

TIG 용접한 저방사화 페라이트강 (JLF-1) 의 고온강도 및 피로수명특성

윤한기[†] · 이상필^{*} · 김사웅^{**} · A. Kohyama^{***}
(2002년 9월 11일 접수, 2003년 7월 3일 심사완료)

High Temperature Tensile Strength and Fatigue Life Characteristics for Reduced Activation Ferritic Steel (JLF-1) by TIG Welding

Han-Ki Yoon, Sang-Pill Lee, Sa-Woong Kim and Akira Kohyama

Key Words: Reduced Activation Ferritic Steel (저방사화 페라이트강), TIG Welding (TIG 용접),
High Temperature Strength (고온강도), High Temperature Fatigue Life (고온피로수명)

Abstract

The fatigue life and tensile strength of JLF-1 steel (Fe-9Cr-2W-V-Ta) and its TIG weldment were investigated at the room temperature and 400 °C. Four kinds of test specimens, which associated with the rolling direction and the TIG welding direction were machined. The base metal of JLF-1 steel represented almost anisotropy in the tensile properties for the rolling direction. And the base metal of JLF-1 steel showed lower strength than that of TIG weldment. Also, the strength of all materials entirely decreased in accordance with elevating test temperature. Moreover, the fatigue limit of weld metal was largely increase than that of base metal at both temperatures. The fatigue limit of JLF-1 steel decreased in accordance with elevating test temperature. The SEM fractography of tensile test specimen showed conspicuous cleavage fracture of a radial shape. In case of fatigue life test specimen, there were so many striations at crack initiation region, and dimple was observed at final fracture region as a ductile fracture mode.

1. 서 론

고효율 에너지의 대량생산을 추구하는 핵융합 에너지 산업분야에서는 에너지의 생성 및 변환의 고효율화·고성능화뿐만 아니라 에너지 생산시스템에 필요한 에너지 구조 재료의 개발을 급속히 추진하고 있다. 핵융합로의 블랑켓 구조재료로는 냉각제의 종류에 따라 저방사화 철강재료, 바나듐합금 및 SiC/SiC 복합재료가 거론되고 있다. 특

히, 오스테나이트계 스테인레스강 및 산화물 분산 강화 (ODS) 강과 함께 핵융합로 구조재로서 고려되고있는 저방사화 페라이트강은 오스테나이트강에 비해 열팽창계수가 낮고, 열전도도가 우수하여 핵융합로 구조재로서 적합한 것으로 평가되고 있으며, 일본원자력연구소에서 개발한 F82H 강과 일미대학간 연합에서 개발한 JLF-1 강을 대상으로 하여 재료개발 및 분석이 진행되고 있다.^(1,2) Cr-Mo 내열강을 기본으로 합금 설계된 저방사화 페라이트강은 블랑켓 또는 제1벽 (First wall) 등의 핵융합로 구조재로 사용하기에 적합하도록 기계적 성질과 방사능 등의 성질을 개선한 재료이다.⁽³⁾ 특히 Asakura⁽⁴⁾ 등은 Cr-Mo 내 열강의 구성 성분 중 Mo를 W, V, Ti로 대체하여 W의 고용강화와 석출경화효과 및 V과 Ti의 석출경화효과를 이용함으로써 고온인장강도와 크리프강도

† 책임저자, 회원, 동의대학교 기계공학과

E-mail : hkyoon@dongeui.ac.kr

TEL : (051)890-1642 FAX : (051)890-2231

* 회원, 동의대학교 기계공학과

** 회원, 동의대학교 대학원 기계공학과

*** 교토대 에너지공학연구소

를 개선할 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서 사용한 저방사화 페라이트 강은 오스테나이트계 (SUS 304 or 316) 보다 600 °C 이하 에서 우수한 고온강도를 유지하도록 9~12 wt % Cr 을 첨가한 핵융합로용 구조재로서 A. Kohyama 와 T. Hasegawa 등에 의해 개발되어 JLF (Japanese Low Activation Ferritic Steel) 로 명명되고 있다.^(3,5) JLF-1 저방사화 페라이트 강은 기본 조성이 Fe - 0.1C - XCr - 2W - 0.2V - 0.07Ta - 0.05N 으로서 냉각재로서 초임계수 (Super critical water) 를 고려하는 경우 핵융합로의 블랭킷 재료로서 기대되고 있는 재료이다. JLF-1 강 의 조사취화에 의한 조직의 미시적인 연구와 기계적 특성은 A. Kohyama 등에 의해 수행되어 왔다.⁽⁶⁾ 또한, 핵융합로는 제작시 용접공정을 필수적으로 동반하므로 EB 용접 및 TIG 용접에 대한 연구가 진행되어 용접부의 성질을 평가하는 것이 중요한 사안으로 거론되고 있다.

