

SG365강의 파괴저항곡선과 측면홈효과에 관한 연구

임 만 배

동의대학교 산업기술개발 연구소
(2001. 6. 15. 접수 / 2001. 11. 2. 채택)

A Study on the Fracture Resistance Curve and Effect of Side Grooves of SG365 Material

Man-Bae Lim

Research Institute for Industrial Technology Development, Dongeui University
(Received June 15, 2001 / Accepted November 2, 2001)

Abstract : SG-365 steel is an important material and used for manufacturing a pressure vessel and 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} . Because 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 the scattering of them and crack tunneling effect and shear lip by the side groove.

Key Words : elastic plastic fracture toughness, side grooved, J-R curve, single specimen unloading compliance method, J-integral, crack length

1. 서 론

최근 가스배관의 사용증대로 인한 사고사례들이 빈번하고 사고예방 차원에서도 파괴역학적인 기법을 적용하여 가스설비의 효율적인 관리 및 유지보수가 필요하다. 이러한 역학적인 기법은 사용재료의 균열선단부에 대한 구속상태를 고려하여 실제 구조물에 존재하는 균열부위의 응력상태를 규명하고 안정균열 및 불안정균열의 평가를 할 수 있다. 또한 균열진전 구동력을 평가함으로써 설비 운전수명과 가동효율을 극대화하고 임계균열길이 평가를 기준으로 따른 파단전누설(LBB, Leak before break) 개념을 적용할 수 있다.

따라서 가스설비 등을 구성하는 장치재료는 사용하는 중에 발생하는 손상원인으로 기계적 원인 화학적 원인 사용중의 재료의 열화 및 이들 요인에 의한 복합적인 면을 생각할 수 있다. 특히 기계적 원

인으로 연성파괴, 취성파괴, 피로파괴 등이 있다. 이러한 파괴원인을 규명하여 설비재료의 잔존수명을 평가하고 분석하여 경제적 손실뿐만 아니라 인명재해방지에 대한 연구가 요구되고 있다. 이러한 파괴안전성평가방법으로 피로균열진전평가와 함께 탄소성 파괴인성평가가 필수적이라 할 수 있다. 인성이 큰 재료의 파괴인성은 재료가 가지는 내부에너지, 시험편의 치수 및 시험편의 장착상태와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 또한 균열길이 측정에도 초기 균열부분에서는 균열길이 감소현상이 발생하는 경우가 있다. 이와 같이 파괴인성의 균열길이 평가는 안정균열과 불안정균열의 경계에서는 평면응력상태에 지배받는 균열터널링(crack tunneling) 현상이 야기된다. 이는 파괴인성값을 과대평가 할 수 있으며 신뢰성에 문제를 가져올 수 있다. 따라서 평면변형률상태에 지배되는 균열의 존재를 변수로 한 분석이 될 때 충분한 설계수명을 예측할 있다.

본 연구는 SG-365강을 사용하여 측면홈 깊이를 0%, 20%, 30%, 40%를 가공하였으며, ASTM E813-89¹⁾,

mblimm@hanmail.net

ASTM E1152²⁾ 단일시험편법을 적용하여 J-R곡선의 구배에 따른 측면효의 영향과 안정균열 발생점에 대한 탄소성 파괴인성치를 구하고 찢어짐계수(tearing modulus)를 평가하여 신뢰성 및 건전성 확보의 일환으로 실험을 수행하였다. 이러한 연구를 기초로 하여 실제 가스 배관재의 구조설계 및 설비유지보수에 필요한 유용한 설계자료로 사용하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 가스배관 및 압력용기에 사용되는 JIS규격 SG-365강으로 Table1에 화학적 조성을 나타내었으며, 이 강은 층상의 페라이트-퍼얼라이트 조직으로 이루어져 있다.

J-R 파괴저항 시험편은 강관의 두께 27mm에서 채취하여 ASTM E399³⁾ 표준 IT-CT 시험편이다. 피로균열 생성 후 시험편 양 측면에 각각 시험편 두께의 0%, 20%, 30%, 40%의 측면효를 가공하였으며, Fig. 1, 2는 인장시험편과 CT 시험편의 형상과 치수를 나타내고 있다. CT 시험편의 측면효는 피로균열의 생성 및 COD계이지 부착을 용이하도록 노치부와 선단을 방전가공 하였으며 시험편 채취방향은 압연방향(L) - 폭 방향(T)로 하였다.

