

# 저방사화 철강재 (JLF-1)의 시험편 크기 변화에 따른 파괴저항곡선의 변화

김동현<sup>†</sup>·윤한기\*·이상필\*·A. Kohyama\*\*

## Variation of the fracture resistance curve with the change of a size in the specimen of reduced activation ferritic steel (JLF-1)

D.H.Kim, H.K.Yoon, S.P.Lee and A.Kohyama

**Key Words:** J-R Curve (파괴저항곡선), Fracture toughness (파괴인성), Elastic-plastic fracture toughness (탄소성파괴인성,  $J_{IC}$ ), Effect of size (크기의 영향),

### Abstract

Reduced activation ferritic steel (JLF-1) is considered as a promising candidate material for blanket or first-wall structure of D-T fusion reactors. The fracture tests of fracture resistance curve (J-R curve) and  $J_{IC}$  are desirable to investigate the exact fracture toughness of JLF-1 steel, since it has a high ductility. The fracture toughness of JLF-1 steel is affected by the configuration of test specimen such side groove, specimen thickness or specimen size. In this study, the fracture toughness tests were performed with various size(plane size and thickness) and various side groove of specimens. The test results showed the standard specimen with the side groove of 40 % represented a valid fracture toughness. The fracture resistance curve increased with increasing plane size and decreased with increasing thickness. However, the fracture resistance curve of half size specimen was similar to that of the standard specimen.

### 1. 서 론

오스테나이트계 스테인레스강 및 산화물 분산 강화(Oxide Dispersion Strengthened, ODS)강과 함께 일미간의 연구협력사업을 통하여 Kohyama<sup>1)</sup>와 Hasegawa<sup>2)</sup>등이 개발 중에 있는 Fe-Cr-W 형의 저방사화 페라이트 강 계열은 600 °C 이하 온도에서 오스테나이트계(STS 304, 316)보다 우수한 고온 강도 특성을 확보하기 위하여 Fe-9Cr-2WVTa 조성의 페라이트강을 제작하였으며, 이것을 JLF-1이

라고 지명하였다. 핵융합로 구조재로 고려되고 있는 저방사화 페라이트강은 오스테나이트강에 비해 열팽창계수가 낮고, 열전도도가 우수하여 핵융합로 블랭킷과 같은 구조재로 사용하기에 적합한 것으로 평가되고 있다<sup>3)</sup>.

핵융합로 및 원자력 발전소 같은 안전성을 요하는 구조물에서 파괴인성치는 효과적인 설계 자료로 사용되고 있으며, 특히, 고인성재료의 파괴는 소규모항복조건을 만족하지 못하는 파괴가 일어나는 경우가 많아 탄소성파괴역학에 의한 탄소성파괴인성( $J_{IC}$ )을 사용한 안전성 평가가 요구된다. 몇몇 연구가는 저방사화 페라이트 강에 대한 기계적 물성치와 파괴인성평가지를 핵융합로 블랭킷의 설계 자료로 활용할 목적으로 상온 환경에서 기초적 연구를 수행하였다<sup>4,5)</sup>. 그러나, 핵융합로 블랭킷과 제1벽은 고온·진공·중성자조사 등의 분위기에서 운전되고, 중성자조사시험장치에

<sup>†</sup> 동의대학교 기계공학과 대학원

E-mail : 01gm091@dongeui.ac.kr

TEL : (051)890-2109 FAX : (051)890-2232

\* 동의대학교 기계공학과

\*\* 교토대 에너지 이공학 연구소

사용되는 시험편의 크기 및 두께는 파괴인성시험에 사용되는 표준시험편들 보다 작은 치수의 것들이 요구된다. 그로인해, 조사된 시험편과 비조사된 시험편 상호간의 파괴인성치 비교시 시험편 형상에 따른 오차가 발생하여, JLF-1의 중성자 조사에 의한 파괴인성치의 변화를 정확하게 규명할 수 없는 문제점을 안고 있다. 또한, 철강재를 이용한 구조물 제작시 용접공정은 필수적이므로 JLF-1 모재의 특성뿐만 아니라 용접부의 특성 파악도 중요시 되고 있는 실정이다.

