

SG365강의 파괴저항특성과 찢어짐계수에 관한 연구

임만배* · 윤한기**

*동의대학교 산업기술개발연구소, **동의대학교 기계공학과

A Study on the J-Resistance Characteristics and Meterial Tearing Modulus of SG365 steel

MAN-BAE LIM* AND HAN-KI YOON**

*Research Institute for Industrial Technology Development, Donggeui University Pusan 614-714, Korea

**School of Mechanical Engineering, Donggeui University Pusan 614-714, Korea

KEY WORDS: Material tearing modulus 재료찢어짐계수, Effect of side grooved 측면홈 효과, J-Resistance curve 파괴저항곡선, Single specimen unloading compliance method 단일시험편 해중법, Gas piping meterial 가스배관재, J-integral J적분, Unstable crack growth 불안정균열성장

ABSTRACT: The elastic plastic fracture toughness of this material is evaluated by the an 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 material tearing modulus and characterizes the crack tip field under the plane stress and strain. SG-365 steel is observed that J-R curve and T_{mat} value decrease as 0%, 20%, 30%, and 40%. The 40% 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 tunneling and shear lip by the side groove. Applicability of tearing modulus(T_J) proposed by paris et al as instability panameter for this meterial is investigated.

1. 서 론

가스배관은 감육부의 건전성평가를 위해 파괴인성평가를 기준으로 한계하중을 적용하고 있으며, 표면균열에서 성장한 관통균열의 크기가 임계균열길이에 이르면 불안정하게 성장하여 파손에 이른다. 이러한 배관균열에 관한 안전성 때문에 파괴역학적인 해석이 선진국에서는 활발히 연구가 이루어지고 있다. 가스배관설비의 사용중대로 인한 사고사례들이 빈번하고 사고예방 차원에서 파괴역학적인 파라미터를 적용하여 가스설비의 효율적인 관리 및 유지보수가 필요하다. 이러한 구조물의 사용조건에 따라 건전성 및 잔여수명예측을 통하여 가동효율을 극대화하여 가동중 파손,파괴를 방지할 수 있는 안정성 평가기술은 많은 연구의 대상으로 주목을 받고 있다. 특히 가스설비 및 부속설비 등을 구성하는 장치재료는 임계균열에 따른 파단전누설(LBB, Leak before break) 개념을 적용하고 Dugdal 모델 해석을 기초로 한 파괴인성거동 특성을 규명하게 된다. 또한 가스설비 재료는 사용 중에 발생하는 손상으로 기계적, 화학적 원인과 재료의 열화 및 이들 요인에 의한 복합적인 면을 생각할 수 있다. 특히 기계적 파괴거동으로 연성파괴, 취성파괴, 피로파괴 등이 있으며 이러한 파괴원인을 규명하여 설비재료의 잔존수명을 평가하고 분석하여 경제적 손실뿐만 아니라 인명재해방지에 대한 연구가 요구 되고있다. 파괴 안전성평가방법으로 피로균열진전

평가와 함께 탄소성 파괴인성평가가 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에 사용된 재료는 가스 파이프라인에 사용되는 소재로서 인장 및 파괴인성시험을 수행하여 파괴특성을 조사하는데 목적을 두고 있다. 특히 본 소재와 같이 인성이 큰 재료의 파괴인성은 재료가 가지는 내부에너지, 시험편의 치수 및 시험편의 장차상태와 밀접한 관계를 가지고 있으며 또한 균열길이 측정에도 초기균열부분에서는 균열길이 감소현상이 발생하는 경우가 있다. 인성이 큰 재료의 파단면을 관찰하여 보면 재료내부의 미소결함이나 보이드(void)에서 연성파괴의 전형적인 모델을 관찰할 수 있으며 안정균열과 불안정균열의 경계에서는 응력상태에 지배 받는 터널링(tunneling) 현상이 야기된다. 이러한 평면응력상태는 정량적인 파괴인성평가에 과대평가를 초래하고 신뢰성에 의문을 가질 수 있다. 따라서 측면홈을 부가하여 평면변형률상태를 만족하는 정량적인 분석이 필요하다. 이와 같이 균열의 존재를 변수로 한 분석이 될 때 충분한 설계수명을 예측할 수 있다. 본 연구는 SG-365강을 사용하여 측면홈 깊이를 0%, 20%, 30%, 40%를 가공하였으며, ASTM E813-89 (ASTM E813, 1997), ASTM E1152 (ASTM E1152, 1997) 단일시험편법을 적용하여 J-R곡선의 구배에 따른 측면홈의 영향과 안정균열 발생점에 대한 탄소성 파괴인성치를 구하고 찢어짐계수(tearing modulus)를 파라미터로 하여 파괴저항성을 분석 고찰하였으며, 신뢰성 및 건전성 확보의 일환으로 실험을 수행하였다. 이러한 연구를 기

