

핵융합로 블랭킷용 저방사화 철강재료 TIG 용접부의 강도특성

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

윤한기*, 이상필*, 공유식**, 김사웅***, A. Kohyama****

* 동의대학교 기계공학과

** 동의대학교 산업기술개발연구소

*** 동의대학교 대학원 기계공학과

**** 교토대 에너지 이공학연구소

1. 서 론

핵융합로 구조재로 고려되고 있는 저방사화 페라이트강은 오스테나이트강에 비해 열팽창계수가 낮고, 열전도도가 우수하여 핵융합로 블랭킷과 같은 구조재로서 적합한 것으로 평가되고 있다. 저방사화 페라이트강은 Cr-Mo 내열강을 기본으로 합금 설계되어 Mo를 W와 V으로 대체하여 핵융합로 구조재로서 사용하기에 적합하도록 기계적 성질과 방사능 등의 성질을 개선한 재료이다. 특히, 내열 Cr-Mo 강에서 Mo를 W, V, Ti으로 대체하여 고온인장강도, 크리프 강도 등이 향상된다는 보고가 있으며, W은 고용강화 및 석출경과 효과를 V과 Ti은 석출강화 효과를 부여하여 Cr-Mo 강에 비하여 개선된 기계적 성질을 얻는 것으로 알려져 있다.

한편, Fe-Cr-W 형의 저방사화 페라이트 강 계열은 600 °C 이하 온도에서의 고온강도가 오스테나이트계 (STS 304, 316) 에 비해 우수하게 되기 위해서 9~12 wt% Cr을 함유한 페라이트강이며, 일미간의 연구협력사업을 통하여 Kohyama와 Hasegawa 등이 개발하였으며, 이러한 일련의 페라이트강 시리즈를 JLF (Japanese Low Activation Ferritic Steel) 라 칭하고 있다.

본 연구에서는 블랭킷과 제1벽의 구조재로 사용하기 위하여 제작시 용접공정이 필수적인 JLF-1 페라이트강을 TIG 용접하여 용접부와 모재의 방향성에 대해서 상온 및 시험온도 400 °C에서의 인장 시험을 실시하였으며, 파단면의 형상을 해석하였다. 이들 실험결과는 핵융합로용 블랭킷과 제1벽의 구조재료로 사용하기 위한 기초적 설계자료로 그 기여도가 클 것으로 전망된다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

25 mm 두께의 JLF-1 (Fe-9Cr-2W-0.2V-Ta) 저방사화 페라이트강을 U 홈 가공한 후 TIG 공정에 의해 맞대기 용접하였다. 이때 용접홈의 형상은 Fig. 1 과 같으며, 용접조건은 Table 1 에 나타내었다. TIG 용접시 사용한 용가재의 직경은 1.2 mm 이며 용접금속, 용가재 및 JLF-1 모재의 화학 조성은 Table 2 에 정리하였다. 용접한 쿠폰은 1050 °C 에서 1 시간 동안 노말라이징 후 780 °C 에서 1 시간 동안 템퍼링 하였다. 용접 쿠폰으로부터 모재와 용접재의 압연방향에 대한 수평방향 (ML), 직각방향 (MT) 에 해당하는 인장시편을 채취하였으며 인장시편의 형상과 치수는 ASTM 규격에 따랐다.

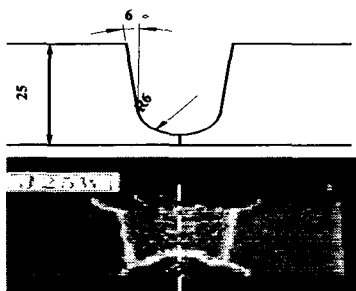


Fig. 1 U-groove shape and micro-structure

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

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

	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 metal	0.061	0.10	0.45	0.003	0.003	0.003	8.96	1.82	0.25	0.084	0.0332	0.028	0.00