따라서, 본 실험은 JLF-1의 중성자 조사에 따른 파괴인성치의 변화를 규명하기에 앞서, 비조사된 JLF-1 강을 대상으로 시험편의 크기, 두께, 측면홈과 같은 형상과 TIG 용접에 의한 파괴저항곡선의 변화를 관찰함으로써 중성자 조사 이전의 파괴인성 데이터를 확보하고자 하였으며, 인장시험으로 JLF-1 강의 온도, TIG 용접 및 압연방향에 따른 강도특성을 조사하여 핵융합로의 블랭킷과 제1벽의 구조재 개발과 적용을 위한 기초적 설계자료를 확보하고자 본 연구를 수행하였다.

## 2. 시험재료 및 시험방법

### 2.1 시험재료

본 연구에 사용한 시험재료는 핵융합로 블랭킷과 제1벽 재료로 고려되고 있는 저방사화 페라이트강(Japanese Low Activation Fe-9Cr-2WVTa steel, JLF-1)을 대상으로 하였다. 시험편 형상에 의한 구속효과와 TIG (Tungsten Insert Gas welding) 용

**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

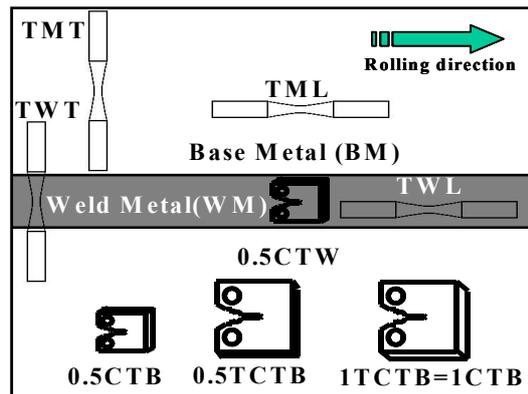
접에 의한 영향을 연구하기 위한 시험이므로 시험편 가공시 발생할 수 있는 열처리 및 압연방향에 따른 영향을 배제하기 위해 용접 및 열처리가 마무리된 용접쿠폰으로부터 인장시험편과 파괴인성시험편을 Fig. 1 과 같이 채취하였다.

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

### 2.2 시험방법

인장시험편은 Fig. 2 와 같은 치수의 환봉시험편을 사용하였으며, ASTM E8 에 따라 수행되었다. 고온인장시험은 핵융합로 수냉블랭킷의 실제 가동 환경인 고온 (400 ℃) 에서의 시험을 위해 전기로내에 시험편을 위치시킨 후 시험편 주위에 열전대를 부착하여 시험편 표면온도를 400 ± 1 ℃ 로 유지하면서 시험을 수행하였다.

파괴인성시험은 ASTM E1820에 따라 수행되었으며, 시험편은 T-L방향으로 Fig. 3 과 같은 치수의 CT 시험편을 사용하였다. CT 시험편의 경우