초로 하여 실제 가스 배관재의 구조설계 및 설비유지보수에 필요한 설계자료로 사용하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 가스배관 및 압력용기에 사용되는 SG-365강으로 Table 1에 화학적 조성을 나타내었다. J-R 파괴저항 시험편은 강판의 두께 27mm에서 채취하여 ASTM E399(ASTM E399, 1997) 표준 IT-CT 시험편으로 가공하였다. 피로균열 도입 후 시험편 양 측면에 각각 시험편 두께의 0%, 20%, 30%, 40%의 측면홈을 가공하였으며, Fig. 1, 2에 인장시험편과 CT 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. CT 시험편의 측면홈은 피로균열의 도입 및 COD게이지 부착을 용이하도록 노치부와 선단을 방전가공 하였으며 시험편 채취방향은 L-T방향이었다.

2.2 인장시험

ASTM E8(ASTM E8,1997)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 E813-89 및 E-1152 표준시험 절차에 따라 단일시험편 해중법을 (single specimen unloading compliance method) 으로 상온에서 수행하였다. 시험편의 무차원 균열길이(a/W)가 0.6이 되도록 피로예비균열을 도입하고 시험편 앞면과 뒷면의 균열길이의 편차가 ASTM규정에 만족하였으며 리가멘트를 거의 동일하게 유지하였다.

균열길이 및 파괴인성치는 균열의 직선성과 평면변형률조건의 응력상태에 지배되기 때문에 측면홈을 가공하여 실험을 실시하였다. 시험 후 피로균열은 시험하중의 60%로 부하하여 파단 후 주사식 전자현미경 (scanning electron microscope, SEM)을 사용하여 파단면을 조사하고 시험편폭을 9점평균하여 균열길이를 산출하고 파단된 시험편 표면의 응력 분포상태를 분석하여 shear lip과 터널링상태를 기준으로 균열길이의 재현성을 평가하였다.

Fig. 3은 파괴인성시험에 이용된 피로시험기로서 98kN 용량의 MTS 810 시스템을 사용하였다. 균열길이 측정은 MTS 632-03F-30의 COD게이지(게이지 길이 12mm)를 이용하였다. 또한 하중부하 조건은 0.1mm/mim로 유지하여 하중과 하중선-변위 선도를 얻었다.

