

# 저방사화 철강재 (JLF-1)의 파괴인성에 미치는 시험편 크기의 영향

김동현\* · 윤한기\*\* · 박원조\*\*\* · Y.Katoh\*\*\*\* · A.Kohyama\*\*\*\*\*

\*동의대학교 대학원 기계공학과

\*\*동의대학교 기계·정보산업공학부

\*\*\*경상대학교 기계항공공학부

\*\*\*\*Kyoto Univ. 에너지 이공학 연구소

## Effect of specimen size on fracture toughness of reduced activation ferritic steel (JLF-1)

DONG-HYUN KIM\*, HAN-KI YOON\*\*, WON-JO PARK\*\*\*, Y. KATOH\*\*\*\* AND A. KOHYAMA\*\*\*\*\*

\*Graduate School of Mechanical Engineering, Dong-Eui Univ., Busan, Korea

\*\*Division of Mechanical-Information and Industrial Engineering, Dong-Eui Univ., Busan, Korea

\*\*\*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National Univ., Kyong-Nam, Korea

\*\*\*\*Institute of Advanced Energy, Kyoto Univ., Kyoto, Japan

**KEY WORDS:** Reduced activation ferritic steel (JLF-1) 저방사화 철강 (JLF-1), Elastic-Plastic Fracture toughness( $J_{IC}$ ) 탄소성파괴인성 ( $J_{IC}$ ), Strength 강도, Side grooved effect 측면홈 영향, Temperature effect 온도영향, Size effect 크기영향, Tungsten insert gas welding TIG 용접

**ABSTRACT:** Reduced activation ferritic (JLF-1) steel is leading candidates for blanket/first-wall structures of the D-T fusion reactor. In fusion application, structural materials will suffer effects of repeated changes of temperature. Therefore, the data base of tensile strength and fracture toughness at operated temperature 400 °C are very important. Fracture toughness ( $J_{IC}$ ) and tensile tests were carried out at room temperature and elevated temperature (400 °C). Fracture toughness tests were performed with two type size to investigate the relationship between the constraint effect of a size and the fracture toughness resistance curve. As the results, the tensile strength and the fracture toughness values of the JLF-1 steel are slightly decreased with increasing temperature. The fracture resistance curve increased with increasing plane size and decreased with increasing thickness. The fracture toughness values of JLF-1 steel at room temperature and at 400 °C shows an excellent fracture toughness ( $J_{IC}$ ) of about 530 kJ/m<sup>2</sup> and 340 kJ/m<sup>2</sup>, respectively.

### 1. 서 론

오스테나이트계 스테인레스강 및 산화물 분산 강화(Oxide Dispersion Strengthened, ODS) 강과 함께 핵융합로 구조재로 고려되고 있는 저방사화 페라이트강은 오스테나이트강에 비해 열팽창계수가 낮고, 열전도도가 우수하여 핵융합로 블랭킷과 같은 구조재로 사용하기에 적합한 것으로 평가되고 있다. (Davis and Michel, 1984; Klueh et al., 1990) 저방사화 페라이트강은 Cr-Mo 내열강을 기본으로 합금 설계되어 Mo 을 W 과 V 으로 대체함으로써 핵융합로 구조재 (예; 블랭킷, first wall 등) 로 사용하기에 적합하도록 기계적 성질과 방사능 조사 손상 등의 성질을 개선한 재료이다. (Kohyama et al., 1994) 특히, 내열 Cr-Mo 강에서 Mo 을 W, V, Ti 으로 대체 함으로써 고온인장강도, 크리프 강도 등이 향상된다는 보고 (Asakura, 1990)가 있으며, 이는 W 이 고용강화 및 석출경화 효과를 V 과 Ti 은 석출강화 효과를 부여하

여 Cr-Mo 강에 비해 개선된 기계적 성질을 얻는 것으로 알려져 있다.