**Fig. 1** Preparation of test specimens from weld coupon

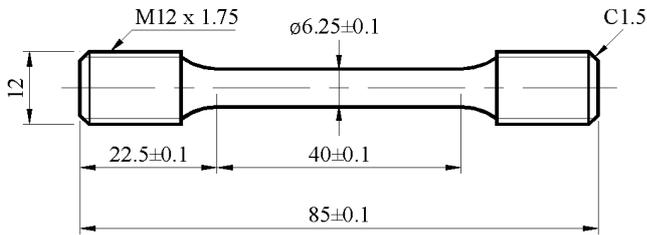


Fig. 2 Configuration of tensile test specimen

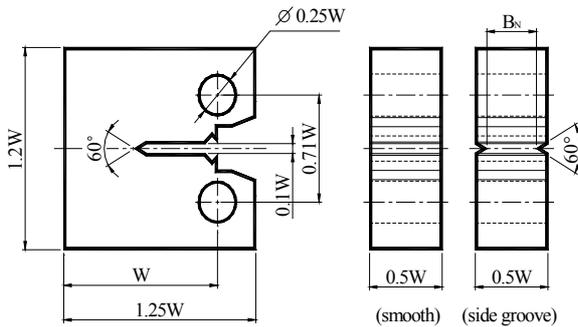


Fig. 3 Configuration of compact test specimen

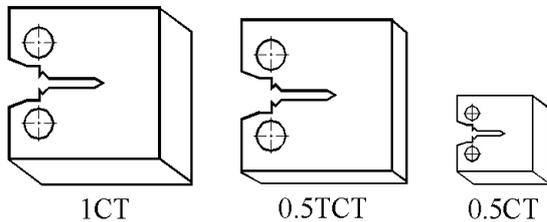


Fig. 4 Schematics for various size of specimens

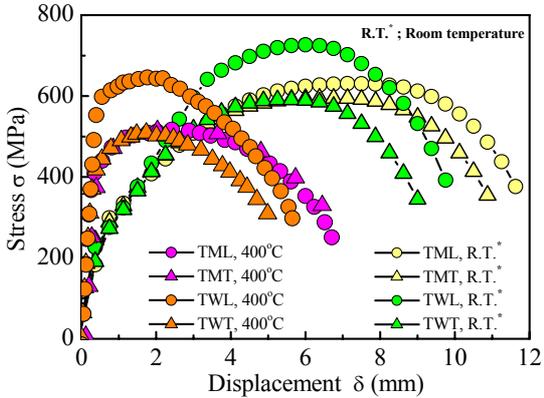
균열의 진행방향을 구속함과 동시에 측면홈에 대한 영향을 관찰하기 위해 0%, 20%, 40%의 측면홈을 가공하였다. JLF-1 강 모재의 시험편 크기에 따른 영향을 조사하기 위하여 Fig. 4와 같이 두께를 24 mm와 12 mm로 하고 ASTM<sup>6)</sup> 규정에 따라 시험편 폭(W)은 두께의 두배로 한 것을 사용하였으며, 이를 각각 1CTB와 0.5CTB라 하였고, TIG 용접부를 포함하고 두께가 12 mm인 CT 시험편의 경우 0.5CTW로 구분하였다. 또한, 시험편 두께의 영향을 조사하기 위하여 시험편의 폭을 표준시험편으로 고정하고 두께를 24 mm와 12 mm로 변화시킨 시험편을 사용하였으며, 이를 각각 1CTB와 0.5TCTB라 하였다.

인장시험 및 파괴인성 시험은 최대하중 10 tonf의 동적유압 피로시험기(MTS Model 810)를 사용하였으며, 하중속도는 0.1 mm/min으로 일정하게 제어하여 수행하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 인장특성

JLF-1의 모재와 용접부의 상온 및 고온에서의 인장시험 결과를 Fig. 5~6에 나타내었다. Fig. 5는 JLF-1 모재와 용접부의 압연방향과 직각방향에 대한 상온과 고온에서의 응력과 크로스헤드(cross-head) 변위 관계를 나타낸 것이다. 전반적으로 유사한 최대인장강도(UTS)를 나타내고 있으며, 상온에서 고온보다 높은 연신율을 나타낸다는 것을 알 수 있다. Fig. 5로부터 얻은 UTS와 총연신율, 단면수축율에 대한 정량적 물성치를 Fig. 6에 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, UTS는 630 MPa로 TWL 보다 낮았지만 다른 재료들과 유사한 강도를 보였다. 용접부를 포함하며, 압연방향에 대한 직각방향 시험편(TWT)은 최대인장강도 588 MPa, 0.2% 항복강도 446 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 파단 되었으며, 이는 TWT의 인장특성이 HAZ의 강도와 연신율에 의해 결정되는 것으로 생각된다. 400 °C의 경우, 모재의 UTS와 총연신율은 압연방향의 영향은 거의 없었고, 용접부를 포함하는 TWL이 TWT보다 높은 강도와 총연신율을 보였으며, 모재와 용접부는 상온인장시험결과와 유사한 경향을 나타내었다. 반면, 온도가 증가하면서 강도와 연신율이 감소하는 현상을 보였으며, 이는 온도증가에 따른 재료의 연화현상과 함께 철강이 특정온도에서 나타내는 청열취성(blue brittleness)에 의한 것으로 사료된다. TIG 용접에 의한 용접부는 모재인 JLF-1에 비해 연신율은 감소되었지만, TIG용접으로 접합할 경우 모재와 유사하거나 향상된 강도