본 연구에서는 JLF-1 강을 핵융합로용 블랭킷과 제일벽의 구조재로 사용하기 위한 설계자료로의 활용을 목적으로 하여 TIG 용접 공정으로 제조한 JLF-1 강 의 모재와 용접부의 방향성에 대해서 상온 및 400 °C 에서의 인장시험과 피로수명시험을 실시하여 인장특성과 피로수명특성을 평가하였다. 특히, 모재와 용접부의 용접방향과 온도의 영향은 N. Inoue 와 T. Muroga 의 기준에 의해 조사하였다.^(7,8)

2. 실험

실험재료는 25 mm 두께로 압연한 JLF-1 저방사화 페라이트강을 U 홈 가공한 후 TIG 공정에 의해 맞대기 용접하여 제작하였으며, 용접홈의 형상은 Fig. 1 과 같으며, 용접조건은 Table 1 에 나타내었다.⁽⁹⁾ TIG 용접시 사용한 용가제의 직경은 1.2 mm 이며 JLF-1 모재, 용접금속 및 용가제의 화학 조성은 Table 2 에 나타내었다. 모재는 1050 °C 에서 1 시간 동안 노탈라이징 후 780 °C 에서 1 시간 동안 템퍼링 처리를 하였으며, 용접후열처리 (PWHT) 는 740 °C 에서 3 시간 동안 노냉하였다.⁽⁹⁾ Fig. 2 는 TIG 용접 후 JLF-1 강 관계의 경도분포를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 용접부가 가장 높은 경도값을 가지며 열영향부와 모재의 경계면에서 가장 낮은 경도분포를 나타내고 있다.



Fig. 1 U-groove shape and microstructure

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

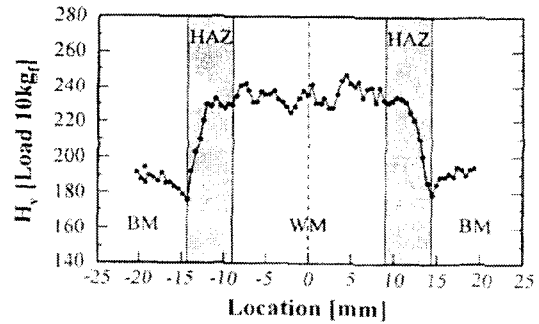
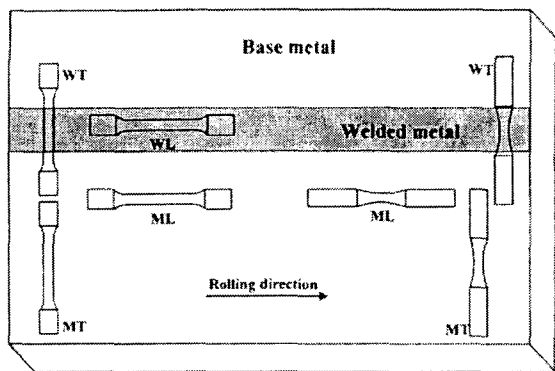