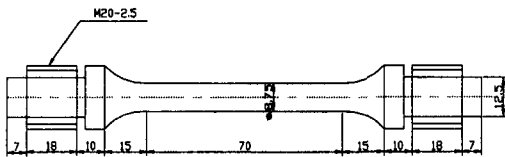


Fig. 1. Geometry and configuration of tensile specimen

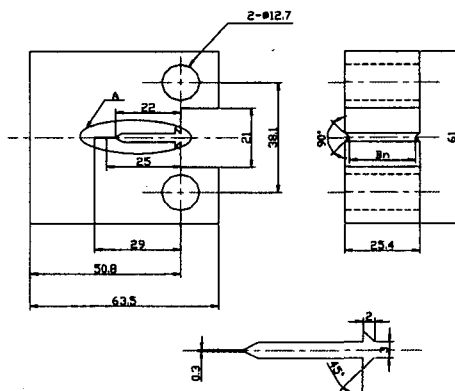


Fig. 2. Geometry and configuration of compact tension specimen

Table 1. Chemical composition of SG 365(wt%)

Symbols for element	C	Si	Mn	P	S
weight %	0.14	0.43	1.32	0.001	0.001

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

2.2. 인장시험

ASTM E8⁴⁾에 따라 인장시험을 수행하였으며, 인장시험에서 얻은 항복강도, 인장강도 및 연신율 등을 정리하여 Table 2에 나타내었다.

2.3. J-R 파괴저항시험

본 재료에 대한 J-R파괴저항시험은 ASTM E813-89¹⁾ 및 E-1152²⁾ 표준시험 절차에 따라 단일시험편 해중법(single specimen unloading compliance method)으로 상온에서 수행하였다. 시험편의 무차원 균열길이(a/W)가 0.6이 되도록 피로예비균열을 삽입하여 균열선단을 동일하게 유지하였으며, 여기서 W는 시험편 폭이며 50.8mm이다. 균열길이 및 파괴인성치는 균열의 직선성과 평면변형률조건의 응력상태에 지배되기 때문에 측면효를 가공하여 실험을 실시하였다. 시험 후 예 균열 생성은 시험하중의 60%로 부하하여 파단 후 주사식 전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 파단면을 조사하고 응력의 분포상태를 분석하여 균열길이의 재현성을 평가하였다.

파괴인성시험에 사용된 시험기로는 98kN 용량의 MTS 810 시스템을 사용하였으며, 균열길이 측정은

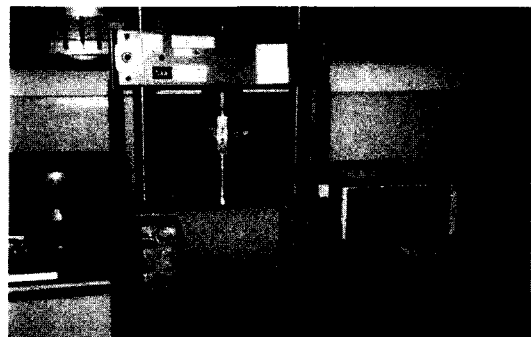


Fig. 3. Apparatus of room temperature in fatigue testing machine

MTS 632-03F-30의 COD게이지(게이지 길이 12mm)를 이용하였다. 또한 하중부하 조건은 0.1mm/mim로 유지하여 실험을 수행하여 하중과 하중선-변위 선도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 평활 시험편에 대한 파괴저항특성