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

Fig. 1 Geometry and configuration of tensile specimen

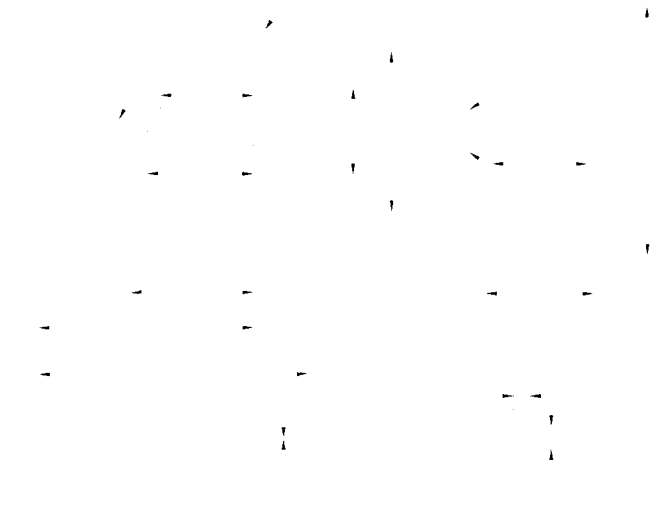


Fig. 2 Geometry and configuration of compact tension specimen

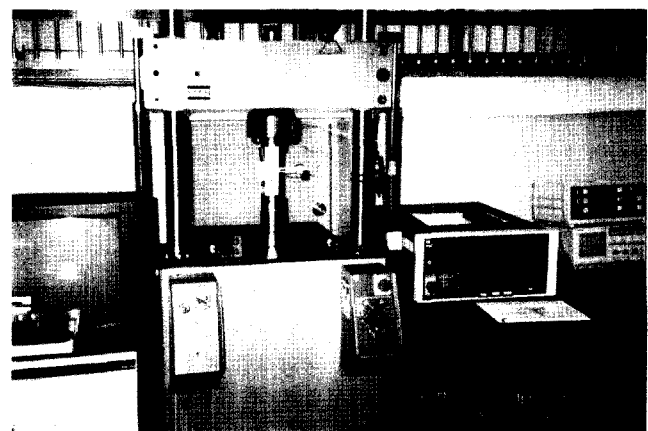


Fig. 3 Apparatus of room temperature in fatigue testing machine (MTS 810)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 평활 시험편에 대한 파괴저항특성

Fig. 4는 평활 시험편에 의한 탄소성 파괴인성 시험결과를 나타내었으며 균열길이 감소현상은 윗셋 방법에 따라 부 균열 만큼 윗셋하여 R곡선을 구하였다.(임등,1998) 둔화직선식은 ASTM E813-97에 의한 $J=2\sigma_y \Delta a$ 식에 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 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=1.196$ mm이고 0.15mm 윗셋선과 교점에서 구한 $\Delta a_{max} = 3.02$ mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윗셋선과 교점에서 구한 J_0 는 $J_0 = 848$ 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 반곡현상(opposite crack tunneling effect)이 뚜렷하게 나타나지고 인장부하에 의한 표면에는 균열 길이가 거의 일어나지 않고 중앙부에 집중되는 현상이 원인으로 생각된다.(M.Kikuchi, 1985, M.I.de Vries, 1985) 이러한 변형된 균열의 반곡형태는 고인성, 연성재의 평활 시험편에서 많이 나타나는 현상이며 이러한 균열이 진전된 전 파면에 대하여 균열 진전량을 단순 평균하면 시험편 양 표면에 나타난 응력상태 때문에 균열길이가 과소평가되어 탄소성 파괴인성치가 과대평가 될 수도 있고 평가 시 구속조건에 부합하지 못하여 평가에 어려움을 가져온다고 생각된다.(심도준 등,2001) 따라서 본 소재의 물리적 특성을 고려하여 볼 때 측면홈 가공에 의한 평가가 필요 할 것으로 사료된다.

3.2 파괴저항에 미치는 측면홈 영향

Fig. 5는 측면홈이 20% 삽입된 시험편의 탄소성파괴인성치를 나타낸 것이며 좌단면 상에서 평활시험편 보다 응력상태의 구속 조건은 완화되었지만 표면균열이 중앙부 균열과 차이가 있었다. 균열길이 감소현상은 평활시험편 보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며 R곡선을 윗셋 방법에 따라 구하였다. 둔화직선식은 $J=2\sigma_y \Delta a$ kN/m 이고 $J_{max} = 1116.45$ kN/m 였다. 유효점으로 R곡선을 구하고 R곡선과 0.15mm 배제선과 교점에서 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=1.14$ mm이고 0.15mm 배제선과 교점에서 구한 Δa_{max} 는 2.94 mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윗셋선과 교점에서 구한 J_0 는 $J_0=793.52$ kN/m이며 ASTM E813 규정에 따른 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하였지만 약간 과대평가 되는 경향이 나타났다.

Fig. 6은 측면홈이 30% 삽입된 시험편의 탄소성파괴인성치를 나타낸 것이며 20% 보다 응력상태의 조건은 평면변형률이 지배 되는 상태지만 표면균열이 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/m 이고 $J_{max} = 1019.80$ kN/m 였다.

R곡선과 0.15mm 배제선과 교점에서 Δa_{min} 를 구하면 $\Delta a_{min}=1.03$ mm이고 0.15mm 배제선과 교점에서 구한 Δa_{max} 는 2.82

