2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

ABI 및 PCVN 소형시험편을 이용한 Linde 80 저인성 용접부의 파괴인성 Master Curve 특성평가

Fracture Toughness Master Curve Characterization of the Low Toughness Linde 80 Weld by Small ABI and PCVN Specimens

이봉상, 양원존, 홍준화

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

장창희, 홍승렬

한전전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

저인성 Linde 80 용접부의 조사전 파괴인성 천이특성을 고리 1 호기 원자로 압력용기 용접부 보존재를 이용하여 평가하였다. 파괴인성 시험편 (PCVN)을 ASTM 의 master curve 방법으로 시험하였으며, 비파괴적 ABI 시험결과는 당 연구실에서 최근 개발한 IEF 이론으로 해석하였다. 시험결과는 ABI 데이터 해석이론이 저인성 용접부에도 잘 적용이되는 것으로 나타났다. Linde 80 와 같은 저인성 용접부의 파괴인성 시험시 발견되는 특이현상에 대한 고찰을 하였다.

Abstract

Un-irradiated fracture toughness of the Kori-1 RPV Linde 80 weld was characterized by small specimens PCVN and ABI testing in the transition temperature region. The PCVN 3-point bend tests were carried out following the ASTM standard E1921-97 master curve method while the semi-empirical IEF (indentation energy to fracture) theory was used for ABI data analysis. The result from the ABI tests was comparable to that of the standard fracture toughness tests. The proposed methodology would be very useful to evaluate irradiation embrittlement of pressure vessel steels with a limited volume of irradiated materials. Some special features of the low toughness weld were also discussed.

1. 서론

원자로 압력용기의 Mn-Mo-Ni/Linde 80 submerged-arc 용접부는 중성자 조사취화에 매우 민감하여 원자력발전소의 건전성 확보 측면에서 가장 큰 관점이 되어왔다. 국내에서는 가장 오래된 고리 1 호기의 노심대 용접부(WF-233)가 이 재료군에 속해 있다. 원자로 압력용기의 건전성 (혹은 가동수명)을 결정짓는 두개의 기준은 첫째가 가동온도에서의 연성파괴저항성이 충분할 것, 둘째는 가열/냉각 혹은 비상냉각시에 급작스런 취성파괴의 위험이 없도록 연성-취성 천이온도가 낮을 것 등이다. 그 첫번째 기준은 한국원자력연구소가 1994 년도에 수행한 조사시험편의 고온 J-R 파괴역학 시험 및 해석을 통해 수명말기까지 충분한 안전여유가 있음을 확인한 바 있으며[1], 최근의 관심사는 주로 PTS 특성과 관련된 두번째 기준이다. 이는 미국을 비롯한 전세계 원자력국가에서도 동일한 추세이다.

발전소 가동전에 연성-취성 천이온도의 정의는 충격시험에 기초한 ASME Sec.III NB-2331 조항이 적용되고 있으나, Linde 80 와 같은 저인성 용접부의 경우에는 이 조항의 적용이 현실적으로 합당하지 않다는 지적이 많이 보고되고 있다[2]. 최근에 ASTM 에서는 연성-취성 천이온도 구역에서 비교적 소형시험편을 사용한 파괴인성 시험을 통해 기준특성온도를 확률-통계적으로 직접 구할 수 있는 master curve 방법을 제정하였다[3]. 또한 ASME Code 에서는 동 시험방법에 의한 기준특성온도를 압력용기의 건전성 평가에 적용하기 위한 Code Case N-629 를 제정하였다. 이때 감시시험 캡슐에 다수 포함되어 있는 Charpy 충격시험편은 피로균열만 생성하면(PCVN 시편) 상기의 시험방법에 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 이로부터 중성자 조사에 따른 파괴특성의 변화를 시험으로 직접 얻을 수도 있다. 이에 따라 선진 각국은 이미 보유하고 있는 파괴인성 데이터베이스 혹은 추가의 파괴인성시험을 통하여 PCVN 시편에 동 방법의 적용성을 평가하기 위한 노력을 기울이고 있으며, IAEA 및 PVRC (미국의 압력용기위원회)가 주관하는 국제 공동연구들에 한국원자력연구소가 참여하고 있다.

ABI (automated ball indentation) 시험은 소형 압입자를 이용하여 재료물성을 비파괴적으로 평가하기 위한 방법이며, 최근 우리 연구실에서 개발한 IEF (indentation energy to fracture) 이론을 적용할 경우 ASTM 의 파괴인성 master curve 방법에 의한 기준특성온도까지도 간접적으로 평가할 수 있다[4,5]. 향후 가동중인 원전의 조사취화 건전성 감시시험에 PCVN 소형 조사시편 파괴인성시험의 적용 가능성이 있으며, ABI 에 의한 준비파괴적 파괴인성 평가 방법은 보다 소량의 시료로서 보완/혹은 예비 시험이 가능하기 때문에 조사취화 특성평가 시험에 유용하게 적용이 될 수 있으리라 기대되고 있다.