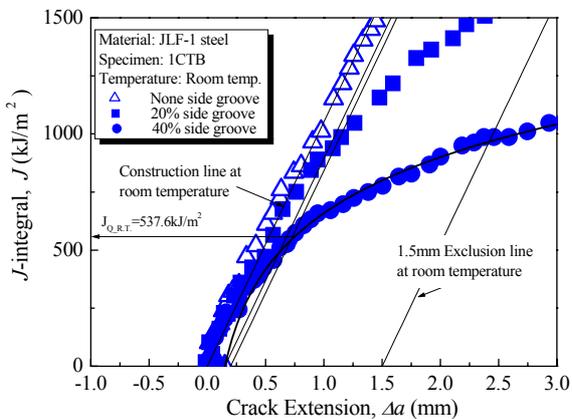
**Fig. 5** Relationship between stress and displacement

를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

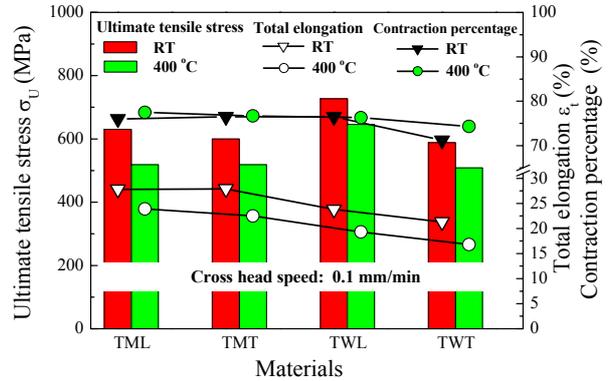
3.2 탄소성 파괴인성(J<sub>IC</sub>) 특성

3.2.1 측면홈의 영향

Fig. 7은 JLF-1 강 모재에서 채취한 표준시험편 (1 CTB) 들 중에서 0%, 20%, 40% 측면홈을 가지는 시험편의 파괴저항곡선이다. 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, J<sub>IC</sub> 판별 조건중의 하나인 두께조건을 만족하지 못하였고, 평면응력상태의 파괴를 일으키면서 40% 측면홈 시험편에 비해 J<sub>Q</sub> 값이 약 12.5% 정도 과대평가되었다. 측면홈을 40% 가공한 시험편의 경우 평면변형률 상태에서의 탄



**Fig. 7** Effect of side groove on J-Δa curves for JLF-1 steel at room temperature



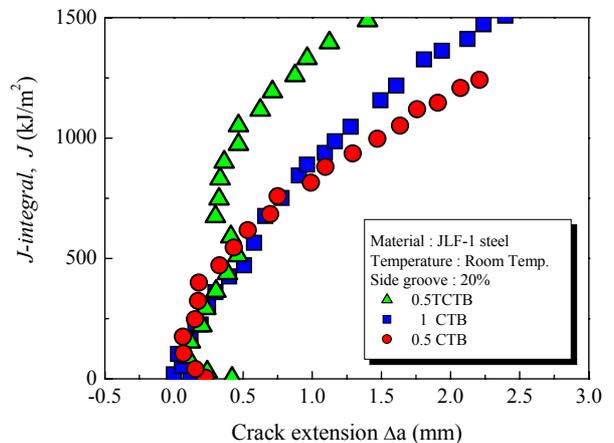
**Fig. 6** Effect of temperature on JLF-1 steel and its welding joint

소성파괴인성시험이 가능하였으며, JLF-1 강의 경우 538 kJ/m<sup>2</sup>의 파괴인성치를 나타내었으며, 측면홈을 40%로 할 때 정량적인 탄소성파괴인성 평가가 가능하였다.<sup>7)</sup>

3.2.2 시험편 두께 및 크기의 영향

Fig. 8은 동일한 시험편 폭을 가지면서 두께가 24 mm (1 CTB)에서 12 mm (0.5 TCTB)로 감소할 때, 그리고 표준시험편 (1 CTB)의 두께 및 폭을 1/2 감소한 시험편 (0.5CTB)의 J<sub>IC</sub> 시험에 의한 파괴저항곡선을 나타낸 것이다.