Fig. 2 Hardness distribution after TIG welding

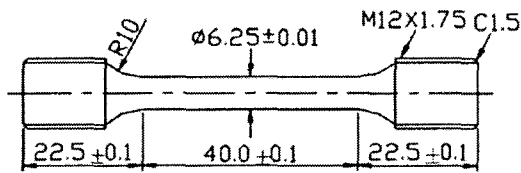
Fig. 3 은 용접부편의 압연방향과 용접방향으로부터 채취한 인장시험편과 피로수명시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 압연방향 재료, 압연방향에 수직인 방향의 재료, 용접방향, 용접방향에 수직인 재료를 각각 ML, MT, WL, WT 로 이하에서 정의한다. 인장시험과 피로수명시험은 상온과 400 °C 에서 수행하여 모재와 용접부의 방향성과 온도에 따른 특성을 조사하였다.^(7,8) 인장 실험은 최대하중 10 ton 의 동적 유압 피로시험기 (MTS Model 810) 를 사용하여 크로스헤드 (Cross head) 속도 0.1 및 1.0 mm/min 에서 일정하게 제어하여 수행하였으며 피로수명실험은 응력비를 0.7 주파수는 15 Hz 로 사인파형의 반복하중을 사용하였다. 400 °C 에서의 인장 및 피로수명실험을 위해서는 전기로내에 시험편을 위치시킨 후 시험편 주위에 Chromel - Alumel 열전대를 부착하여 ± 1 °C 의 온도오차범위에서 제어하였다.

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

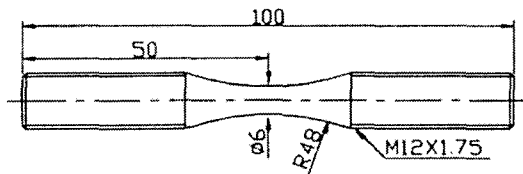
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	W	V	Ta	N	Ti	B
Base metal	0.10	0.05	0.45	0.003	0.002	0.003	8.85	1.99	0.20	0.080	0.0231	--	0.0002
Weld metal	0.061	0.13	0.43	0.005	0.003	0.003	9.16	1.91	0.25	0.081	0.0259	0.019	0.0001
Filler wire	0.061	0.10	0.45	0.003	0.003	0.003	8.96	1.82	0.25	0.084	0.0332	0.028	0.0001



(a) Welded coupon



(b) Tensile specimen



(c) Fatigue life specimen

Fig.3 Dimension and shape of tensile and fatigue life specimen

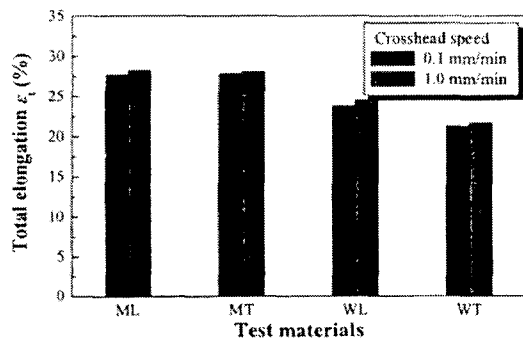
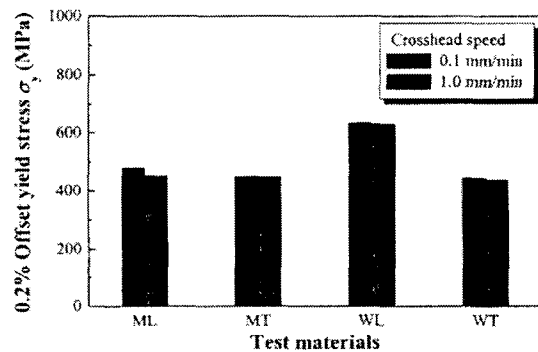
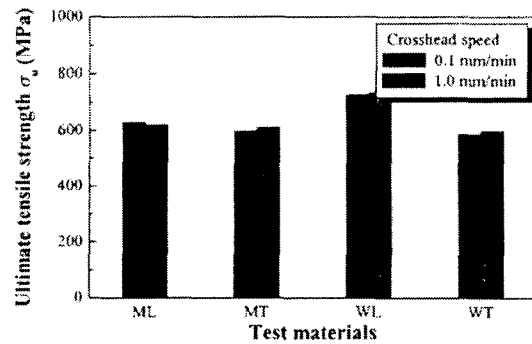


Fig. 4 Room temperature tensile properties of JLF-1 and its TIG weldment tested at different crosshead speed

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장특성

Fig. 4는 크로스헤드 속도의 변화에 따른 JLF-1강과 TIG 용접재의 상온에서의 인장특성을 나타낸 것이다. JLF-1과 TIG 용접재는 압연방향과 용접방향에 대해 서로 다른 인장특성을 나타내지만 크로스헤드 속도가 증가함에 따라 균일한 인장특