일미간의 연구협력사업을 통하여 Kohyama (Kohyama et al., 1994; Kohyama, 1987)와 Hasegawa (Hasegawa et al., 1998) 등이 개발 중에 있는 Fe-Cr-W 형의 저방사화 페라이트 강 계열은 600 °C 이하 온도에서 오스테나이트계 (STS 304, 316) 보다 우수한 고온강도 특성을 확보하기 위해 2.23~12 wt% Cr 을 함유한 Fe-0.1C-XCr-2W-0.2V-0.07Ta-0.05N 조성의 페라이트강을 제작하였다. 이러한 일련의 페라이트강 시리즈를 JLF (Japanese Low Activation Ferritic Steel) 라 칭하고 있으며, 이 중에서 Fe-9Cr-2W-VTa 조성을 가지는 강을 JLF-1이라 한다. 핵융합로 및 원자력 발전소 같은 안전성을 요하는 구조물에서 파괴인성치는 효과적인 설계 자료로 사용되고 있다. 특히, 고인성재료의 파괴는 소규모항복조건을 만족하지 못하는 파괴가 일어나는 경우가 많아 탄소성파괴역학에 의한 탄소성파괴인성 ( $J_{IC}$ )을 사용한 안전성 평가가 요구된다.

어떤 연구자들은 (Nishimura et al., 1998; Shiba et al., 1997) 저방사화 페라이트 강에 대한 기계적 물성치평가와 파괴인성

제1저자 홍길동 연락처: 부산 부산진구 가야3동 산24

051-890-2109 01gm091@dongeui.ac.kr

평가치를 핵융합로 블랭킷의 설계 자료로 활용할 목적으로 상온 환경에서 기초적 연구를 수행하였다. 그러나, 핵융합로 블랭킷/제1벽은 고온·진공·중성자 조사 등의 분위기에서 운전되고, 중성자조사시험장치에 사용되는 시험편의 크기 및 두께는 파괴인성시험에 사용되는 표준시험편들 보다 작은 치수의 시험편이 사용된다. 이 같은 경우 재료의 파괴특성은 온도, 시험편 크기, 중성자 조사등의 영향을 받아 변화되는 것으로 알려져 있다. 따라서, 상온에서의 파괴인성 데이터뿐만 아니라 사용온도인 400℃와 시험편 크기에 따른 파괴역학적 데이터 확보는 중요하다 할 수 있다. 또한 철강재를 이용한 구조물 제작시 용접공정은 필수적이므로, 모재의 특성뿐만 아니라 용접부의 특성 파악도 필요시 되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 JLF-1강을 TIG 용접하여 용접부와 모재를 상온 및 사용온도 400℃에서 인장시험을 실시하고, TIG 용접부와 모재의 경계면을 Micro-Vickers 경도시험을 하여 JLF-1강의 TIG용접 특성을 조사하였다. JLF-1강의 중성자 조사 이전의 파괴인성 데이터를 확보하고자 상온과 400℃에서 탄소성파괴인성(J<sub>IC</sub>) 시험을 실시하여 JLF-1강의 온도의존성을 조사하였고, 측면흡, 시험편 두께 및 크기에 따른 JLF-1강의 파괴저항곡선의 변화를 관찰하였다. 이들 결과는 핵융합로의 블랭킷과 제1벽의 구조재 개발과 적용을 위한 기초적 설계자료로 그 기여도가 클 것으로 전망된다.

## 2. 시험재료 및 시험방법

### 2.1 시험재료

1050℃에서 1시간 동안 노멀라이징한 후 780℃에서 1시간 동안 템퍼링한 25mm 두께의 JLF-1 평판을 U 홈 가공하여 Table 1과 같은 조건으로 TIG 공정에 의해 맞대기 용접하였다. TIG 용접시 사용한 용가재의 직경은 1.2mm이며, 용접금속과 용가재, JLF-1 모재의 화학조성은 Table 2에 정리하였다. 용접 쿠폰은 740℃에서 3시간 동안 노냉하여 용접후 열처리를 하였

Table 1 TIG welding condition

Current	230 ~ 250 A
Voltage	10.5 V
Travel speed	10 cm/min
Heat input	14.5 ~ 15.8 kJ/cm
Preheat temp.	≤ 200℃
Interlayer temp.	≤ 200℃
Number of passes	~ 20
Wire diameter	1.2 mm

Table 2 Chemical composition (wt %) of base metal (JLF-1), weld metal and filler metal

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	W	V	Ta	N	Ti	B
JLF-1 base metal	0.10	0.05	0.45	0.003	0.002	0.003	8.85	1.99	0.20	0.080	0.0231	--	0.0002
Weld metal (JLF-1)	0.061	0.13	0.43	0.005	0.003	0.003	9.16	1.91	0.25	0.081	0.0259	0.019	0.0001
Filler metal (JLF-1)	0.061	0.10	0.45	0.003	0.003	0.003	8.96	1.82	0.25	0.084	0.0332	0.028	0.0001

고, 용접 및 열처리가 마무리된 용접쿠폰으로부터 인장시험편과 파괴인성시험편을 Fig. 1과 같이 채취하였다.