본 연구에서는 원자로 압력용기 조사취화 문제에서 가장 관심이 되고 있는 고리 1 호기 Linde 80 용접부(WF-233)의 보존재를 이용하여 조사전 파괴인성 천이특성을 평가하고자 하였다. 보존재의 양이 극히 제한되어 있기 때문에 최근에 개발된 ASTM master curve 개념에 기초하여 PCVN 파괴인성 시험 및 ABI 시험 해석방법을 적용하였다.

2. 이론적 배경

(1) Ferritic 강의 파괴인성 연성-취성 천이특성 master curve, 기준특성온도 (T_o)

Wallin[6]은 천이온도구역에서 취성파괴거동이 3-parameter Weibull 통계학으로 잘 설명되는 확률적 거동을 보임을 발견하였으며, 이 확률이론에 근거할 경우 시편의 크기에 따라 다르게 측정되는 파괴인성 값들에 대한 보정도 가능하다. 다음은 ASTM 표준시험법[3]에서 채택하고 있는 파괴인성 측정값의 시편크기 영향에 대한 보정식이다.

$$K_{JC,1T} = K_{\min} + \left[K_{JC} - K_{\min}\right] \times \left(\frac{B}{B_{1T}}\right)^{\frac{1}{m}} \text{ ---------------------------------- (1)}$$

여기서 B 는 시험편의 두께, B_{1T} 는 기준이 되는 두께로서 1 인치(=25.4 ㎜)이며, K_{min} 은 20 MPa√m 로 정의되고, m 은 와이블 분포의 기울기로서 균열선단 응력장으로부터 유도된 이론적인 와이불계수는 4 이다[6]. MacCabe 등[7]은 천이온도구역에서의 수많은 파괴인성 시험결과들을 (1) 식을 사용하여 1T-CT 시험편 크기에 해당하는 값으로 변환할 경우 강종에 구분없이 파괴인성의 온도에 따른 변화율이 거의 일정함을 발견하고 이를 다음과 같은 master curve 로 명명하였다.

$$K_{JC,1T}(med.) = 30 + 70 \cdot \exp[0.019(T - T_O)] \quad MPa\sqrt{m} \text{ ------------- (2)}$$

여기서 T 는 시험온도이며 T_o 는 연성-취성 천이특성을 나타내는 기준온도로 재료특성값이다.

$$T_0 = T - \frac{1}{0.019}\ln\left[\frac{K_{JC,1T}(med.) - 30}{70}\right] \text{ ---------------------------------------(3)}$$

여기서 T_0 는 1T-CT 시편에서의 파괴인성값이 100 MPa√m 일 때의 온도를 의미한다. 따라서 특정시험온도에서 최소 6 개 이상의 유효한 파괴인성 data 를 포함하는 data set 를 통계처리하여 50% 발생확률값 K_{JC}(med)을 얻으면 (3)식으로부터 T_o 가 결정된다.

(2) 압입시험에 의한 파괴인성($K_{JC, Indentation}$)값 평가 IEF 이론

파괴인성 측정은 CT 시편과 같이 인위적 균열이 있는 시편을 이용해서 측정하는데, 외부하중을 가할 때 균열선단 앞에는 3 축 응력이 발생하여 국부적으로 주응력이 항복강도의 수 배까지 증가하여 파괴거동을 지배한다. ABI 시험과 같은 작은 볼에 의한 압입변형에서도 압흔하부에서는 3 축 응력상태가 되는데, ABAQUS 코드에 의한 탄소성 응력해석 결과에 따르면 압입변형에서의 3 축응력정도가 압입깊이에 따라 2.0 에서 3.2 까지이며, 균열선단에서의 3 축응력정도의 최저값이 1.9 (탄성해), 최대값이 3.2 (가공경화지수가 0.1 의 경우)로 거의 일치한다[4]. IEF 이론의 기본적인 개념은 작은 강구로 압입시 압흔하부의 3 축응력정도가 균열선단에서의 3 축응력도와 유사하다는 수치해석결과에 근거하여, 압입시 하중-변위곡선상에서 가상적인 파괴시까지의 에너지가 균열선단에서의 임계파괴에너지와 대응한다고 가정하는 것이다. 이때 가상의 파괴시점은 취성파괴가 발생하는 천이온도구역에서 온도에 따른 변화가 거의 없는 것으로 알려진 임계 파괴응력값을 기준으로 하여 결정된다. 상세한 전개는 문헌[4,5]을 참고하기 바라며, 약간의 수학적 처리를 통해 최종적으로 얻어지는 ABI 시험에서 예측되는 탄소성파괴인성 $K_{JC,indentation}$ 은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$K_{JC,Indentation} = \left[\frac{2E}{1-n^2}(W_0 + W_{IEF})\right]^{1/2} = \left[\frac{2E}{1-n^2}\left(W_0 + \frac{2A^2D^2}{p\,S}\left(\frac{p\,s_f}{4mA}\right)^{\frac{2m-2}{m-2}}\right)\right]^{1/2} \text{ -------- (4)}$$