2.2 실험방법

수냉 블랭킷의 실제 적용온도에서의 실험으로 재료의 온도의 영향을 고찰하기 위하여 실험온도는 상온 및 400 °C 에서 각각 인장시험을 수행하였다. 그리고 모재와 용접부의 방향성(L-T)을 조사하였다. 인장시험은 최대하중 10 ton 의 동적유압 피로시험기(MTS Model 810)를 사용하였고, 하중속도는 0.1 과 1.0 mm/min 에서 일정하게 제어하여 수행하였다. 400 °C에서의 인장을 위해서는 전기로 내에 시험편을 위치시킨 후 시험편 주위에 Chromel - Alumel 열전대를 부착하여 ±1 °C 의 오차범위 내에서 제어하였다. 또한, 파단면의 고찰을 위하여 인장후의 각각의 조건들의 시험편을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy; SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경도특성

Fig. 2 는 Table 1 의 조건에서 TIG 용접한 시험편(WT)의 경도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 모재에 비해 용접금속에서 경도치가 아주 높게 나타났다. 구체적으로 보면 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 인하여 경도치가 증가한 것으로 생각된다. 또한, 열영향부(HAZ)와 모재부인 14 mm 위치에서 인장과단이 되었는데, 이 부분이 바로 hardness-valley 이다. 이러한 경도의 valley 는 후열처리로서 보다 완화시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 인장특성

고온에서 노내의 시험편의 변화량 측정의 어려움을 cross-head 변위의 변화를 측정함으로써 상온과의 비교를 가능하게 하였다. Fig. 3 은 압연방향과 직각방향에 대한 모재 및 용접재의 시험편에서 얻은 최대인장강도에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 시험편의 채취방향과 크로스