Fig. 4는 평활 시험편에 의한 탄소성 파괴인성 거동을 나타내었으며 균열길이 감소현상은 윤셋 방법에 따라 부 균열만큼 윤셋하여 R곡선을 구하였다.^{5,6)} ASTM E813-97에 의한 둔화직선식은 $J=2\sigma_Y \Delta a$ 를 대입하여 구하면 $J=772 \Delta a$ (kN/m)이고 $J_{max}=1175.87$ kN/m였다. ASTM 규정에 따른 유효점으로 R곡선을 구하고 주어진 R곡선과 0.15mm 윤셋선과 교점에서 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=1.196$ mm이고, 0.15mm 윤셋선과 교점에서 구한 $\Delta a_{max}=3.02$ mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윤셋선과 교점에서 구한 J_Q 는 $J_Q=848$ kN/m로서 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하지 못하였으며 J_{IC} 로 평가될 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 만곡현상(opposite crack tunneling effect)이 뚜렷하게 나타나지고 인장부하에 의한 표면에는 균열길이가 거의 일어나지 않고 중앙부에 집중되는 현상이 원인으로 생각된다.^{7,8)} 이러한 변형된 균열의 만곡형태는 고인성, 연성재의 평활 시험편에서 많이 나타나는 현상이며 이러한 균열이 진전된 전

파면에 대하여 균열진전량을 단순 평균하면 시험편 양 표면에 나타난 응력상태 때문에 균열길이가 과소평가되어 탄소성 파괴인성치가 과대평가될수도 있고 평가시 구속조건에 부합하지 못하여 평가에 어려움을 가져온다고 생각된다. 따라서 본 소재의 물리적 특성을 고려하여 볼 때 측면홈 가공에 의한 평가가 필요할 것으로 사료된다.

3.2. 파괴저항에 미치는 측면홈 영향

Fig. 5는 측면홈이 20% 삽입된 시험편의 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것이며 파단면 상에서 평활시험편 보다 응력상태의 구속조건은 완화되었지만 표면균열이 중앙부 균열과 차이가 있었다. 균열길이 감소현상은 평활시험편보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며 R곡선을 윤셋 방법에 따라 구하였다. 둔화직선식은 $J=2\sigma_Y \Delta a$ (kN/m)이고, $J_{max}=1116.45$ kN/m였다. 유효점으로 R곡선을 구하고 R곡선과 0.15mm 윤셋선과 교점에서 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=1.14$ mm이고 0.15mm 윤셋선과 교점에서 구한 Δa_{max} 는 2.94mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윤셋선과 교점에서 구한 J_Q 는 $J_Q=793.52$ kN/m로서 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하였지만 약간 과대평가 되는 경향이 나타났다. 따라서 파괴인성치의 과대평가를 완화시키고 응력상태를 만족시키기 위하여 측면홈을 30%로 깊게 가공하여 균열진전이 직선성 유지하고, 균열진전에 대한 구속효과와 응력상태를 평면변형률상태로 유지하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6은 측면홈이 30% 삽입된 시험편의 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것이며 20%보다 응력상태의 조건은 평면변형률이 지배되는 상태지만 표면균열

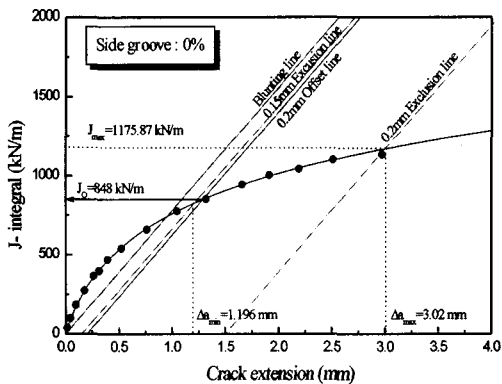


Fig. 4. Relations between J-integral and crack extension by 0 % side groove specimen

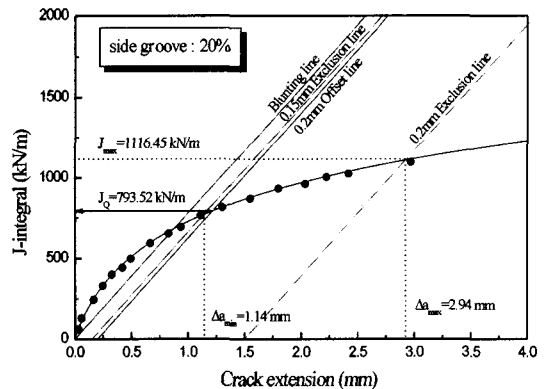


Fig. 5. Relations between J-integral and crack extension by 20 % side groove specimen

