

핵융합로 블랭킷용 저방사화 철강재료 TIG 용접부의 강도특성

윤한기* · 이상필* · 김동현** · A. Kohyama***

*동의대학교 기계공학과

**동의대학교 대학원 기계공학과

***교토대 에너지공학연구소

Strength Characteristics of Reduced Activation Ferritic Steel for Fusion Blanket by TIG Welding

Han-Ki Yoon*, Sang-Pil Lee*, Dong-Hyun Kim** and A. Kohyama***

*Dept. of Mechanical Engineering, Dongeui University, Pusan 614-714, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Dongeui University, Pusan 614-714, Korea

***Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Abstract

JLF-1 steel (Fe-9Cr-2W-V-Ta), reduced activation ferritic steel, is one of the promising candidate materials for fusion reactor applications. Tensile properties of JLF-1 base metal and its TIG weldments has been investigated at the room temperature, 400 °C and 600 °C. The tensile strength of base metal (JLF-1) showed the level between those of weld metal and the Heat Affected Zone (HAZ). When the test temperature was increased from room temperature to high temperature (400 °C and 600 °C), both strength and ductility decreased or base metal, weld metal and the HAZ. The longitudinal specimens of base metal represented similar strength and ductility at room temperature and high temperature, compared to those of transverse specimens. Little anisotropy for the rolling direction was observed in the base metal of JLF-1 steel.

(Received September 26, 2002)

Key Words : Reduced activation ferritic steel, Tungsten insert gas welding, Rolling direction, Welding direction, Tensile properties, Test temperature

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 구조재로서 적합한 것으로 평가되고 있다^{1,2)}. 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 재료이다³⁾. 특

히, 내열 Cr-Mo 강에서 Mo 을 W, V, Ti 으로 대체 함으로써 고온인장강도, 크리프 강도 등이 향상된다는 보고⁴⁾가 있으며, 이는 W 은 고용강화 및 석출경화 효과를 V 과 Ti 은 석출강화 효과를 부여하여 Cr-Mo 강에 비해 개선된 기계적 성질을 얻는 것으로 알려져 있다.

일미간의 연구협력사업을 통하여 Kohyama^{3,6)} 와 Hasegawa⁵⁾ 등이 개발중에 있는 Fe-Cr-W 형의 저방사화 페라이트 강 계열은 600 °C 이하 온도에서 고온강도가 오스테나이트계 (STS 304, 316) 에 비해 우수한 특성을 확보하기 위해 2.23~12 wt% Cr 을 함유한 페라이트강을 제작하였다. 이러한 일련의 페라이트강 시리즈를 JLF (Japanese Low Activation Ferritic Steel) 라 칭하고 있다. JLF 저방사화 페라이트 강

기본조성은 Fe-0.1C-XCr-2W-0.2V-0.07Ta-0.05N 이며, Fe-9Cr-2WVTa 조성을 가지는 강을 JLF-1이라 한다. JLF 시리즈 외에 JAERI 와 NKK Co. Ltd.에 의해서 만들어진 8Cr-2W조성의 페라이트강인 F82H⁷⁾가 연구되고 있다. 이 같은 저방사화 페라이트강 (JLF, F82H 등)은 기계적 성질과 중성자 조사 손상 등에 대한 특성이 우수하나 이들 재료를 이용한 핵융합로 블랭킷 (blanket) 과 제 1 벽 같은 구조물 제작시 용접공정은 필수적이므로, 모재의 특성뿐만 아니라 용접부의 성질 또한 중요시되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 JLF-1 페라이트강을 TIG 용접하여 용접부와 모재의 각 방향에 대해서 상온 및 사용온도 400 °C와 600 °C에서의 인장시험을 실시하여 JLF-1의 온도에 따른 영향을 평가하고, JLF-1과 F82H 모재의 인장특성을 비교 평가하였으며, JLF-1의 모재와 용접부에 대한 파단면의 형상을 해석하였다. 이들 실험결과는 핵융합로용 블랭킷과 제 1 벽의 구조재로 사용하기 위한 기초적 설계자료로 그 기여도가 클 것으로 전망된다.