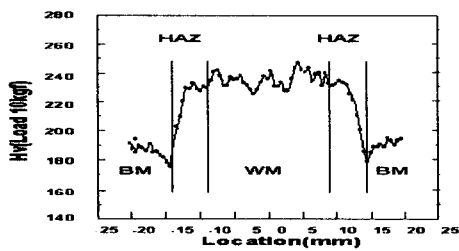


Fig. 2 Hardness distribution near the weld interface of TIG welded joints

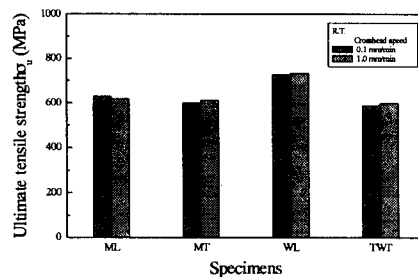


Fig. 3 Ultimate tensile strength at RT

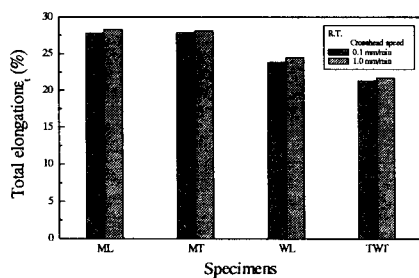


Fig. 4 Total elongation at R.T

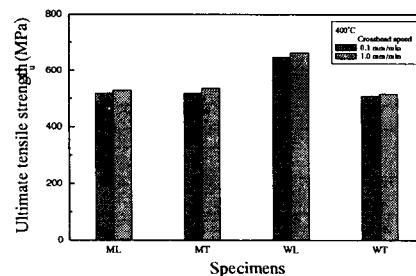


Fig. 5 Ultimate tensile strength at 400°C

헤드속도와는 거의 영향이 없었다. 단지, 용접재의 압연방향이 다른 조건에 비해 가장 높게 나타났다. 이는 용접에 의한 용접부의 경화처리 효과로 인하여 항복강도가 다소 높게 나타나는 것으로 생각되며, Fig. 4의 각 시험편의 채취방향에 따른 상온에서의 모재 및 용접재의 연신율을 나타내는 그래프와 연계하여 알 수 있듯이, WL 재는 최대인장강도 (UTS) 730 MPa, 0.2% offset 강도 630 MPa, 연신율 24%로 ML 및 MT 재의 최대인장강도 630 MPa, 0.2% offset 강도 480 MPa, 연신율 28%에 비해 용접재가 높은 강도와 저하된 연신율을 보이고 있다. 한편, WT 재는 대부분 열영향부에서 파단되었다. 이는 WT 재의 인장특성이 열영향부의 강도와 연신율에 의해 결정되는 것으로 보인다. 이 때 얻은 최대인장강도는 590 MPa, 0.2% offset 강도 445 MPa, 연신율 21%로 나타났으며, 모재 및 용접재에 비해 열영향부의 강도 및 연신율이 가장 낮게 나타났다. 따라서 열영향부, 모재, 용접금속의 순으로 강도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 400 °C에서의 최대인장강도를 나타내고 있다. Fig. 3과 비교하여 알 수 있듯이, 400 °C에서 모재, 열영향부, 용접금속의 최대인장강도는 상온의 최대인장강도에 비해 다소 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 일반적인 재료와 마찬가지로 온도의 영향에 의한 재료의 연화현상으로 생각된다.

3.3 파단면해석

Fig. 6은 용접재의 압연방향에 대한 상온 및 400 °C 시험편의 미세조직 사진을 나타내고 있다. 상온 시험편인 (a)에서는 게재물 주위의 약한 부분의 균열이 중심부 쪽으로 연결되면서 방사상의 벽개파면이 두드러지게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 TIG 용접에 의한 경화로 인해 경도의 증가와 함께 인장강도는 증가하지만 낮은 연신율을 나타내는데 기인하는 것으로 사료된다. 그러나 (b)에서 나타난 400 °C 시험편의 파면은 입내파괴의 형태로써 현저한 딴플 (dimple) 형상을 볼 수 있다. 온도가 상승하여 벽개파괴의 영역과 연성파괴의 영역의 차이가 발생함에 따라 유동응력에 의한 연성파괴의 현상을 보이고 있는 것으로 사료된다.

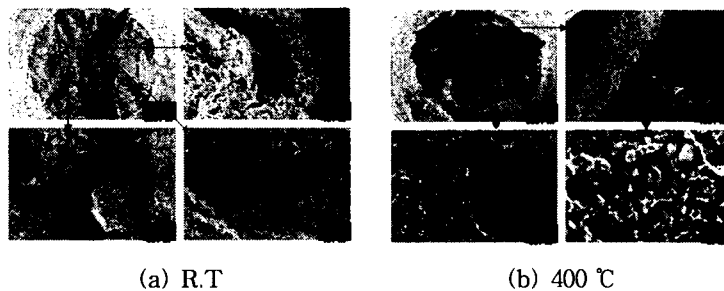


Fig. 6 Fracture surface of tensile test (WL at R.T and 400 °C)

4. 결 론

- 1) 상온에서 인장강도, 항복강도 및 연신율의 값은 시험편의 채취방향과 Cross-head의 속도에 대한 영향을 거의 받지 않았다. 또한, 상온에서 인장강도는 열영향부, 모재, 용접금속의 순으로 증가하였으며, 연신율은 열영향부, 용접금속, 모재의 순으로 증가하였다.
- 2) 400°C에서 모재, 열영향부, 용접금속의 최대인장강도는 상온의 최대인장강도에 비해 다소 낮게 나타났으며, 또한 모재 및 열영향부에 비해 용접금속의 강도가 최대였다.
- 3) 상온에서 용접재의 파단면은 재료내의 게재물에 의해 약화된 부분의 균열이 중심부 쪽으로 연결되면서 취성파괴의 전형적인 형태인 방사상의 벽개파면이 현저하게 나타났으며, 400°C에서는 유동응력에 의한 입내파괴의 형태로써 현저한 딴플 (dimple) 과 용접기공이 나타났다.

참고문헌

1. R.L. Klueh, K.S. Gelles, M. Okada and N.H. Packan : Reduced Activation Materials for Fusion Reactors, ASTM-STP, 1047
2. 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