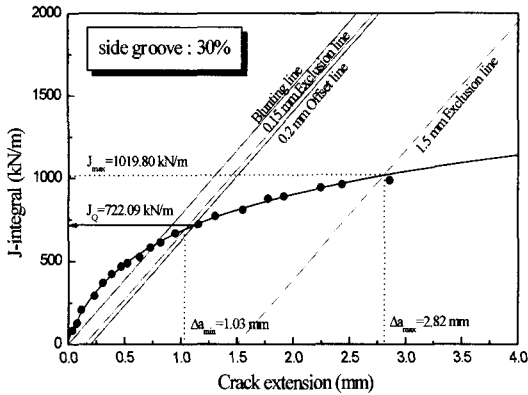


Fig. 6. Relations between J-integral and crack extension by 30 % side groove specimen

이 중앙부 균열과 차이는 조금 있었다. 균열길이 감소현상 또한 20%보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며 윗셋 방법에 따라 R곡선을 구하였다. 둔화직선식은 $J=2\sigma_Y \Delta a$ kN/m이고, $J_{max}=1019.80$ kN/m였다.

R곡선과 0.15mm 윗셋선과 교점에서 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=1.03$ mm이고, 0.15mm 윗셋선과 교점에서 구한 Δa_{max} 는 2.82mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윗셋선과 교점에서 구한 J_Q 는 $J_Q=722.09$ kN/m로서 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하였지만 약간 과대평가 되는 경향이 나타났다.

Fig. 7은 측면홈이 40% 삽입된 시험편의 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것이며 20%, 30%보다 응력상태의 조건은 평면변형률이 지배되는 상태로 표면 균열과 중앙부 균열과 차이는 거의 없는 상태로 나타났다. 균열길이 감소현상은 20%, 30%보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며, 균열길이 감소현상은 시험편의 응력상태뿐만 아니라 크래비스와 핀의 고정 문제 등 여러 원인에 의한 현상으로 생각되며 정확하고 신뢰성을 갖는 파괴저항 특성을 필요로 하는 구조물의 경우 응력상태와 시험방법에 충분한 해석을 동반하여 선택할 필요가 있다. 본 연구에서 파괴저항특성을 고려하여 볼 때 실험의 최적조건은 측면홈 깊이를 40%할 때가 최적의 조건으로 생각된다. 40%의 시험편의 경우 둔화직선식은 $J=2\sigma_Y \Delta a$ kN/m이고, $J_{max}=835.53$ kN/m였다. 유효점으로 R곡선을 구하고 R곡선과 0.15mm 윗셋선과 교점에서 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=0.78$ mm이고, 0.15mm 윗셋선과 교점에서 구한 Δa_{max} 는 2.57mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윗셋선과 교점에서 구한 J_Q 는 $J_Q=527.01$ kN/m로서 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하였으

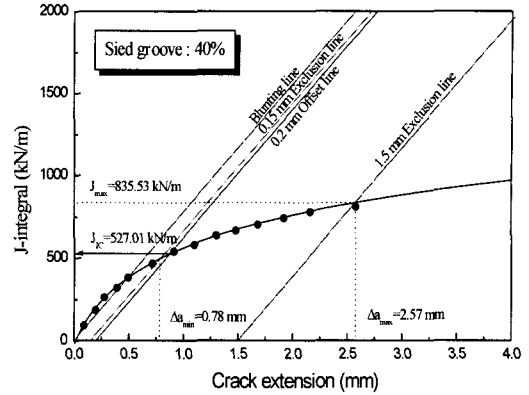


Fig. 7. Relations between J-integral and crack extension by 40% side groove specimen

며 신뢰성을 갖는 평가를 할 수 있었으며 $J_Q=J_{IC}$ 로 평가될 수 있었다. 따라서 본 연구에서 알 수 있듯이 고 연성과 고 인성을 동반하는 구조물의 파괴저항특성평가시 응력상태를 고려한 측면홈 가공이 필요하다.

Fig. 8은 측면홈의 영향을 고찰하기 위하여 파괴저항곡선을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 측면홈의 깊이가 균열길이와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며 측면홈의 깊이가 증가할수록 R곡선의 경사가 완만해지고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 표면근방에서 소성구속 완화와 더불어 평면변형률 조건에 따른 파괴거동으로 생각된다.