성을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 0.1 mm/min의 크로스헤드 속도로 시험한 인장시험의 결과에 따르면 용접재 (WL)는 최대인장강도 730 MPa, 항복강도 630 MPa, 연신율 24%를 나타내었으며, JLF-1 모재 (ML)는 최대인장강도 630 MPa, 항복

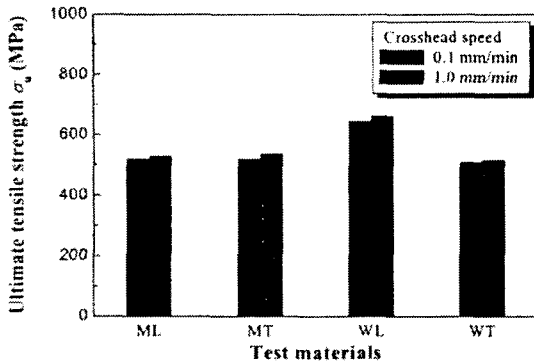


Fig. 5 Ultimate tensile strength of JLF-1 and its TIG weldment tested at 400 °C

강도 420MPa, 연신율 28%를 나타내었다. 이처럼, JLF-1 모재 (ML)는 용접재 (WL)에 비해 연신율은 증가하지만 강도가 저하하는 현상을 나타내었다. 또한, TIG 용접방향에 대해 직각방향으로 채취한 용접부재 (WT)는 최대인장강도 590 MPa, 항복강도 445 MPa, 연신율 21%를 나타내었으며, JLF-1 모재 (ML)와 용접재 (WL)에 비해 강도와 연신율이 저하하는 현상을 나타내었다. 이런 현상을 나타내는 것은 용접부재 (WT)에는 열영향부 (Heat Affected Zone; HAZ)가 존재하므로 열영향부의 인장과괴 형상으로부터 열영향부에서 응력집중이 발생하여 강도와 연신율이 다소 감소한 것으로 사료된다. 이와 같이 상온에서 JLF-1 강의 인장특성의 경우, 강도는 열영향부, 모재, 용접금속의 순으로 증가하였으며, 연신율은 열영향부, 용접금속, 모재의 순으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 JLF-1강과 TIG 용접재의 인장특성을 400 °C에서 평가하여 최대인장강도를 나타낸 것이다. 크로스헤드 속도는 상온에서와 같이 0.1 및 1.0 mm/min으로 하였다. Fig. 4의 결과로부터 JLF-1과 TIG 용접재의 최대인장강도는 시험온도가 상승함에 따라 감소하지만 400 °C에서의 인장강도는 상온에서와 같이 크로스헤드 속도에 대한 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 또한, 시험온도 400 °C에서의 인장강도는 용접재 (WL)가 가장 높게 나타나고 압연방향과 용접방향에 따라 다르지만 각 재료의 강도분포 상태는 상온인장특성과 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다.