이러 용접금속과 용가재, JLF-1 및 F82H 모재의 화학조성은 Table 2 에 정리하였다. 용접쿠폰은 740°C에서 3시간 동안 노냉하여 용접후 열처리를 하였다. 용접 쿠폰으로부터 Fig. 2 와 같이 인장시편을 채취하였으며, 인장시편의 형상과 치수는 Fig. 3 과 같다.

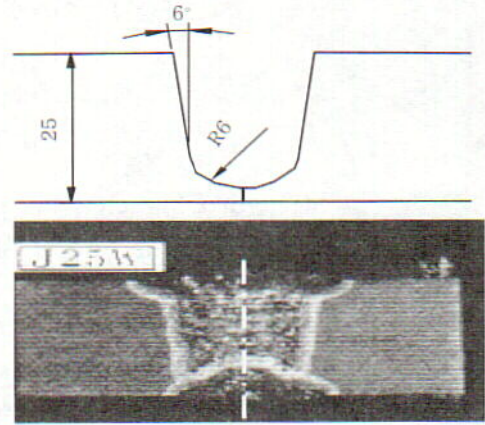


Fig. 1 U-groove shape and microstructure

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

1050 °C 에서 1 시간 동안 노멀라이징한 후 780 °C 에서 1 시간 동안 템퍼링한 25 mm 두께의 JLF-1 (Fe-9Cr-2W-0.2V-Ta) 저방사화 페라이트강을 U 홈 가공하여 TIG 공정에 의해 맞대기 용접하였다. 이때 용접홈의 형상은 Fig. 1 와 같으며, 용접조건은 Table 1 에 나타내었다. TIG 용접시 사용한 용가재의 직경은 1.2 mm

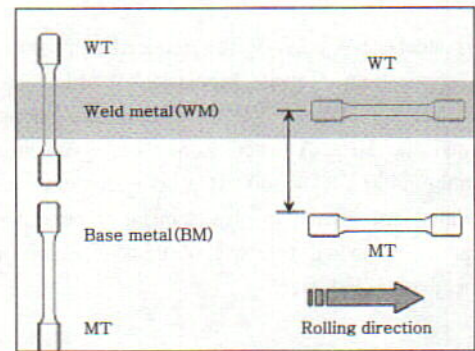


Fig. 2 Preparation of tensile specimens from weld coupon

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°C
Interlayer temp.	≤200°C
Number of passes	~ 20
Wire diameter	1.2 mm

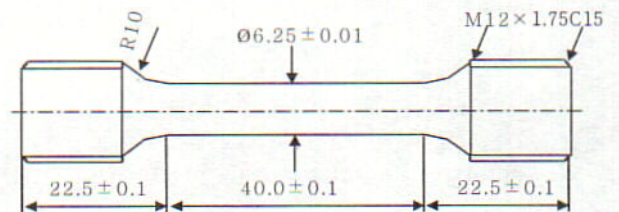


Fig. 3 Dimension and shape of tensile specimen (Standard ASTM E 8)

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

	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
F82H base metal	0.09	0.11	0.16	0.002	0.002	0.003	7.71	1.95	0.16	0.02	0.006	—	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

2.2 실험방법

수냉 블랭킷의 실제 적용온도에서의 실험을 수행하며, 재료의 온도에 대한 영향을 고찰하기 위해 실험온도는 상온 및 400 °C와 600 °C 에서 각각 인장시험을 수행하여 모재와 용접부의 방향성(L-T)을 조사하였다. 인장 시험은 최대하중 10tonf의 동적유압 피로시험기(MTS Model 810)를 사용하였으며, 하중속도는 0.1 과 1.0 mm/min으로 일정하게 제어하여 수행하였다. 고온(400 °C, 600 °C)에서의 인장시험을 위해 전기로내에 시험편을 위치시킨 후 시험편 주위에 Chromel-Alumel 열전대를 부착하여 시험편 표면온도를 ±1 °C의 오차범위 내에서 제어하였다. Micro-Vickers 경도는 10 N의 하중으로 Akashi 社의 MVK-HVL 경도시험기를 이용하여 측정하였다. 인장 파단 후 각각의 조건들의 시험편 파단면은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy: SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 경도특성