Fig. 9는 R곡선에서 유효영역에 있는 데이터를 이용하여 선형 근사하여 나타낸 것이다. 측면 홈 깊이가 0%, 20%, 30%, 40%의 경우 선형 근사식은 $J=$

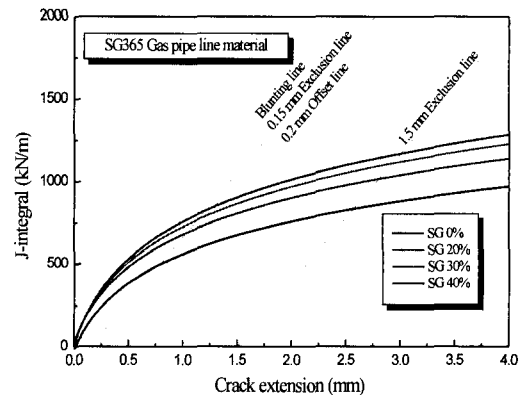


Fig. 8. Relations between J-integral and crack extension on the unloading compliance method by side groove 0%, 20%, 30%, 40%

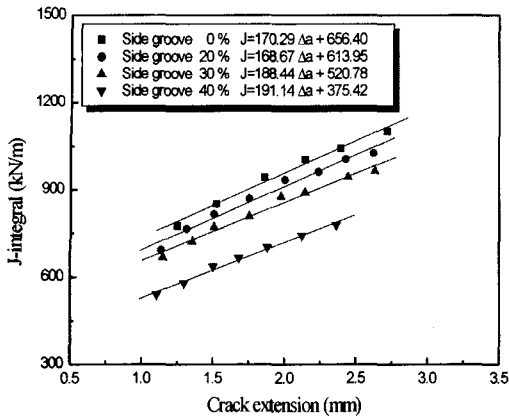


Fig. 9. Comparison with linear curve fitting for R-curve by unloading compliance method

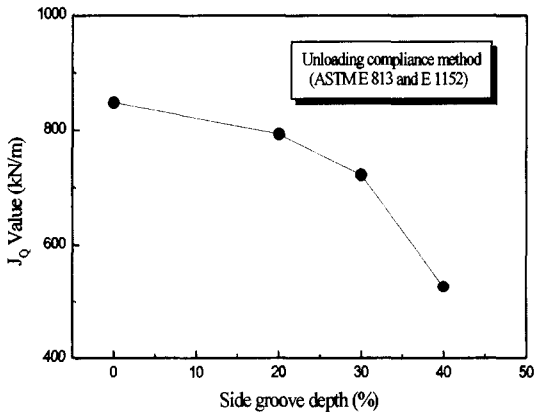


Fig. 10. Relation between J_Q value and side groove depth by ASTM E813 and E1152 unloading compliance method

170.29 Δa +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. 이러한 근사식은 유효영역내에서 파괴저항 에너지에 해당되는 J적분값을 이용하여 균열길이를 추정할 수 있다.

Fig. 10은 측면 홈의 깊이에 따른 J_Q 값의 거동을 나타내고 있다. 이러한 정량적인 분석을 통하여 측면 홈의 깊이가 깊어짐에 따라 J_Q 값이 감소되고 있음을 알 수 있고, 특히 측면 홈의 깊이가 40%에서 감소의 경향이 현저하게 나타났다. 이러한 경향은 응력 상태가 평면변형을 파괴현상에 지배되기 때문에 균열의 저항성이 다르게 나타나 정량적인 분석에서 차이가 난 것으로 생각된다. 따라서 고인성을 가진 소재의 탄소성파괴 인성평가지 측면 홈의 삽입이 필수적이며 본 소재의 경우 측면 홈의 깊이를 40%로 하여 파괴저항특성을 평가하는 것이 신뢰성을 가졌다.