3.2 피로수명특성

Fig. 6은 JLF-1강과 TIG 용접재의 압연방향과

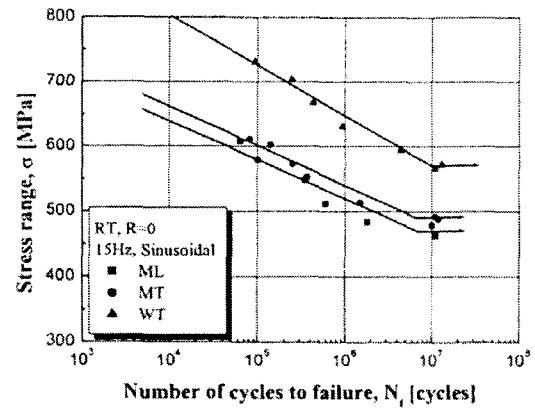


Fig. 6 S-N curves of ML, MT and WT for JLF-1 steel at room temperature

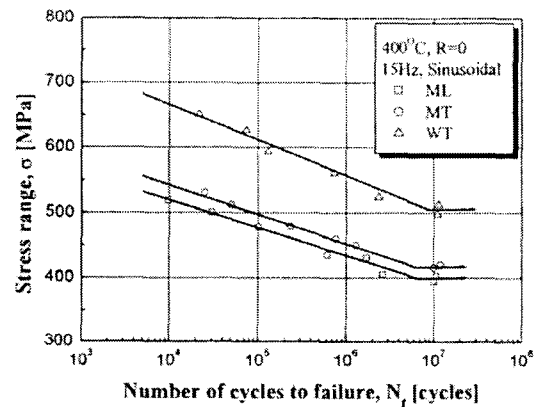


Fig. 7 S-N curves of ML, MT and WT for JLF-1 steel at 400 °C

용접방향에 대한 상온에서의 피로수명특성을 나타낸다. 용접부재 (WT)의 피로수명이 모재의 압연방향 (ML)과 압연방향에 수직인 방향 (MT)에 비해 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 3×10^5 사이클의 범위에서 WT 재료의 작용응력은 690 MPa로서 ML 재료의 550 MPa, MT 재료의 570 MPa에 비해 각각 20.3%, 17.4% 정도 크게 나타났다. 또한 10^7 사이클에서는, 용접부재 (WT)가 가장 우수한 피로한도 (570 MPa)를 나타내었으며 ML 재료와 MT 재료는 각각 WT 재료의 피로한도의 17.4%와 13.7%에 해당하는 471 MPa과 492 MPa을 나타내었다. 이와같이, 전체적으로 고응력 범위와 저응력 범위에서 용접부재와 모재의 피로수명의 차이는 크게 나타났으며, 모재에서의 방향성에 대한 영향은 그다지 존재하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 JLF-1강과 TIG 용접재의 압연방향과

용접방향에 대한 400 °C 에서의 피로수명특성을 나타낸다. 10⁷ 사이클에서 WT 재료의 작용응력은 503 MPa로서 ML 재료의 400 MPa, MT 재료의 420 MPa에 비해 각각 20.4%, 16.5% 정도 크게 나타났다. 이와같이, 400 °C 에서도 상온에서와 마찬가지로 이 모재의 압연방향(ML)과 압연방향에 수직한 방향(MT)의 피로수명에 비해 용접부재(WT)의 피로수명이 현저히 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

또한 Fig. 6 과 Fig. 7 을 비교해 볼 때, ML 재료의 피로한도 응력은 상온에서보다 15.1% 정도 감소하였으며 MT 재료와 WT 재료는 각각 14.6%, 11.8% 정도 감소하였다. 이와같이, JLF-1의 피로수명에 미치는 온도의 영향은 전체적으로 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있었다.

3.3 파면해석

Fig. 8 은 JLF-1 강(ML)과 TIG 용접재(WL)의

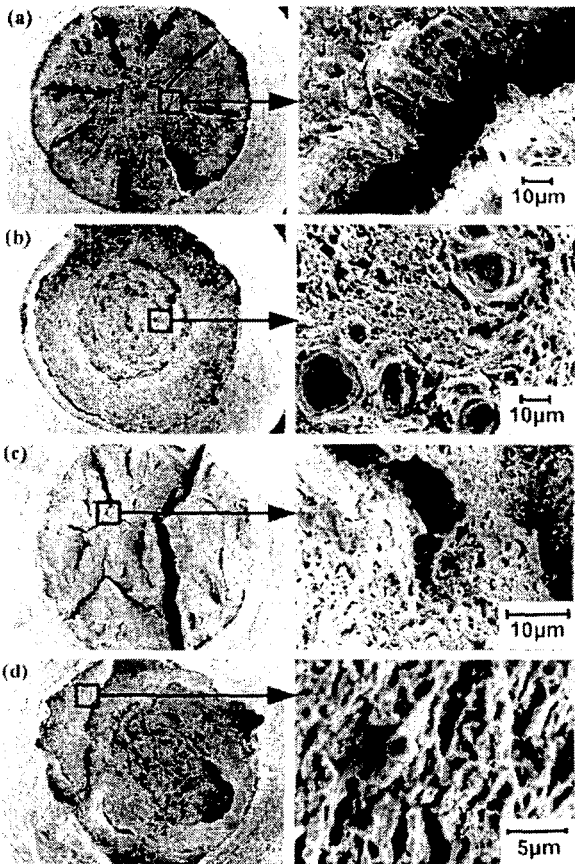


Fig. 8 SEM fracture surface of tensile test;
 (a) ML, R.T (b) ML, 400 °C
 (c) WL, R.T (d) WL, 400 °C