1 CTB와 두께만을 감소시킨 0.5 TCTB의 파괴 저항곡선은 균열진전 초기에는 파괴저항곡선의 차이가 없었으나 균열길이 0.5mm 이후부터 파괴 저항곡선이 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다. Ferguson<sup>8)</sup>와 John은 시험편의 두께가 증가함에 따



**Fig. 8** Effect of specimen thickness and size on J-Δa curves for JLF-1 steel at room temp.

라 파괴인성치는 감소하고 일정두께 이상에서는 파괴인성치가 일정한 값을 나타낸다고 보고하였으며, 본 실험에서도 유사한 경향을 보였다. 이는 시험편 폭에 비해 얇은 두께를 가지면서 평면응력상태로 균열이 진전되면서 나타난 현상으로 사료된다. 즉, 균열이 0.5 mm를 넘어가면서 균열선단은 큰 소성변형을 발생시켰고, 소성변형으로 인해 두께가 더욱 감소되면서 평면응력상태에서의 파괴를 유발하기 시작하여 균열선단 0.5 mm 부근에서 pop-in 현상과 함께 표준시험편에 비해 파괴저항곡선이 큰 폭으로 증가한 것으로 사료된다.

두께 및 폭을 1/2감소시킨 0.5 CTB 시험편의 파괴저항곡선은 동일한 두께에 시험편 폭이 두배인 0.5 TCTB 보다 파괴저항곡선이 많이 낮아졌다. 표준시험편 (1 CTB) 은 0.5 CTB와 0.5 TCTB 사이에 파괴저항곡선이 위치하였다. 표준시험편 (1 CTB) 의 파괴저항곡선이 0.5 CTB 시험편의 파괴저항곡선보다 조금 높게 나타났으나 그 차이는 작았으며, 이는 시험편 두께 증가에 따른 파괴저항곡선의 하강효과와 시험편 폭의 증가에 따른 파괴저항곡선의 상승효과가 복합적으로 나타나면서 시험편 크기에 따른 영향을 감소시킨 것으로 판단된다. 즉, 시험편의 두께와 폭을 동일하게 1/2 감소시킨 0.5 CTB의 경우 표준시험편과 크기만 달라졌을 뿐 시험편의 형상계수는 동일해 두 시험편 간의 파괴저항곡선이 유사한 형태를 나타낸 것으로 보인다.

### 3.2.3 TIG 용접의 영향

표준시험편의 폭과 두께를 1/2 감소한 시험편을 20% 측면홈 가공한 TIG 용접부 (0.5 CTW) 와 JLF-1모재 (0.5CTB) 의 파괴인성시험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 두 시험편의 데이터는 유효데이터 범위를 초과하여 존재함으로써 정량적 파괴인성치인  $J_{Ic}$  를 구할 수는 없었다. 그러나, 파괴저항곡선과 균열길이 ( $\Delta a$ )로 이뤄지는 면적은 균열확장에 필요한 에너지로 볼 수 있으며, 결국 파괴저항곡선이 높으면 균열성장의 발생부근에서의 파괴저항이 크다고 할 수 있다. 결국, TIG 용접부를 포함하는 0.5 CTW의 파괴저항곡선이 JLF-1모재 시험편인 0.5 CTB의 파괴저항곡선 보다 높게 위치함으로써 TIG 용접에 의해 모재인 JLF-1 보