3.3. 찢어짐계수에 미치는 측면 홈 영향

Fig. 11은 유효범위 내에서 J-R곡선의 경사부에 해당하는 dJ/da 의 미분 값을 이용하여 측면 홈에 따른 저항곡선의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 측면 홈의 깊이가 증가할수록 파괴저항성이 감소함을 볼 수 있다. 이러한 원인은 파괴현상에 따른 평면응력상태와 균열길이에 미치는 변형된 터널링 현상으로 생각된다. 측면 홈 0%인 파단면 형태를 보면 시험편 표면부가 완전한 평면변형을 조건을 만족하지 못하고 평면응력 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이것은 평면변형률 상태가 3축 응력 상태에서 소성구속을 유발한 것으로 사료되며 균열길이의 산출과정에서 정확한 정량적인 분석에 따라 파괴저항특성에 영향을 가져왔다.⁹⁻¹²⁾ 특히 0%의 측면 홈의 경우 균열진전량의 초기 단계인 0.5mm 이하에서는 dJ/da 값의 변화가 매우 높게 나타났는데 이러한 원인은 시험편 표면에서 shear lip에 의한 소성 구속으로 생각되며 균열진전량이 1mm 정도에서는 측면 홈의 깊이에 관계없이 일정한 값으로 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 평면응력상태의 지배하에서 평면변형률 상태로 천이하여 표면부의 소성 구속 상태가 완화됨으로써 측면 홈 깊이에 의존하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12는 J 값과 dJ/da 의 미분 값으로 나타내어 측면 홈의 변화에 따른 저항곡선의 변화거동을 나타내었다. Fig. 11에서 나타낸 것 보다 측면 홈의 영향을 평가하기 위한 매개변수로서는 부적당하고 J적분에 따른 미분값이 많은 분산도를 가지고 있으며 저항곡선의 기울기에 해당되는 미분값에 의존되지 못함을 알 수 있다. 그러나 측면 홈의 깊이에 따른 파괴

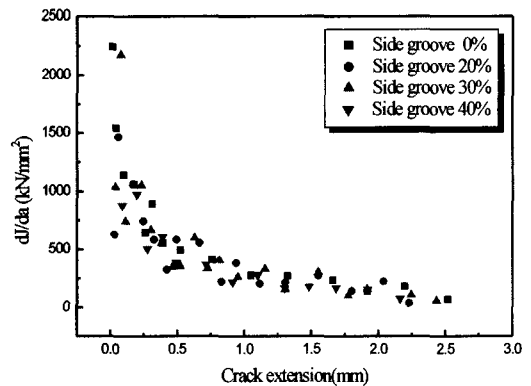


Fig. 11. The variation of dJ/da with crack extension for SG365 steel

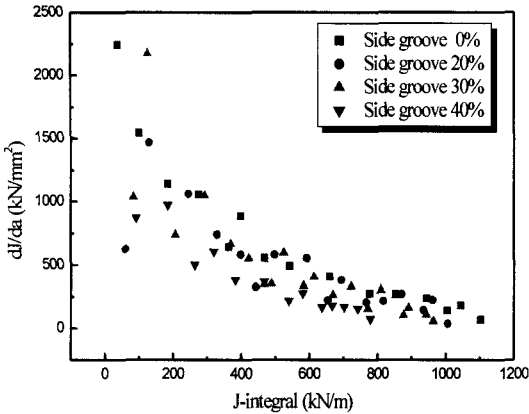


Fig. 12. The variation of dJ/da with J -integral for SG365 steel

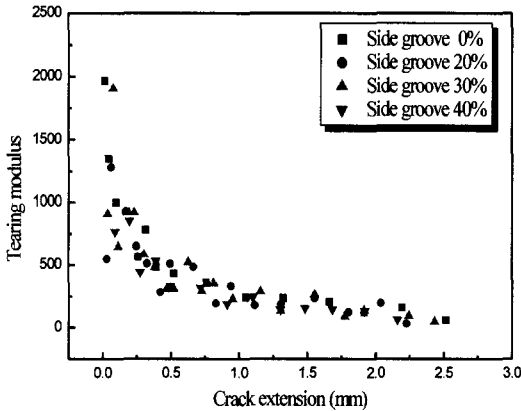


Fig. 13. The variation of tearing modulus with crack extension for SG 365 steel

저항거동은 0%, 20%, 30, 40%순으로 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 13은 파괴저항곡선의 미분값에 해당되는 dJ/da 를 Paris가 제안한 찢어짐계수값으로 변환하여 균열 길이와 관계를 나타내었으며 찢어짐계수를 측면홈 깊이에 따른 의존성을 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 파괴저항특성은 J -적분으로 평가한 것보다 균열길이에 의한 평가에 의존됨을 알 수 있다. 이러한 경향으로부터 안정균열성장과 불안정균열성장에 대한 평가는 찢어짐계수에 의한 평가로 가능함을 알 수 있으며 tearing modulus 값을 재료의 상수로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