Fig. 4는 Table 1의 조건에서 TIG 용접한 시험편(WT)의 경도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모재에 비해 용접금속에서 경도치가 아주 높게 나타났다. 모재의 경도는 약 Hv 190 정도이며, 용접금속의 경우는 약 Hv 240 정도로서 모재부의 경도에 비해 큰 값으로 상승되었음을 알 수 있다. 이는 TIG 용접시 용접면에서의 가열과 급냉 및 열처리 효과로 인한 경도치 증가로 생각된다. 또한, 열영향부(HAZ)와 모재부인 14 mm 위치에서 인장파단이 되었는데, 이 부분이 바로 hardness-valley이다.

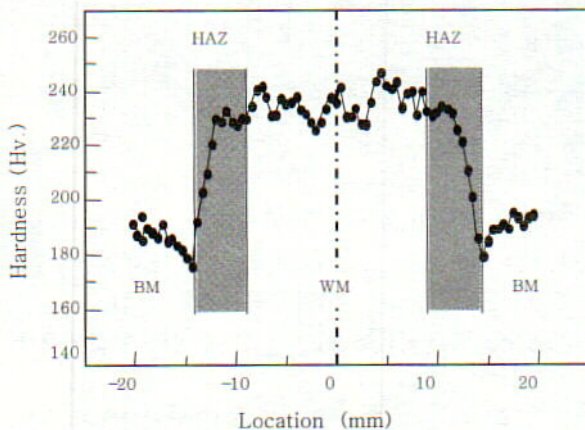


Fig. 4 Hardness distribution near the weld interface of TIG welded joints

3.2 기계적 특성

JLF-1의 모재와 용접부의 상온 및 고온에서의 인장시험 결과를 Fig. 5 ~ 7에 나타내었다.

Fig. 5는 하중속도 0.1mm/min에서의 JLF-1 모재와 용접부의 압연방향과 직각방향에 대한 상온에서의 응력과 크로스 헤드(cross-head) 변위와의 관계를 나타내었다. 압연방향 용접부(WL) 시험편의 최대인장강도(UTS)는 727 MPa로 가장 높은 값을 보였고, 총 연신율은 23.8%로 직각방향 용접부(WT)보다 높게 나타났다. 모재의 경우, 압연방향(ML) 시험편은 총 연신율 27.8%로 가장 높았으며, UTS는 630MPa로 WL보다 낮았지만 다른 재료들과 유사한 강도를 보였다. WT의 최대인장강도는 590 MPa, 0.2% offset 강도 445 MPa, 연신율 21%로 나타나 모재 및 용접부에 비해 WT의 강도 및 연신율이 가장 낮게 나타났으며 WT, 모재(ML, MT), WL의 순으로 강도가 증가함을 알 수 있었다. WT의 경우 항상 열영향부(HAZ)에서 파단되었으며, 이는 WT의 인장특성이 HAZ의 강도와 연신율에 의해 결정되는 것으로 생각된다. 하중속도를

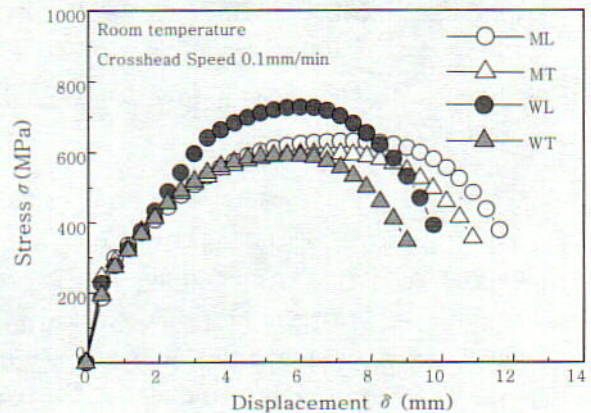


Fig. 5 Relationship between stress and displacement of JLF-1 at R.T.