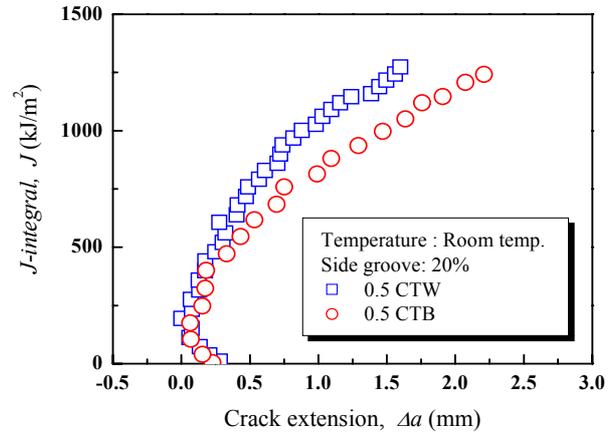


Fig. 9 J- $\Delta a$  curves of JLF-1 base metal and TIG weld joint

다 향상된 파괴저항특성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

두께 12mm, 20% 측면홈 가공된 모든 시험편들의 데이터들은 대부분 ASTM<sup>6)</sup>의 유효범위인  $J_{max}$  값을 초과하여 존재하였으며, 이는 앞서 설명하였던 3.2.1항에서와 같이 평면변형률 조건을 만족하지 못하고 평면응력의 대표적 형태인 Shear lip의 발생에 의한 것으로 판단되며, 추후 측면홈 40% 가공한 시험편을 사용한 추가시험이 필요하다고 생각된다.

## 5. 결 론

(1) JLF-1과 TIG용접부는 온도가 증가할수록 강도와 연신율이 감소하는 현상을 보였으며, TIG 용접으로 연신율은 저하되었지만 JLF-1강 보다 우수한 강도를 확보할 수 있었다.

(2) JLF-1강의 탄소성파괴인성 시험은 측면홈을 두께의 40%로 가공할 때 정량적 파괴인성치를 얻을 수 있었으며, 40% 측면홈을 가지는 표준시험편은  $530 \text{ kJ/m}^2$  이상의 우수한 파괴인성치를 나타내었다.

(3) JLF-1은 시험편 두께가 증가하면 파괴저항곡선은 낮아지고, 시험편 폭이 증가하면 파괴저항곡선이 높아지는 경향을 보였으며, 두께와 폭을 동일한 비율로 감소시켰을 경우 파괴저항곡선은 표준시험편과 유사한 형태를 보였다. 즉, JLF-1 강은 표준 CT 시험편과 동일한 형상계수를

가지는 소형시험편을 사용한 파괴인성치가 표준 시험편의 파괴인성치를 대신할 수 있을 것으로 생각된다.

(4) TIG 용접부는 파괴저항곡선이 모재보다 높게 나타나 JLF-1 보다 파괴저항이 우수할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 동의대학교 BK21사업과 CUP CR-0 3-2-5의 일환으로 이루어진 것으로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) A. Kohyama, Y. Kohno, K. Asakura, H. Kauano, 1994, "R & D of Low Activation Ferritic Steels Fusion in Japanese Universities", Journal of Nuclear Materials, 212-215, pp. 684-689
- (2) T. Hasegawa, Y. Tomita and A. Kohyama, 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
- (3) R.L.Klueh, D.S.Gelles, M.Okada and N.H. Packan, 1990, "Reduced Activation Materials for Fusion Reactors", ASTM-STP 1047
- (4) A. Nishimura, N. Inoue and T. Muroga, 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.
- (5) K. Shiba, K. Hishinuma, A. Kohyama and K. Masamura, 1997, "Properties of Low Activation Ferritic Steel F82H IEA Heat - Interim Report of IEA Round-robin Test(1)", JAERI - Tech, 97-038, pp. 55-57
- (6) "1996, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness," Annual Book of ASTM Standards, ASTM E 1820-96, pp 992-1021
- (7) D.H.Kim, H.K.Yoon, S.P.Lee, M.B.Lim and A. Kohyama, 2001, "Effect of side grooves on High Temperature Fracture Toughness of Low Activation Ferritic Steel", the Busan branch of the KSME,

Proceedings of the Busan branch of the KSME 2001 Autumn Annual Meeting, pp. 13~17

- (8) M.O. Lai, and W.G. Ferguson, 1986, "Effect of specimen Thickness on Fracture Toughness," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 23, No. 4, pp 649-659.