### 2.2 시험방법

인장시험편은 Fig. 2와 같은 치수의 환봉시험편을 사용하였으며, ASTM E8 에 따라 수행되었다. 파괴인성시험은 ASTM E1820에 따라 수행되었으며, 시험편은 용접쿠폰으로부터 T-L방향으로 Fig. 3과 같은 치수의 CT 시험편을 사용하였다.

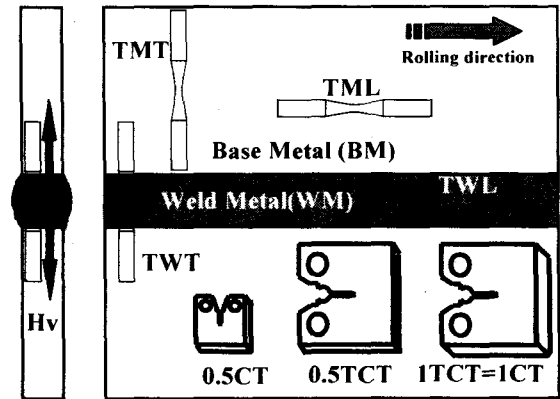


Fig. 1 Preparation of test specimens from weld coupon

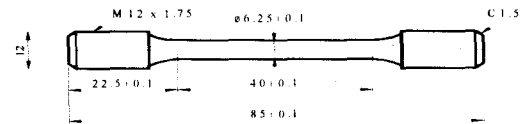


Fig. 2 Configuration of tensile test specimen

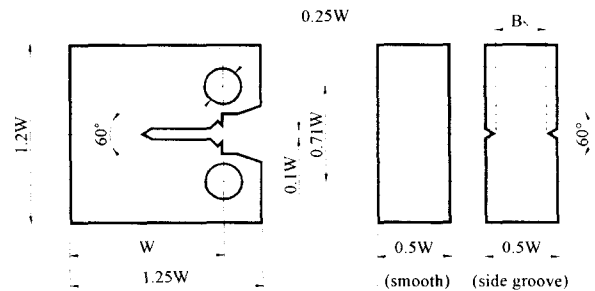


Fig. 3 Configuration of compact test specimen

CT 시험편의 경우 균열의 진행방향을 구속함과 동시에 측면 흠에 대한 영향을 관찰하기 위해 0%, 20%, 40%의 측면흠을 가공하였다. 시험편 크기의 영향을 조사하기 위하여 Fig. 4와 같이 두께(B)를 24mm와 12mm로 하고 ASTM 규격에 따라 시험편 폭(W)을 두께의 두배로 한 시험편을 사용하였으며, 이를 각각 1CT와 0.5CT라 하였다. 시험편 두께의 영향을 조사하기 위하여 시험편의 폭(W)을 고정하고 두께를 24mm와 12mm로 변화시킨 시험편을 사용하였으며, 이를 각각 1TCT와 0.5TCT라 하였다. 시험편의 실제 가동온도인 고온(400 °C)에서의 인장 및 파괴인성시험은 전기로내에 시험편을 위치시킨 후 시험편 주위에 열전대를 부착하여 시험편 표면온도를  $\pm 1$  °C의 오차범위 내에서 시험을 수행하였다. 인장시험 및 파괴인성 시험은 최대하중 10 tonf의 동적유압 피로시험기(MTS Model 810)를 사용하였으며, 하중속도는 0.1 mm/min으로 일정하게 제어하여 수행하였다. Micro-Vickers 경도는 10N의 하중으로 Akashi社의 MVK-HVL 경도시험기를 이용하여 측정하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 경도특성