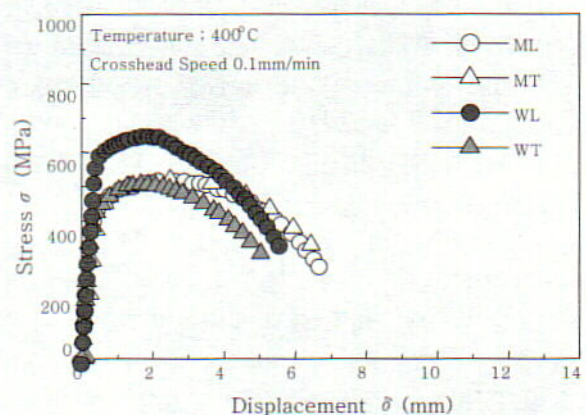


Fig. 6 Relationship between stress and displacement of JLF-1 at 400°C

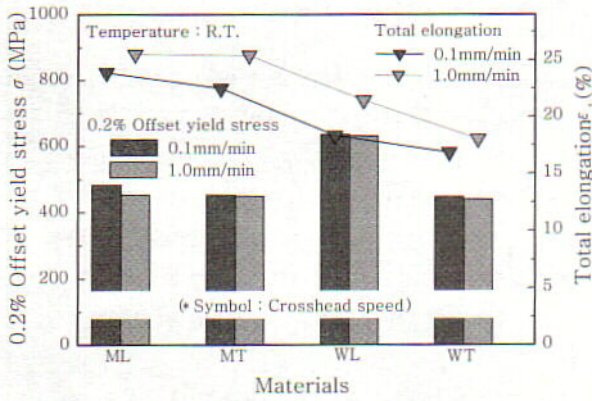


Fig. 7 0.2 % Offset stress and total elongation at room temperature

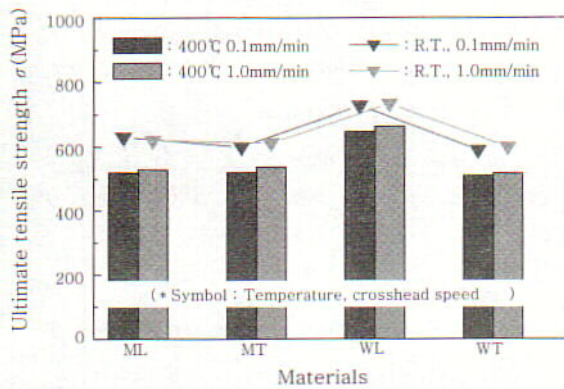
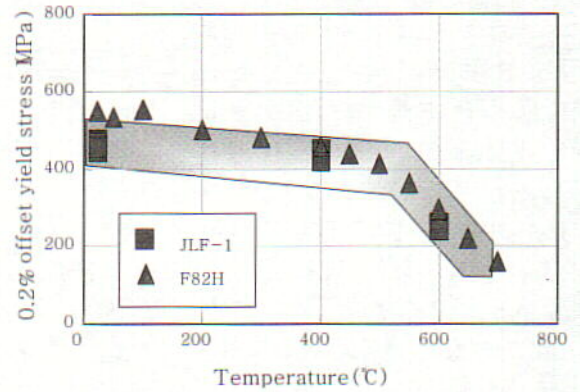


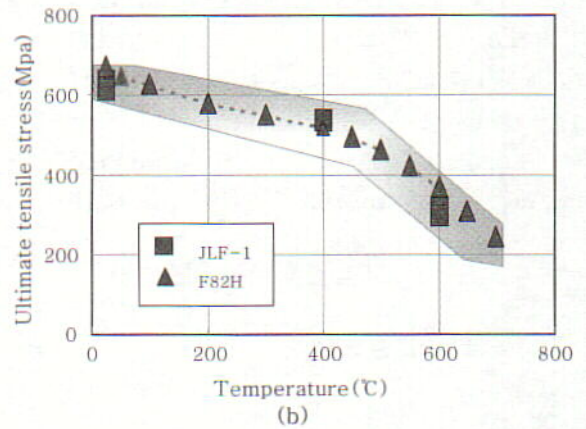
Fig. 8 Ultimate tensile stress at room temperature and 400°C