상온 및 400 °C 에서의 인장 시험편의 미세조직 사진을 나타내고 있다. JLF-1 강 모재의 상온 시험편인 (a)의 경우 계재물 주위의 약한 부분의 균열이 중심부 쪽으로 연결되면서 방사상의 벽개 파면이 현저하게 나타났다. 그러나, JLF-1 강 모재의 400 °C 시험편인 (b)에서 나타난 시험편의 파면은 입내파괴의 형태로써 현저한 딴플(dimple) 형상을 볼 수 있다. 온도가 상승하여 벽개파괴의 영역과 연성파괴의 영역의 차이가 발생함에 따라 유동응력에 의한 연성파괴의 현상을 나타내는 것으로 사료된다. 또한, TIG 용접재(WL)의 상온 시험편인 (c)의 경우 모재와 비교하여 볼 때 더욱 큰 방사상의 벽개파면을 두드러지게 나타내고 있다. 용접재(WL)의 400 °C 시험편인 (d)의 경우 용접 기공과 같은 큰 기공 등을 관찰할 수 있다. 이러한 현상들로인하여 TIG 용접재의 경도와 인장강도는 증가하지만 연신율은 감소하는 것으로 사료된다.

Fig. 9 는 JLF-1 강(ML)과 TIG 용접부재(WT)의 상온 및 400 °C 에서의 피로수명 시험편의 파면을 나타낸 것이다. JLF-1 강의 상온 시험편인 (a)의 경우 초기에 스트라이에이션(striation) 간격이 약 0.1 µm 정도 크기를 가지고 있으며, 최종파단부에서는 전형적인 연성파괴인 딴플(dimple) 형상이 나타났다. TIG 용접부재(WT)의 상온 시험편

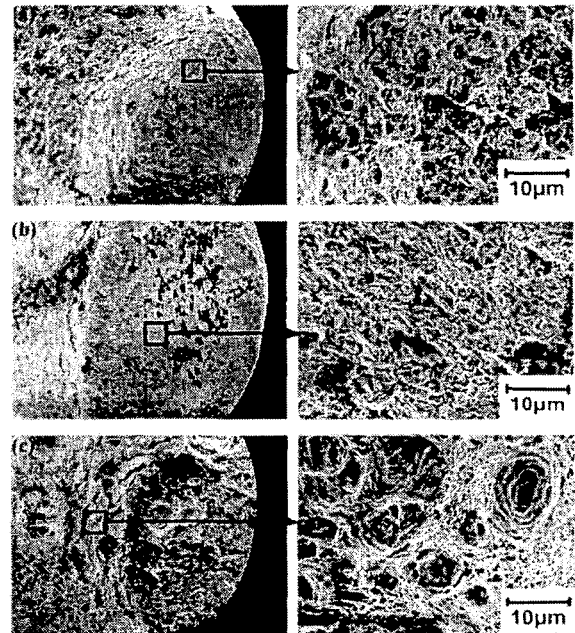


Fig. 9 SEM fracture surface of fatigue life test:
 (a) ML, R.T (b) WT, R.T (c) WT, 400 °C

인 (b)의 경우 파단면의 형태는 모재에 비해 스트라이에이션 간격이 약간 적게 나타났다. 이러한 현상이 피로수명을 증가시키는 전형적인 모델로 생각된다. 따라서, 전형적인 연성파괴가 취성파괴거동으로 천이 됨을 알 수 있다. 그러나, 용접부재 (WT)의 400 °C 시험편인 (c)의 경우, 스트라이에이션 간격이 0.5 μm 정도로 증가되었으며, 급속파단 후에는 딥플파괴가 지배적이었다. 이로 인하여 400 °C에서 용접부재 (WT)의 피로수명이 상온에 비해 감소되었다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

핵융합로용 블랭킷 구조재로 각광받고 있는 저방사화 페라이트강 (JLF-1)의 인장과 피로수명실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상온에서 JLF-1강의 인장강도는 열영향부, 모재, 용접재의 순으로 증가하였으며 연신율은 열영향부, 용접재, 모재의 순으로 증가하였다. 또한, 400 °C의 시험온도에서는 용접재, 열영향부, 모재 모두 상온에 비해 강도가 저하하였으며, 용접재의 강도가 모재 및 열영향부에 비해 가장 크게 나타났다.