Fig. 5는 Table 1의 조건으로 TIG 용접한 시험편의 경도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯 JLF-1 모재(BM)에 비해 TIG용접금속(WM)에서 경도치가 아주 높게 나타났고, 모재

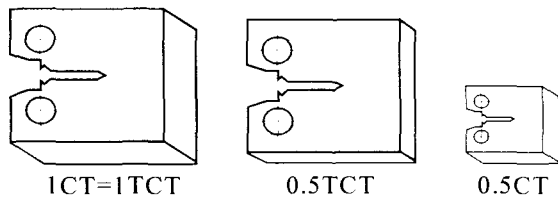


Fig. 4 Schematics for various size of specimens

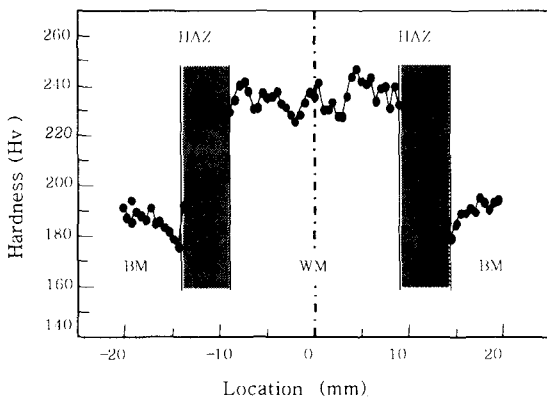


Fig. 5 Hardness distribution near the weld interface of TIG welded joints

의 경도는 약 Hv 190 정도이며, 용접금속의 경우는 약 Hv 240 정도로서 모재부의 경도에 비해 큰 값으로 상승되었음을 알 수 있었다. 이는 TIG 용접시 용접면에서의 가열과 급냉 및 열처리 효과로 인한 경도치 증가로 사료된다. 또한, 용접부 중심으로부터 14 mm 위치인 열영향부 (HAZ)와 모재부의 경계면에서 가장 낮은 경도치를 보였고, 동일 구간에서 인장파단이 발생하여 이 부분이 hardness-valley로 생각된다.

#### 3.2 인장특성

JLF-1의 모재와 용접부의 상온 및 고온에서의 인장시험 결과를 Fig. 6 ~ 7에 나타내었다.

Fig. 6는 JLF-1 모재와 용접부의 압연방향과 직각방향에 대한 상온과 고온에서의 응력과 크로스 헤드(cross-head) 변위 관계를 나타낸 것이다. 전반적으로 유사한 최대인장강도(UTS)를 나타내고 있으며, 상온에서 고온보다 높은 연신율을 나타낸다는 것을 알 수 있다. Fig. 6으로 부터 얻은 UTS와 총연신율, 단면수축율에 대한 정량적 물성치를 Fig. 7에 나타내었다.

상온의 경우, 압연방향 용접부(TWL) 시험편의 최대인장강도(UTS)는 727 MPa로 가장 높은 값을 보였고, 총 연신율은 23.8%로 직각방향 용접부(TWT) 보다 높게 나타났다. 압연방향 모재(TML) 시험편의 경우, 총 연신율 27.8%로 가장 높았으며,