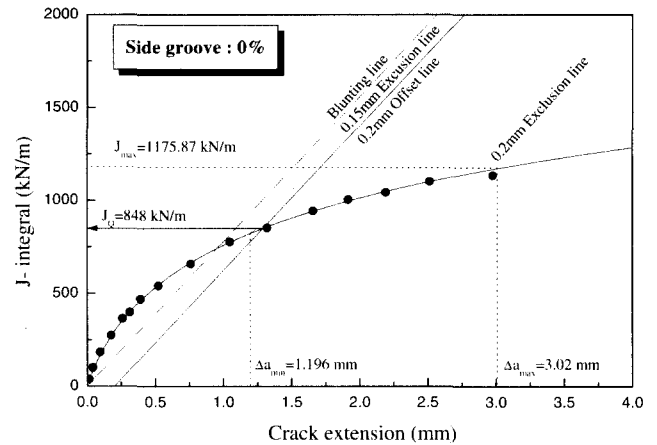


Fig. 4 Relations between J-integral and crack extension by 0% side groove specimen

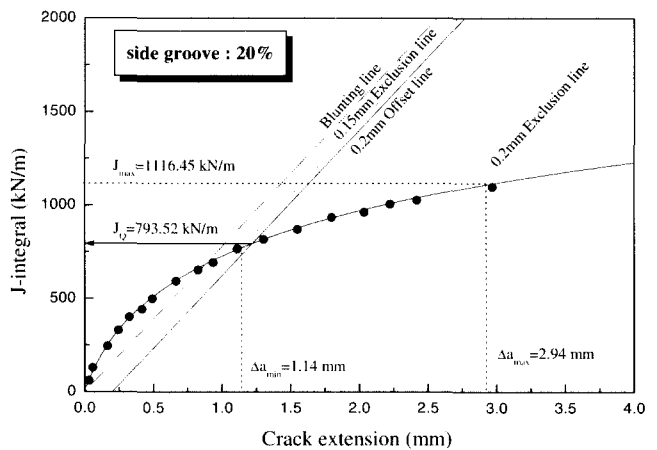


Fig. 5 Relations between J-integral and crack extension by 20% side groove specimen

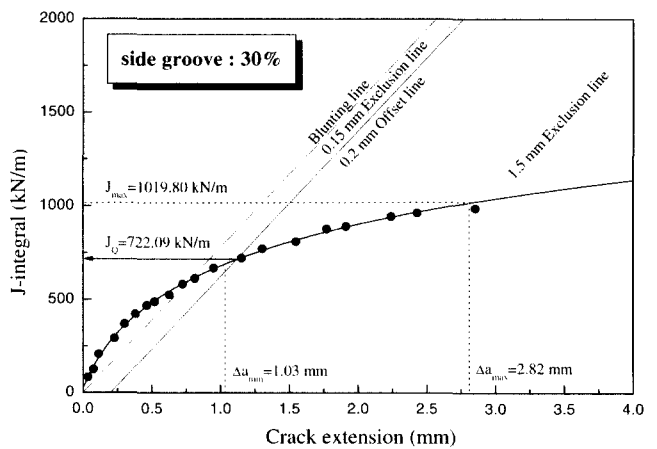


Fig. 6 Relations between J-integral and crack extension by 30% side groove specimen

mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윗선과 교점에서 구한 $J_Q = J_Q = 722.09 \text{ kN/m}$ 로서 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하였지만 약간 과대평가 되는 경향이 나타났다.

Fig. 7은 측면홈이 40% 삽입된 시험편의 탄소성과괴인성치를 나타낸 것이며 20%, 30% 보다 응력상태의 조건은 평면변형률이 지배되는 상태로서 표면균열과 중앙부 균열과 차이는 거의 없는 상태로 나타났다. 균열길이 감소현상은 20%, 30% 보다 약간 적게 나타나는 현상을 보였으며, 균열길이 감소현상은 시험편의 응력상태 뿐만 아니라 크래비스와 핀의 고정 문제등 여러 원인에 의한 현상으로 생각되며 정확하고 신뢰성을 갖는 파괴저항 특성을 필요로 하는 구조물의 경우 응력상태와 시험방법에 충분한 해석을 동반하여 선택할 필요가 있다(Seok, C.S 등, 1999). 본 연구에서 파괴저항특성을 고려하여 볼 때 실험의 최적조건은 측면홈 깊이를 40%할 때 가 최적의 조건으로 생각된다. 40%의 시험편의 경우 둔화직선식은 $J = 2\sigma_y \Delta a \text{ kN/m}$ 이고 $J_{max} = 835.53 \text{ kN/m}$ 였다. 유효점으로 R곡선을 구하고 R곡선과 0.15mm 배제선과 교점에서 $\Delta a_{p \text{ min}}$ 를 구하면 $\Delta a_{p \text{ min}} = 0.78 \text{ mm}$ 이고 0.15mm 배제선과 교점에서 구한 $\Delta a_{p \text{ max}}$ 는 2.57mm로 나타났다. 또한 R곡선과 0.2mm 윗선과 교점에서 구한 J_Q 는 $J_Q = 527.01 \text{ kN/m}$ 로서 J_{IC} 의 유효판정 조건을 만족하였으며 신뢰성을 갖는 평가를 할 수 있었으며 $J_Q = J_{IC}$ 로 평가 될 수 있었다. 따라서 본 연구에서 알 수 있듯이 고 연성과 고 인성을 동반하는 구조물의 파괴저항특성평가 시 응력상태를 고려한 측면홈 가공이 필요하다고 생각되며 초기균열길이와 파괴저항성을 평가하는데 매우 중요하다고 사료된다.

