method of Tension Testing of Metallic Materials", pp. 56-76.
5. ASTM Standard E647-97, 1997, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", pp. 1-6.
6. M.L.de Vries and B.Sohaap, 1985, "Experimental of Ductile Crack Growth in type 304 Stainless Steel", ASTM STP, 856, pp. 183-195.
7. M.Kikuchi, S.N.Atluri and H.Miyamoto, 1985, "Studies on Size Effects and Crack Growth of Side-Grooved CT Specimen", ASTM STP, 868, pp. 251-278.
8. M.O.Lai, 1986, "Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness", Engineering Fracture Vol. 45, pp. 183-188.
9. N.P.O' Dowd, 1992, "Family of Crack Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 40, No. 5, pp. 939-963.
10. 임만배, 차귀준, 1998, "SA 508-3재의 제하킵 플라이언스법과 하중비해석을 이용한 파괴저항 곡선평가", 한국해양공학회지 Vol. 12, No. 1, pp. 65-75.
11. 임만배, 차귀준, 2000, "압력용기강의 파괴 저항곡선과 파괴변형률에 관한 연구", 한국해양공