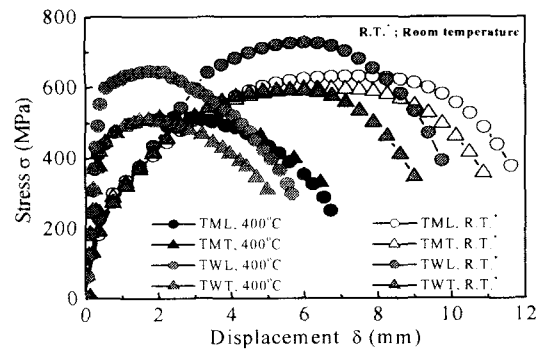


Fig. 6 Relationship between stress and displacement

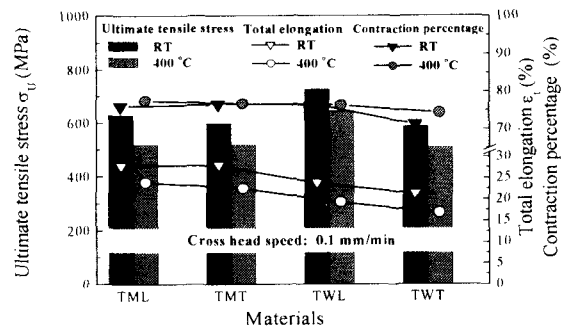


Fig. 7 Effect of temperature on JLF-1 steel and its welding joint

UTS는 630 MPa로 TWL보다 낮았지만 다른 재료들과 유사한 강도를 보였다. 용접부를 포함하며, 압연방향에 대한 직각방향 시험편(TWT)은 최대인장강도 590 MPa, 0.2% offset 강도 445 MPa, 연신율 21%로 모재 및 용접부에 비해 TWT의 강도 및 연신율이 가장 낮게 나타났으며 TWT, 모재(TML, TMT), TWL의 순으로 강도가 증가함을 알 수 있었다. TWT의 경우 항상 열영향부(HAZ)에서 파단되고, 이는 TWT의 인장특성이 HAZ의 강도와 연신율에 의해 결정되는 것으로 생각된다. 고온(400°C)의 경우, 모재의 UTS와 총연신율은 압연방향의 영향은 거의 없었으며, 용접부를 포함하는 TWL이 TWT보다 높은 강도와 총연신율을 보여 상온과 유사한 경향을 나타내었다. 즉, JLF-1 모재는 압연방향에 대한 영향을 거의 받지 않았고, TIC 용접으로 연신율은 감소되었지만 강도는 유사하거나 향상됨을 알 수 있었다. 또한, 온도가 증가할수록 강도와 연신율이 감소하는 현상을 보였는데, 이는 일본에서 개발된 8Cr-2W 조성의 또 다른 저방사화 페라이트강인 F82H (Nishimura et al., 1998)가 온도가 증가할수록 강도가 감소하고, 연신율은 400°C 부근에서 가장 낮게 나타났으며, 400°C 이상에서는 연신율이 다시 증가하는 것과 유사한 형태를 보였다. 이들 두 재료의 이 같은 현상은 온도증가에 따른 재료의 연화현상과 함께 철강이 특정 온도에서 나타내는 청열취성(blue brittleness)에 의한 것으로 사료된다.

### 3.3 탄소성파괴인성(J<sub>IC</sub>)특성

#### 3.3.1 측면홈의 영향

Fig. 8은 0%, 20%, 40% 측면홈을 가지는 시험편의 파괴저항 곡선이다. 평활시험편의 경우 Shear lip발생에 의한 평면응력이 지배적인 상태로 파괴인성값의 도출이 불가능한 것으로 판단되었다. 20% 측면홈 시험편은 J<sub>Q</sub>값을 평가 할 수는 있었으나 40% 측면홈 시험편에 비해 J<sub>Q</sub>값이 약 12.5% 정도 과대 평가되었다. Fig. 9는 400°C에서의 0%, 20%, 40% 측면홈을 가지는 시험편의 파괴인성 시험 결과이다. 400°C에서의 파괴저항곡선은 평활 시험편과 측면홈 20% 시험편의 경우 파괴저항곡선의 기울기가 상온보다 저하되면서 균열길이 0.15~1.5mm 내의 데이터 수는 증가하였으나, J<sub>max</sub>값보다 큰 값을 나타내면서 ASTM (1996)의 유효데이터 영역에 대한 조건을 만족하지 못하였다. 그러나, 400°C에서도 상온과 마찬가지로 측면홈을 40% 할 때 정량적인 탄소성파괴인성 평가가 가능하였다.

#### 3.3.2 온도의 영향

ASTM E1820 규정을 만족하는 40% 측면홈 시험편을 상온과 400°C에서 탄소성파괴인성(J<sub>IC</sub>) 시험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 균열진전량 0.5mm를 기점으로 상온의 파괴저항곡선이 고온보다 상당히 높게 위치하여 JLF-1의 J<sub>Q</sub>와 파괴저항곡선이 온도의존성이 있음을 알 수 있었다. 상온에서 J<sub>IC</sub> = 537.6 kJ/m<sup>2</sup>이었던 것이 400°C에서는 J<sub>IC</sub> = 343.6 kJ/m<sup>2</sup>로 나타나 온도가 증가되면서 파괴인성치는 36% 감소하였다. 이는 인장 시험에서 보인바와 같이 온도가 증가되면 재료가 취화되는 특성에 기인한 것으로 사료된다.