0.1mm/min으로 일정하게 제어한 고온(400 °C)에서의 모재와 용접부의 각 방향에 대한 응력과 cross-head 변위와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 고온에서 노내의 시험편의 변화량 측정의 어려움을 cross-head 변위 변화를 측정함으로써 상온과의 비교를 가능하게 하였다. Fig. 7과 8은 시험편 채취방향과 cross-head 속도가 미치는 영향을 고찰하기 위한 정량적 물성치를 비교한 것이다. 모재(MT, ML)와 용접부(WL, WT)의 인장강도는 상온에 비하여 크게 감소하지 않았지만, WL과 MT의 총 연신율은 각각 18.3%와 23.9%로 상당히 감소하였다. 즉, 크로스헤드(cross-head) 속도가 빠를수록 연신율(Fig. 7)은 증가하지만, 0.2% offset 항복강도(Fig. 7)와 최대인장강도(Fig. 8)는 cross-head 속도와 시험편 방향에 대한 영향을 거의 받지 않았다. WL 시험편은 ML 및 MT에 비해 높은 강도와 저하된 연신율을 나타내었다. cross-head 속도와 온도에 따른 최대인장강도를 나타낸 Fig. 8에서 400 °C의 모재와 용접부의 최대인장강도는 상온의 최대인장강도에 비해 다소 낮게 나타났으며, 이것은 일반적인 재료와 마찬가지로 온도의 영향에 의한 재료의 연화현상으로 생각된다.

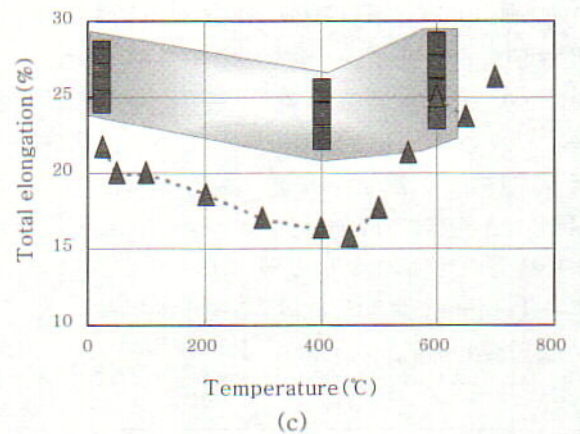
JLF-1과 F82H⁷⁾ 모재의 온도에 따른 인장시험 결



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Ultimate tensile stress at room temperature and 400°C

과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 온도에 대한 0.2% 항복강도를 나타낸 것이고, Fig. 9(b)는 최대인장강도에 대한 JLF-1과 F82H 강의 비교 결과이다. 또한, Fig. 9(c)는 연신율 결과이다. 최대인장강도와 항복강도는 F82H강과 거의 유사하며 연신율은 실온, 400°C, 600°C에서 F82H 강보다 향상되는 것으로 나타났다. 시험온도가 증가할수록 강도는 저하하는 반면, 400 °C 부근에서 연신율이 가장 낮게 나타났으며, 이는 철강이 특정 온도에서 나타내는 청열취성(blue brittleness)의 영향에 의한 것으로 사료된다.