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. 측면홈 깊이가 0%~30%에서는 시험편 표면에서 중앙부로 shear lip의 양이 시험편폭의 약15%~5%정도로 관찰되었고 shear lip이 거의 발생되지 않는 40%인 경우와 비교하여 볼 때 표면의 소성구속효과로 인한 균열길이의 차이가 파괴저항을증가시키는 원인으로 생각된다. 그러나 40%는 표면근방에서 소성구속 완화와 더불어 시험편 외부와 중앙 방향으로 균열길이와 균열진전 동등력이 일정한 평면변형률조건에 따른 파괴저항거동을 보였다.

Fig. 9는 R곡선에서 유효영역에 있는 데이터를 이용하여 선형 근사하여 나타낸 것이다. 측면 홈 깊이가 0%, 20%, 30%, 40%의 경우 선형 근사식은 $J = 170.29 \Delta a + 656.40$, $J = 168.67 \Delta a + 613.95$, $J = 188.44 \Delta a + 520.78$, $J = 191.14 \Delta a + 375.42$ 로 나타났다.

Fig. 10은 측면 홈의 깊이에 따른 J_Q 값의 거동을 나타내고 있다. 정량적인 분석을 통하여 측면홈의 깊이가 깊어짐에 따라 J_Q 값이 감소되고 있음을 알 수 있고 특히 측면홈의 깊이가 40%에서 감소의 경향이 현저하게 나타났다. 이러한 경향은 응력상태가 평면변형률 파괴현상에 지배되기 때문에 균열의 저항성이 다르게 나타나 정량적인 분석에서 차이가난 것으로 생각된다. 따라서 고인성을 가진 소재의 탄소성과괴 인성평가시 측면홈의 삽입이 필수적이다. 본 연구에 입증할 수 있듯이 평활 시험편 표면에는 높은 소성구속효과가 일어나고 3축 응력이 발생되어 균열길이가 과소 평가되어 저항곡선이 ASTM규정의 R곡선 기울

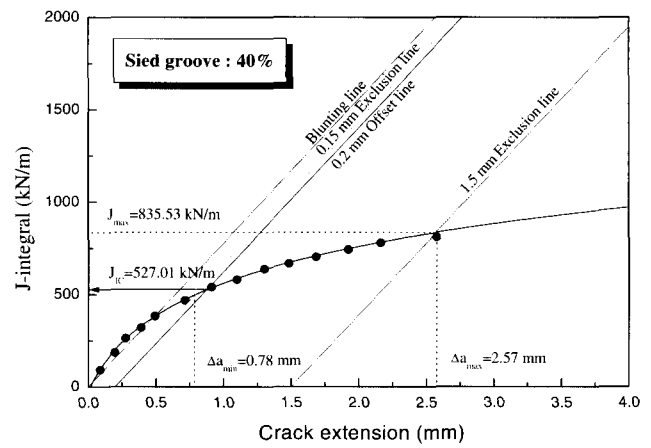


Fig. 7 Relations between J-integral and crack extension by 40% side groove specimen