(2) 10⁷ 사이클에서 용접재의 피로강도는 모재에 비해 상온과 400 °C에서 모두 현저히 높게 나타났으며, 용접재의 높은 강도와 경도, 낮은 연신율에 기인한 결과로 사료된다. 또한, 400 °C에서 JLF-1강의 피로강도는 강도의 증가와 연신율의 감소로 인하여 전체적으로 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

(3) 인장파면의 경우 온도의 증가와 함께 입내파괴의 전형적인 형태인 딥플 (dimple)이 현저하게 나타났다. 또한, 용접재 (WL)는 용접에 의한 정화로 인하여 더욱 큰 방사상의 벽면파면이 나타났다.

(4) 피로수명 파면의 경우 용접재 (WT)는 전형적인 취성파괴로의 천이가 나타났으며, 온도의 증가에 따라 스트라이에이션 간격이 증가되었으며, 급속파단 후 딥플 (dimple)파괴가 지배적이었다.

후 기

이 연구는 Japan-Korea Core University Program

(FY2000)에 의한 Dongeui University (BK21) - Kyoto University의 공동연구의 일부이며 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Davis, J.W. and Michel, D.J., *Proceeding of Topical Conference on Ferritic Alloys for use in Nuclear Energy Technologies*, eds. (TMS-AIME, Snowbird, Utah)
- (2) Klueh, R.L., Gelles, K.S., Okada, M. and Packan, N.H., "Reduced Activation Materials for Fusion Reactors," ASTM-STP, 1047.
- (3) Kohyama, A., Kohno, Y., Asakura, K. and Kauano, H., 1994, "R&D of Low Activation Ferritic Steels Fusion in Japanese Universities," *Journal of Nuclear Materials* Vol. 212~215, pp. 684~689.
- (4) Asakura, K., et al., 1990, "Mechanical Properties and Microstructure Changes of Low Activation 3Cr-2W-V-Ti Ferritic Steels Developed for Nuclear Applications," *ISIJ International*, Vol. 30~11, pp. 947~954.
- (5) 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," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 258~263, pp. 1153~1157.
- (6) Kohno, Y., Kohyama, A., Hirose, T., Hamilton, M.L. and Narui, M., 1999, "Mechanical Property Changes of Low Activation Ferritic/Martensitic Steels After Neutron Irradiation," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 271~272, pp. 145~150.
- (7) Inoue, N., Muroga, T., Nishimura, A., Nagasaka, T., Motojima, O., Uchida, S., Yabe, H., Oguri, K., Katoh, Y. and Kohyama, A., 2000, "Characterization of Low Activation Ferritic Steel (JLF-1) Weld Joint by Simulated Heat-treatments," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 283~287, pp. 1187~1191.
- (8) Inoue, N., Muroga, T., Nishimura, A. and Motojima, O., 1998, "Correlation Between

- Microstructure and Hardness of a Low Activation Ferritic Steel (JLF-1) Weld Joint," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 258~263, pp. 1248~1252.
- (9) Kohyama, A., Kohno, Y., Kuroda, M., Kimura, A. and Wan, F., 1998, "Production of Low Activation Steel; JLF-1, Large Heats - Current Status and Future Plan," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 258~263, pp. 1319~1323.
- (10) Nishimura, A., Nagasaka, T., Inoue, N., Muroga, T. and Namba, C., 2000, "Low Cycle Fatigue Properties of a Low Activation Ferritic Steel (JLF-1) at Room Temperature," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 283~287, pp. 677~680.
- (11) Yoon, H.K., Lee, S.P., Min, B.H., Kim, S.W., Katoh, Y. and Kohyama, A., 2002, "Fatigue Life and Fatigue Crack Propagation Behavior of JLF-1 Steel," *Journal of Fusion Engineering and Design*, Vol. 61~62, pp. 677~682.
- (12) Yoon, H.K., Lee, S.P., Kim, S.W., Park, W.J. and Kohyama, A., 2001, "High Fatigue Life and Tensile Strength Characteristics of Low Activation Ferritic Steel (JLF-1) by TIG Welding," *KSME spring annual A*, pp. 181~186.
- (13) Kim, H.S., 2001, "The Evaluation of Mechanical Properties and Fatigue Life for Domestic 304 Stainless Steel Used as Membrane Material in LNG Storage Tank," *Journal of KSME A*, Vol. 25, 10, pp. 1644~1650.