#### 3.3.3 시험편 두께의 영향

0.5TCT 시험편은 ASTM의 시험편 두께조건을 고려해 20%의 측면홈을 가공하여 파괴인성 시험을 수행하였으며, Fig. 11

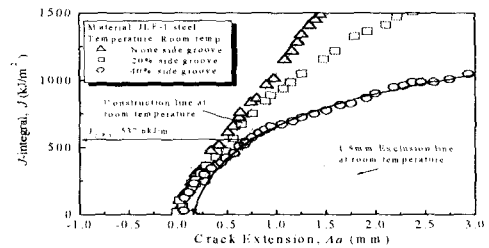


Fig. 8 Effect of side groove on J-Δa curves for JLF-1 steel at room temperature

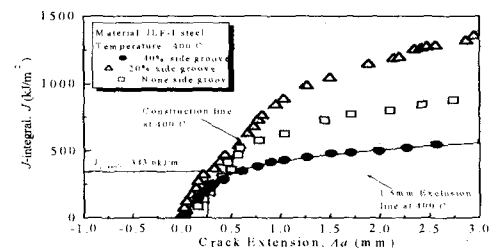


Fig. 9 Effect of side groove on J-Δa curves for JLF-1 steel at 400°C

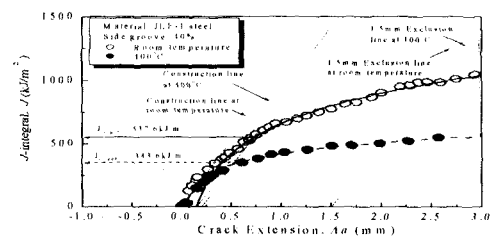


Fig. 10 J-Δa curve for JLF-1 steel with 40% side groove at room temperature and 400°C

은 동일한 시험편 폭을 가지면서 두께가 24mm에서 12mm로 감소할 때의 파괴저항곡선의 변화를 나타낸 것이다. 균열진전 초기에는 파괴저항 곡선의 차이가 없었으나 균열길이 0.5mm 이후부터 0.5TCT 시험편의 파괴저항곡선은 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. Ferguson(Lai and Ferguson, 1986)와 John(John, 1970)은 시험편의 두께가 증가함에 따라 파괴인성치는 감소하고 일정두께 이상에서는 파괴인성치가 일정한 값을 나타낸다고 보고하였으며, 본 연구의 결과에서도 동일한 경향을 나타내었다. 이는 시험편 폭에 비해 얇은 두께를 가지면서 평면변형률조건을 만족하지 못한 결과로 사료된다. 따라서, 0.5TCT 시험편의 탄소성파괴인성 데이터들은 대부분 ASTM의 유효범위인  $J_{max}$  값을 초과하여 존재하였고, 회귀선을 그릴 수 있는 유효데이터를 확보할 수 없어서 측면홈 20% 가공된 0.5TCT 시험편의 경우 정량적 파괴인성치인  $J_{ic}$ 를 계산할 수 없었다.

### 3.3.4 시험편 크기의 영향

시험편 크기 변화에 따른 파괴저항곡선의 변화를 알아보기 위해 표준시험편(1CT)과 두께 및 폭을 1/2 감소한 시험편(0.5CT)을 이용하여 탄소성파괴인성 시험한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 1CT 시험편의 파괴저항곡선이 0.5CT 시험편의 파괴저항곡선보다 조금 높게 나타났으나, 그 차이는 적었다. 0.5CT 시험편의 파괴저항곡선은 두께만을 감소시켰던 0.5TCT보다 파괴저항곡선이 많이 낮아졌으나, 0.5CT 시험편의 탄소성파괴인성 데이터들도 대부분 ASTM의 유효범위인  $J_{max}$  값을 초과하여 존재하였다. 앞서 설명하였던 3.3.1절에서와 같이 Shear lip의 발생에 의해 데이터들이  $J_{max}$  값보다 높게 위치한 것으로 사료되며, 이 경우 측면홈을 40% 가공한 시험편을 사용한 추가시험이 필요하다고 생각된다.