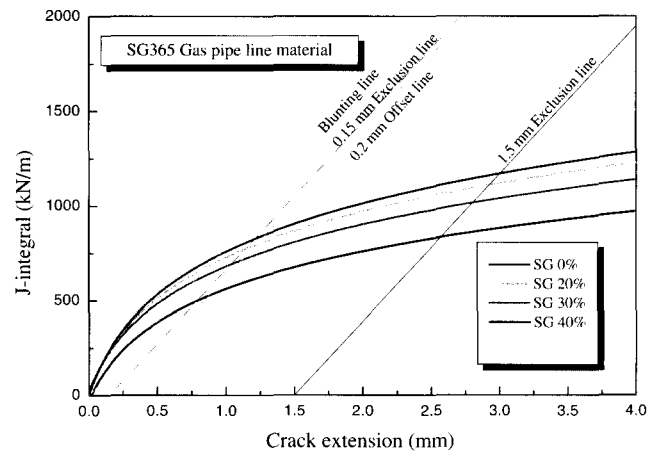


Fig. 8 Relations between J-integral and crack extension on the unloading compliance method by side groove 0%, 20%, 30%, 40%

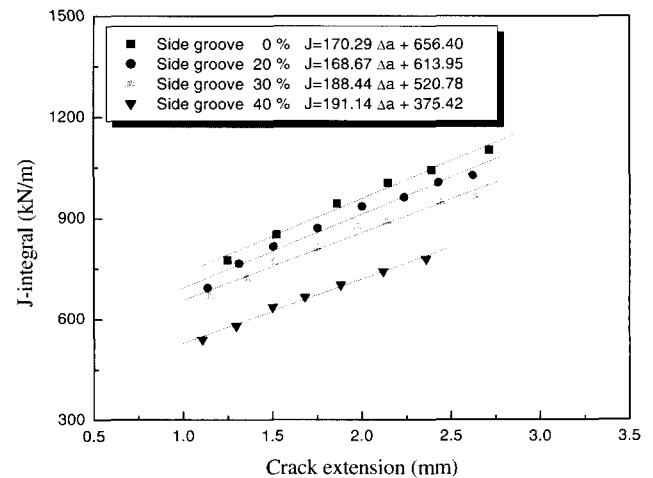


Fig. 9 Comparison with linear curve fitting for R-curve by unloading compliance method

기 조건을 만족하지 못하기 때문이다. 특히 파괴인성시험은 균열길이를 어떠한 방법으로 검출하는가가 가장 중요한 과제이며 추후 해석적인 방법을 도입하여 실험결과와 비교해석이 필요하고 사료된다.

3.3 찢어짐계수에 미치는 측면홈 영향

Fig. 11은 유효범위 내에서 J-R곡선의 경사부에 해당하는 dJ/da 의 미분 값을 이용하여 측면홈에 따른저항곡선의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 측면홈의 깊이가 증가할 수록 파괴저항성이 감소함을 볼 수 있다. 이러한 원인은 파괴형상에 따른 평면응력상태와 균열길이에 미치는 변형된 터널링 현상으로 생각된다. 측면홈 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.(N.P.O Dowd,1992, M.O.Lai,1986) 특히 0%의 측면홈의 경우 균열진전량의 초기 단계인 0.5mm 이하에서는 dJ/da 값의 변화가 매우 높게 나타났는데 이러한 원인은 시험편 표면에서 shear lip에 의한 소성구속으로 생각되며 균열진전량이 1mm 정도 에서는 측면홈의 깊이에 관계없이 일정한 값으로 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 평면응력상태의 지배하에서 평면변형률 상태로 천이하여 표면부의 소성구속 상태가 완화됨으로서 측면홈 깊이에 의존하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 12는 J값과 dJ/da 의 미분 값으로 나타내어 측면홈의 변화에 따른 저항곡선의 변화거동을 나타내었다. Fig. 11에서 나타난 것 보다 측면홈의 영향을 평가하기 위한 매개변수로서는 부적당하고 J적분에 따른 미분값이 많은 분산도를 가지고 있으며 저항곡선의 기울기에 해당되는 미분값에 의존되지 못함을 알 수 있다. 그러나 측면홈의 깊이에 따른 파괴저항거동은 0%, 20%, 30, 40%순으로 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 13은 파괴저항곡선의 미분값에 해당되는 dJ/da 를 Paris가 제안한 찢어짐계수값으로 변환하여 균열길이와 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 사용 할 수 있을 것으로 생각된다

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 평면변형률 상태로 표면부의 소성구속 상태가 완화됨을 확인할 수 있다. 측면홈