3.4. 파단면 해석

Fig. 14는 본 소재의 파단면을 통하여 파괴과정을 고찰하고 파괴형상에 따른 응력상태와 균열길이에

미치는 변형된 터널링 현상을 비교고찰 하였다. Fig. 14(b), (c), (d)는 20%, 30%, 40% 측면 홈을 가진 파단 시험편이며 사진에서 알 수 있듯이 Fig. 14(a)의 0%에 비하여 표면부의 균열진전 상태가 많이 진전되어 육안으로 충분히 관찰할 수 있음을 알 수 있으며, 30%가 20%에 비하여 평면변형을 상태로 표면부의 소성구속 상태가 완화됨을 확인할 수 있다. 측면홈 깊이가 시험편 두께의 40%인 경우 표면부와 중앙부에서 비슷한 균열진전의 양상을 관찰할 수 있으며, 터널링 현상은 거의 일어나지 않았다. 따라서 소성구속에 의한 균열의 거동이 없이 평면변형을 조건을 만족하는 균열형태를 파면관찰을 통해 알 수 있었다.

Fig. 15는 측면홈 0%, 20%, 30%, 40%의 파단면을 미시적으로 관찰한 전자현미경사진을 나타내고 있다. 사진에서 알 수 있듯이 측면홈의 깊이에 따라 스트레치 영역의 크기와 딥플 영역 크기가 다름을 알 수 있으며 파면의 형상은 전형적인 고연성 및 고인성재가 가지는 파괴형태인 연성파단면을 가지고 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

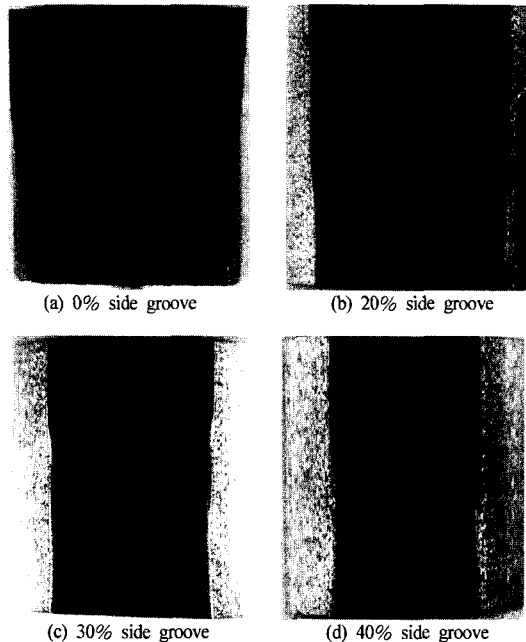


Fig. 14. Photomicrograph of fracture surface and various side groove depth

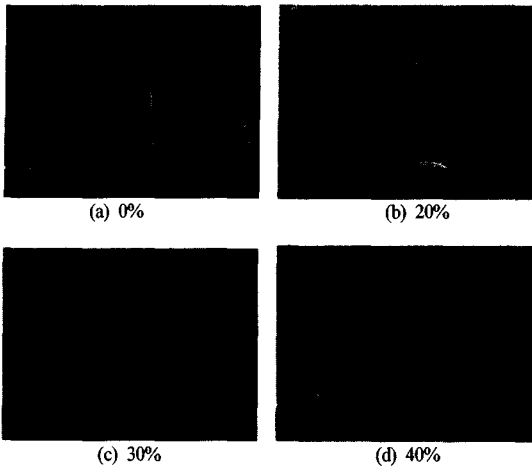


Fig. 15. SEM fractograph showing fracture surface of side groove depth

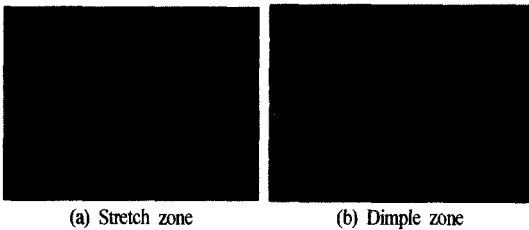


Fig. 16. SEM fractograph showing fracture surface

양상을 가지고 있으며 소성미끄럼이 하나의 면이 아니고 서로 교차하는 두 개 이상의 미끄럼면에서 일어나기 때문에 줄무늬 모양의 사행미끄럼이 나타난 것으로 생각된다. 따라서 소성변형이 커지면 이 무늬가 퍼져서 립플이 되고 결국에는 무늬가 없는 면이 되어 스트레치영역으로 됨을 알 수 있다.