3.6 파단면해석

연성파괴의 대표적 양상인 cup and cone 파괴가 모든 시험편에서 관찰되었다. Fig. 10 (a)는 용접부의 압연방향에 대한 상온 시험편의 미세조직 사진을 나타내고 있다. 모재 (Fig. 11 (a))와 비교하여 볼 때 더욱 큰 방사상의 의벽개파면이 두드러지게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 용착금속의 이질성과 TIG 용접에 의한 경화로 인해 경도의 증가와 함께 인장강도는 증가하지만 상대적인 낮은 연신율에 의한 것으로 400 °C에서의 동일 시험편 (Fig. 10 (b))의 경우 용접기공과 같은 큰 기공 등을 관찰할 수 있다. Fig. 10 (c)와 (d)는 용접재의 압연방향에 직각방향인 상온과 400 °C 시험편의 미세조직 사진을 나타내고 있다. 용접재의 압연방향의 시험편과 같이 상온에서는 방사상의 의벽개파면의 형상이 나타나며, 400 °C 시험편의 경우는 현저한 딴플 (dimple) 형상을 나타내고 있다. Fig. 11 (a)은 모재의 압연방향에 대한 상온 시험편의 미세조직 사진으로 개재물 주위의 약한 부분의 균열이 중심부 쪽으로 연결되면서 방사상의 의벽개파면이 현저하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나, Fig. 11 (b)의 400 °C 시험편의 파면은 입내파괴의 형태로써 현저한 딴플 형상을 볼 수 있다. 온도가 상승하여 의벽개파면 영역과 연성파괴 영역의 차이가 발생함에 따라 유동응력에 의한 연성파괴의 현상을 보이고 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

핵융합로용 수냉 블랭킷에 사용되는 저방사화 페라이트강 (JLF-1)을 TIG 용접한 후 모재와 용접재에 대한 상온 및 고온에서의 인장실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상온에서 최대인장강도는 용접부의 직각방향 시험편 (WT-588 MPa), 모재 (MT-600MPa, ML-630 MPa), 용접금속 (WL-727MPa)의 순으로 증가하였고, 연신율은 WT(21.7%), WL(23.8%), 모재 (ML-27.8%, MT-27.9%)의 순으로 증가하여 전반적으로 모재의 방향성 영향은 무시할 수 있었다. WL 용접부의 인장강도는 모재보다 13.3% 높고, 연신율은 14.4% 낮게 나타났다.

2) 400 °C에서 모재 (MT-519MPa, ML-519MPa)와 용접부 (WT-588MPa, WL-646MPa)의 최대인장강도와 항복강도는 상온에 비해 약간 낮게 나타났고, 600 °C에서는 급격히 저하했다.

3) 연성파괴의 대표적 양상인 컵앤콘 (cup and cone) 파괴가 모든 시험편에서 관찰되었으며, 고온 시험편의 파단면에서는 미소한 공동의 합체에 의한 딴플 (dimple) 파괴를 보였다. 그러나, 상온 시험편에서는 방사상의 패턴을 가지는 수 개의 예리한 균열을 형성하였다.