### 3.3.5 파괴인성 시험편의 파단면 관찰

Fig. 13은 각각의 시험온도와 측면홈에 따른 탄소성파괴인성 시험후의 파단면의 형상을 나타내고 있다. 평활시험편과 20% 측면홈을 가지는 시험편에서는 평면응력상태인 터널링현상과 Shear lip이 발생하였고, 특히, 평활시험편의 경우 시험편 두께의 40%에 해당되는 Shear lip이 형성되었다. 그러나, 40% 측면홈 가공한 시험편에서 평면변형률 상태를 관찰 할 수 있었다.

## 5. 결 론

핵융합로 수냉 블랭킷에 사용되는 저방사화 페라이트강(JLF-1)을 TIG 용접한 후 인장시험, Micro Vickers 경도시험, 탄소성파괴인성( $J_{ic}$ )시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TIG 용접에 의한 용접금속 중앙부의 Micro Vickers 경도는 JLF-1 모재 보다 약 21% 우수하게 나타났다.
- (2) 상온에서의 최대인장강도는 용접부의 직각방향 시험편(TWT, 588 MPa), 모재(TMT, 600 MPa / TML, 630 MPa), 용접금

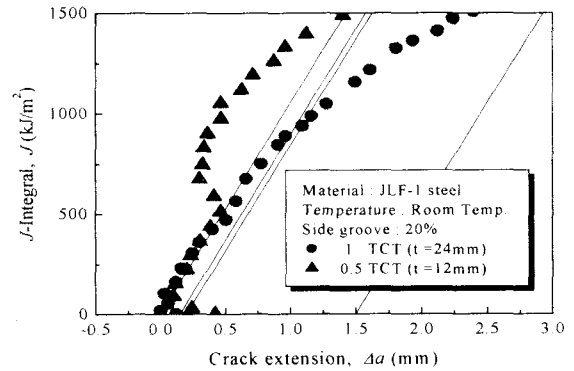


Fig. 11 Effect of specimen thickness on J- $\Delta a$  curves for JLF-1 steel at room temperature

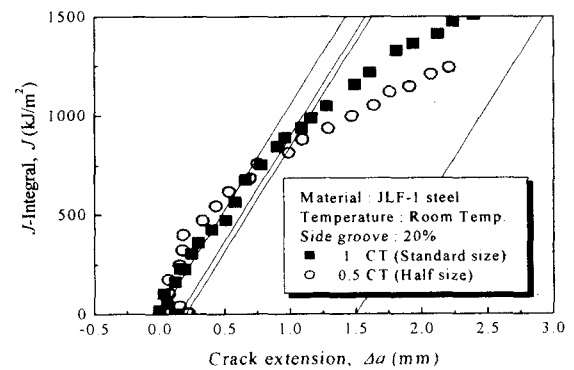


Fig. 12 Effect of specimen size on J- $\Delta a$  curves for JLF-1 steel at room temperature

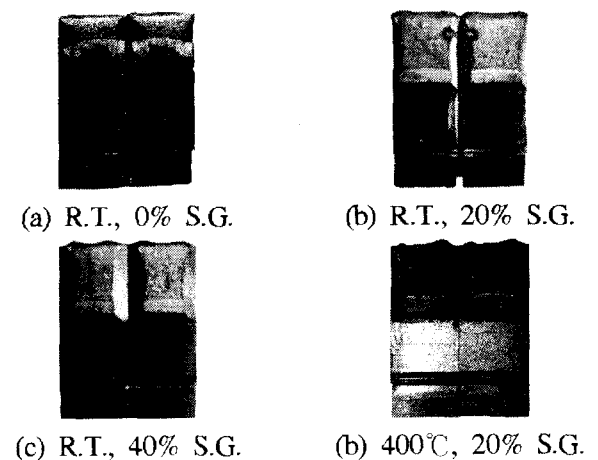


Fig. 13 Fracture surfaces of 1CT specimen for  $J_{ic}$  test

속(TWL, 727 MPa)의 순으로 증가하였고, 연신율은 TWT(21.7%), TWL(23.8%), 모재(TML, 27.8% / TMT, 27.9%)의 순으로 증가하였다. 400 °C의 경우, 모재 TMT = 519 MPa, TML = 519 MPa, 용접부 TWT = 588 MPa, TWL = 646 MPa의 최대인장강도를 나타내었다. 즉, 온도가 증가할수록 강도와 연신율은 감소하는 현상을 보였으며, TIG용접에 의해 연신율은 저하되었지만 모재인 JLF-1강 보다 우수한 강도를 확보할 수 있었다.