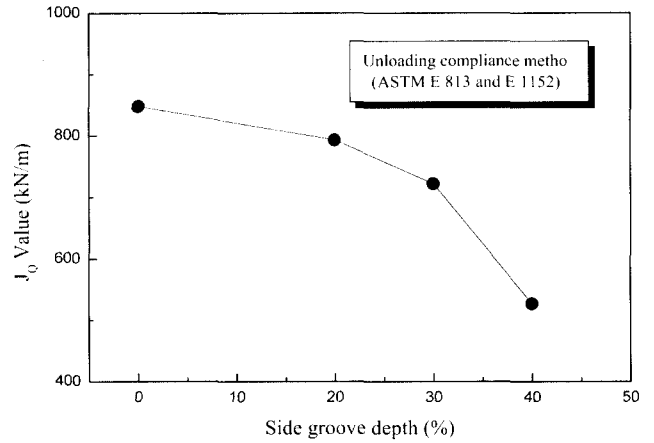


Fig. 10 Relation between J₀ value and side groove depth by ASTM E813 and E1152 unloading compliance method

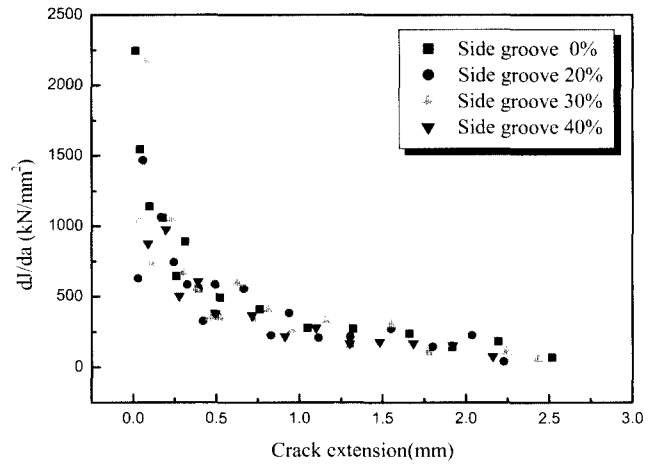


Fig. 11 The variation of dJ/da with crack extension for SG365 steel

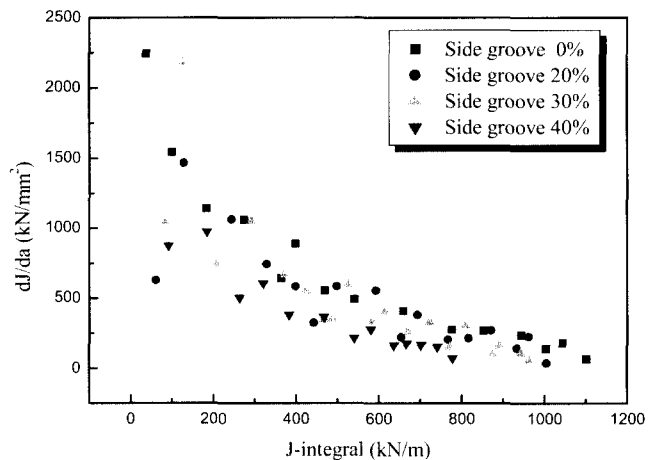


Fig. 12 The variation of dJ/da with J-integral for SG365 steel

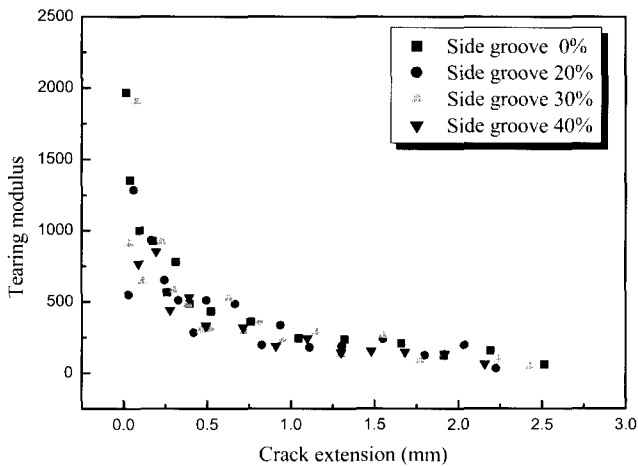


Fig. 13 The variation of tearing modulus with crack extension for SG 365 steel

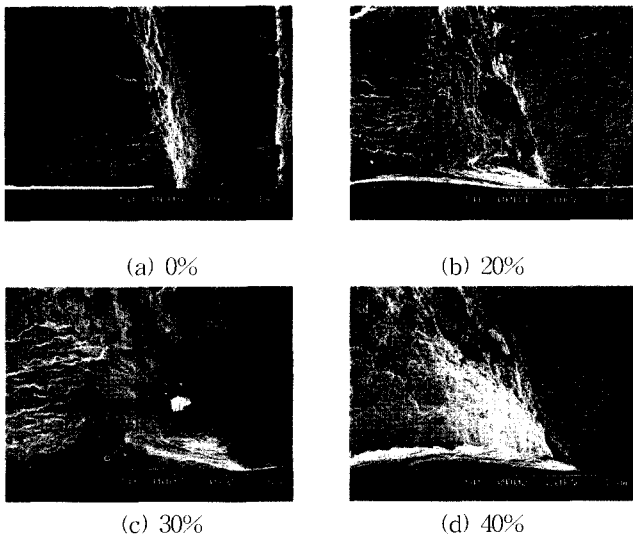


Fig. 14 SEM fractograph showing fracture surface of side groove depth

깊이가 시험편 두께의 40%인 경우 표면부와 중앙부에서 비슷한 균열진전의 양상을 관찰 할 수 있으며, 터널링 현상은 거의 일어나지 않았다. 따라서 소성구속에 의한 균열의 거동이 없이 평면변형을 조건을 만족하는 균열형태를 파면관찰을 통해 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 가스 배관재 SG-365강을 이용하여 시험편에 측면홈의 깊이 0%, 20%, 30%, 40%를 가공하여 J-R곡선과 찢어짐계수를 비교하여 파괴저항특성과 찢어짐계수를 정량적으로 평가한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측면 홈의 깊이가 0%의 경우 인장하중에 의한 소성변형이 표면 부분에 소성구속으로 작용하고 shear lip의 영향을 받아서 균열의

진전이 거의 일어나지 않았으며 평면응력이 지배적이었다.

(2) 본 소재의 경우 측면홈의 깊이를 40%로 하여 탄소성파괴인 성치를 시험한 결과 ASTM규정의 부대조건을 만족하였으며 $J_{IC} = 527.01 \text{ kN/m}$ 로 평가되었다.

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

(4) 고인성을 갖는 가스배관의 응력상태는 측면홈 깊이에 따라 구속효과가 적게 나타났으며, 파괴거동 평가는 측면홈 깊이를 고려한 평가가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

심도준, 장여훈, 최재봉, 김영진, 김철만(2001). "구속효과를 고려한 가스배관 결함의 2차원적 파괴거동 해석에 관한 연구" 대한기계학회 논문집 A권 제25권, 제1호, pp 61~69.