Fig. 16은 본 연구에서 스트레치 영역과 딴플영역을 확대하여 나타낸 사진이다.

Fig. 16(a)는 평탄한 면을 갖는 스트레치 존 영역을 보여주고 있으며, Fig. 16(b)는 재료의 소성변형에 의해 재료내의 석출물, 개재물의 미립자 등이 핵이 되어 미소공공의 합체(microvoid coalescence)에 의한 신장형 딴플(dimple)형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 가스 배관재 SG-365강을 이용하여 시험편에 측면홈의 깊이 0%, 20%, 30%, 40%를 가공하여 응력상태 및 소성구속 정도를 비교, 고찰하여

파괴저항특성과 찢어짐계수를 정량적으로 평가한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 평활 시험편은 표면의 응력상태가 평면응력이 지배적인 상태가 되어 균열진전 구동력을 구속하여 변형된 만곡현상이 나타났으며 파괴인성평가의 부대조건에 만족하지 못했다.

2) 본 소재의 경우 측면홈의 깊이를 40%로 하였을 때 평면변형률이 재배적인 상태이며, 파괴인성평가에 유효한 부대조건을 만족하는 최적조건으로 사료된다.

3) 측면홈의 영향은 파괴저항곡선의 미분값인 찢어짐계수와 균열길이에 따른 파라미터를 사용하여 불안정파괴 매개변수로서 유효성을 입증할 수 있었다.

4) 측면 홈의 깊이가 0%의 경우 파단면에서 인장하중에 의한 소성변형이 표면부분에 소성구속으로 작용하고 shear lip의 영향을 받아서 균열의 진전이 거의 일어나지 않았으며, 연성파괴의 특징인 미끄럼면 분리에 의한 사행미끄럼과 립플이 관찰되었다.

참고문헌

- 1) ASTM E813, "Standard test method for JIC, A Measure of Fracture Toughness," pp. 646~660, 1997.
- 2) ASTM E1152, "Standard test method for Determining Fracture Resistance Curve," pp. 763~773, 1997.
- 3) ASTM E399, "Standard test method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," pp. 412~442, 1997.
- 4) ASTM E8, "Standard test method of Tension Testing of Metallic Materials," pp. 56~76, 1997.
- 5) 임만배, 차귀준, "SA 508-3재의 제하킴플라이언스법과 하중비해석을 이용한 파괴저항곡선평가," 한국해양공학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 65~75, 1998.
- 6) Seok, C. S. and Kim, S. Y., "A Study on the Characteristics of Fracture Resistance Curve of Ferritic Steels," KSME International Journal Vol. 13, No. 11, pp. 827~835, 1999.
- 7) M. Kikuchi, S. N. Atluri and H. Miyamoto, "Studies on Size Effects and Crack Growth of Side-Grooved CT Specimen," ASTM STP, 868, pp. 251~278, 1985.
- 8) M. I. de Vries and B. Sohaap, "Experimental of Ductile Crack Growth in type 304 Stainless Steel," ASTM STP, 856, pp. 183~195, 1985.
- 9) N. P. O'Dowd, "Family of Crack Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-II," Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 40, No. 5,

- pp. 939~963, 1992.
- 10) N. P. O'Dowd, "Family of Crack Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-1," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 40, No. 5, pp. 989~1015, 1992.
- 11) M. O. Lai, "Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness," *Engineering Fracture*, Vol. 45, pp. 183~188, 1986.
- 12) 심도준, 장여훈, 최재봉, 김영진, 김철만, "구속효과를 고려한 가스배관 결함의 2차원적 파괴거동 해석에 관한 연구," *대한기계학회 논문집 A 권*, Vol. 25, No. 1, pp. 61~69, 2001.