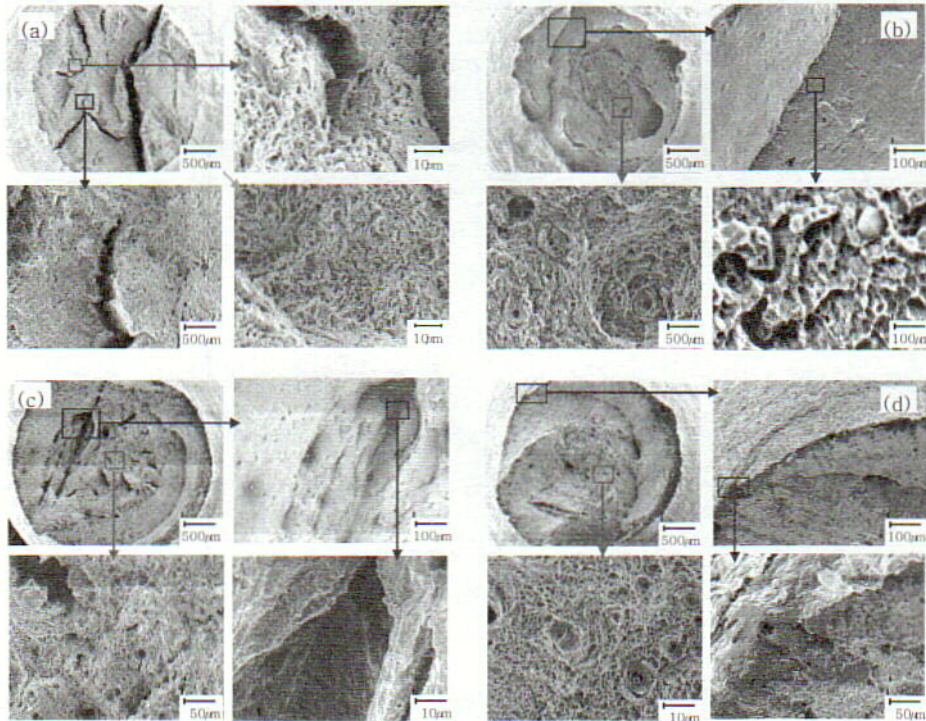


Fig. 10 Fracture surface of tensile test. (a) WL, R.T. (b) WL, 400 °C (c) WT, R.T. (d) WT, 400 °C

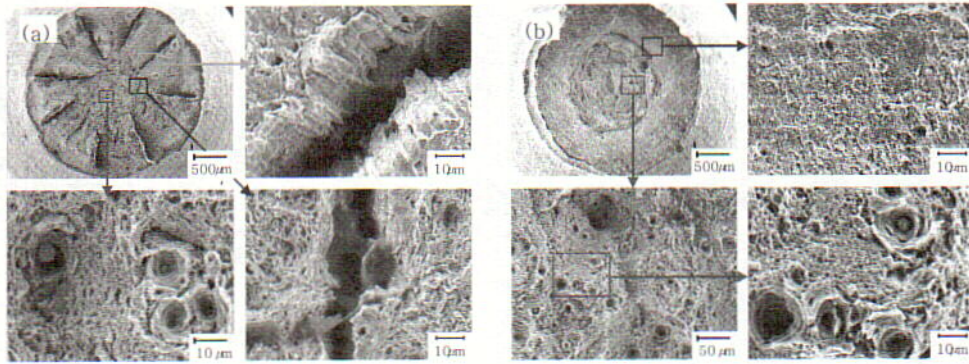


Fig. 11 Fracture surface of tensile test. (a): ML, R.T. and (b): ML, 400 °C

후 기

본 연구는 BK21 과 Japan-Korea Core Univ. Program (FY2001) 에 의한 Dongeui - Kyoto University 의 공동연구의 일부이며, 관계자들에게 감사드립니다

참 고 문 헌

1. J.W. Davis, and D.J. Michel : Proceeding of Topical Conference on Ferritic Alloys for use in Nuclear Energy Technologies, eds. (TMS-AIME, Snowbird, Utah)
2. R.L. Klueh, K.S. Gelles, M. Okada and N.H. Packan : Reduced Activation Materials for Fusion Reactors, ASTM-STP, 1047
3. A. Kohyama, Y. Kohno, K. Asakura, H. Kauano : R & D of Low Activation Ferritic Steels Fusion in Japanese Universities, Journal of Nuclear Materials **212-215** (1994), 684-689
4. K. Asakura, et al. : Mechanical Properties and Microstructure Changes of Low Activation 3Cr-2W-V-Ti Ferritic Steels Developed for Nuclear Applications, ISIJ International, **30-11** (1990), 947-954
5. T. Hasegawa, Y. Tomita and A. Kohyama : 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, Journal of Nuclear Materials, **258-263** (1998), 1153-1157
6. A. Kohyama et al. : Effect of 14-MeV Neutron Irradiations on Mechanical Properties of Ferritic Steels, 13th International symposium (Part II), ASTM (1987), 111-122
7. K. Shiba, K. Hishinuma, A. Kohyama and K. Masamura: Properties of Low Activation Ferritic Steel F82H IEA Heat-Interim Report of IEA Round-robin Test(1), JAERI-Tech, **97-038** (1997), 55-57
8. K.S. Bang and S.W. Jung : Variation of Welded-Joint Tensile Strength of GMA Welded Accelerated-Cooled Steel, Journal of KWS **18-6** (2000), 83-88
9. I.H. Kwon, T. Hashida and S.H. Chung : Evaluation of Cryogenic Fracture Characteristics on TIG Weldments of Superconducting Magnets Structural Steel by Small Punch Testing Method, Journal of KWS **14-5** (1996), 122-133