임만배, 차귀준, 윤환기, 안원기(1998). "SA 508-3재의 제하킴플라이언스법과 하중비해석을 이용한 파괴저항곡선 평가" 한국해양공학회지, Vol. 12, No. 1, pp 65~75.

임만배, 차귀준(1998). "SA 508-3재의 제하킴플라이언스법과 하중비해석을 이용한 파괴저항곡선평가" 한국해양공학회지 Vol.12, No.1, pp 65~75.

ASTM E813(1997). "Standard test method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", pp 646~660.

ASTM E1152(1997). "Standard test method for Determining Fracture Resistance Curve", pp 763~773.

ASTM E399(1997). "Standard test method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", pp 412~442.

ASTM E8(1997). "Standard test method of Tension Testing of Metallic Materials", pp 56~76.

M.I.de Vries and B.Sohaap(1985). "Experimental of Ductile Crack Growth in type 304 Stainless Steel", ASTM STP, 856, pp 183~195.

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.

M. O. Lai(1986). "Effect of Specimen Thickness on Fracture Toughness", Engineering Fracture Vol. 45, pp 183~188.

N. P. O' Dowd(1992). "Family of Crack Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-I", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 40, Number 5, pp 989~1015.

N. P. O' Dowd(1992). "Family of Crack Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-II", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 40, Number 5, pp 939~963.

Seok, C. S and Kim, S. Y.(1999). "A Study on the Characteristics of Fracture Resistance Curve of Ferritic Steels," KSME International Journal Vol. 13, No. 11, pp 827~835.

2001년 5월 29일 원고 접수

2001년 7월 31일 수정본 채택