(3) JLF-1강의 탄소성파괴인성 시험은 측면흡을 40% 가공시 정량적 파괴인성치를 얻을 수 있었으며, 40% 측면흡을 가지는 1CT 시험편은 상온과 고온에서 각각 530 kJ/m<sup>2</sup>와 340 kJ/m<sup>2</sup> 이상의 우수한 파괴인성치를 나타내었다.

(4) 시험편 두께가 증가하면 파괴저항곡선은 낮아지고, 평면크기가 증가하면 파괴저항곡선은 높아지는 경향을 보였으며, 시험편 크기에 따른 파괴저항곡선의 변화는 적었다.

(5) 탄소성파괴인성 시험후의 파면에서 JLF-1은 평활시험편의 경우 평면응력이 지배적인 Shear lip현상이 크게 나타났으며, 40%의 측면흡을 가공하였을 때 평면변형률 상태에 근접한 파면을 형성하였다.

## 후 기

본 연구는 동의대학교 BK21사업과 CUP CR-03-2-5의 일환으로 이루어진 것으로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Asakura, K. (1990). "Mechanical Properties and Microstructure Changes of Low Activation 3Cr-2W-V-Ti Ferritic Steels Developed for Nuclear Applications," Int. ISIJ, Vol. 30-11, pp 947-954.
- Davis, J.W. and Michel, D.J. (1984). Proc. of Topical Conf. on Ferritic Alloys for use in Nuclear Energy Technologies, eds. TMS-AIME, Snowbird, Utah.
- Hasegawa, T., Tomita, Y. and Kohyama, A. (1998). "Influence of Tantalum and Nitrogen Contents, Normalizing Condition and TMCP Process on the Mechanical Properties of Low-Activation 9Cr-2W-0.2V-Ta Steels for Fusion Application," Jour. of Nuclear Materials, Vol. 258-263, pp 1153-1157.
- John, M.H. (1970). "The Influence of Crack Length and Thickness in Plane Strain Fracture Toughness Tests," Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing," ASTM STP 463, pp 160-190.
- Klueh, R.L., Gelles, D.S., Okada, M. and Packan, N.H. (1990). "Reduced Activation Materials for Fusion Reactors," ASTM-STP 1047.
- Kohyama, A. (1987). "Effect of 14-MeV Neutron Irradiations on Mechanical Properties of Ferritic Steels, 13th International symposium (Part II)," ASTM, pp 111-122.
- Kohyama, A., Kohno, Y., Asakura, K. and Kauano, H. (1994). "R & D of Low Activation Ferritic Steels Fusion in Japanese Universities," Jour. of Nuclear Materials, Vol. 212-215, pp 684-689.
- Lai, M.O. and Ferguson, W.G. (1986). "Effect of specimen Thickness on Fracture Toughness," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 23, No. 4, pp 649-659.
- Nishimura, A., Inoue, N. and Muroga, T. (1998). "Fracture toughness of low activation ferritic steel (JLF-1) weld joint at room temperature," Jour. of Nuclear Materials, Vol. 258-263, pp 1242-1247.
- Shiba, K., Hishinuma, A., Kohyama, A. and Masamura, K. (1997). "Properties of Low Activation Ferritic Steel F82H IEA Heat," JAERI-Tech, Vol. 97-038, pp 54-72.
- Shimomura, K., Shoji, T. and Takahashi, H. (1987). "Evaluation of Intergranular Fracture Initiation in Transition Region of Retired Steam Turbine Rotor Steel Using Small Specimens and the Acoustic Emission Technique," Jour. of Testing and Evaluation, Vol. 15, No. 5, pp 257~264.
- (1996) "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," Annual Book of ASTM Standards, ASTM E 1820-96, pp 992-1021