(4) 식에서 E 와 ν는 각각 탄성계수 및 포와송비, D 는 압입볼의 직경이며, A, m, S, μ는 압입시험으로부터 결정되는 값들이다. 임계파괴응력 σ_f는 온도에 무관한 값으로 가정되는 재료의 특성값이므로 문헌자료로부터 유추하거나 한두개의 파괴인성 실험으로부터 결정할 수 있다. W_o는 이론적 최소파괴에너지 값으로 상수이다. 각 계수들의 상세한 정의는 참고문헌[4,5]을 참고하기 바란다.

3. 실험방법

연구에 사용된 재료는 Mn-Mo-Ni 계 원자로 압력용기강의 저인성 용접부로서 Linde 80 flux 를 사용하여 Submerged Arc Weld (SAW) 방법으로 용접한 것으로 고리 1 호기 노심대 용접부의 보존재이다. 화학조성은 Table 1 과 같으며, 용접 후 열처리는 607℃ /20.25h/노냉 이었다. 상온에서 인장 및 충격특성을 Table 2 에 정리하였다.

샤르피 시험편을 이용한 3 점 굽힘시험은 기계가공 후, 초기균열길이가 시편폭의 약 50%가 되도록 예비피로균열을 실온에서 생성시킨 다음 isopentane 을 냉매로 하여 -140~-40℃의 온도범위에서 온도당 1~2 회씩 실시하였으며, -90℃에서는 Weibull distribution 을 이용하여 T_0값을 결정하기 위해 7 회 실시 하였다.

압입시험 장치는 ATC 사의 500 lbf 용량의 PortFlow-P1 모델로서 장착된 압입자는 직경 0.508 ㎜인 WC 구형입자 이며, 저온조에서 액체질소를 주입하는 방법으로 시편의 온도를 설정온도의 ±0.5℃범위내에서 정확히 유지하였으며, 실험은 -180~-40℃에서 수행하였다. 압입속도는 0.0076 ㎜/sec 로 일정하게 유지하였으며, 이는 압입변형영역의 평균 변형율 속도가 통상적인 인장시험에서의 변형율 속도와 유사하게 되도록 조절한 것이다. 시험은 시험편을 macro-etching 을 한 후, 응고조직과 재결정조직에 대해서 일정온도에서 각각 2~3 회 실시하였으며, 특히 -90℃에서는 3 점 굽힘시험으로 얻은 파괴인성값과의 보다 정확한 비교를 위해 위치별로 7 회씩 실시 하였다.

4. 실험 결과

(1) PCVN 3 점 굽힘시험

Fig. 1 에는 PCVN 시편의 3 점 굽힘시험을 통하여 얻어진 시험결과를 식 (1)을 이용하여 1T-CT 시편에 해당하는 파괴인성값($K_{JC,1T}$)으로 환산하여 온도에 따라 도시하였다. ASTM 표준절차에 따라 -90℃에서의 파괴인성값으로부터 구한 재료의 기준특성온도는 -83℃로 결정되었다. 이 값은 일반적으로 원자로 압력용기강의 조사전 시험에서 측정되는 범위인 -60°C ~ -100°C 값에 비해 그다지 나쁘지는 않았다. 시험온도가 증가할수록 파괴인성값들이 증가하는 경향이었고, -90℃에서의 측정값들은 뚜렷한 편차들을 보이는 천이구역에서의 전형적인 거동을 보이고 있다. Fig. 1 에서 실선은 식 (2)로 표시되는 천이특성

Master Curve 의 중간값을 나타내며, 점선은 확률적 파괴인성 발생빈도에서 각각 5% 하한선 및 95% 상한선의 범위를 나타낸다. 파단된 시편의 파면을 관찰해본 결과, 시험온도가 증가할수록 파괴가 일어나기 전까지의 소성 변형량이 증가하였으며 -75°C 이상에서는 취성파괴 이전에 안정균열 진전이 발생하는 경향이었다. 그림 1 에서 open mark 는 안정균열이 진전한 경우를 나타내며, 이때 파괴인성은 취성파괴인자 J_C 보다는 연성파괴인자 J_{IC}에 의해 지배되어야 하므로 이를 고려할 경우 upper shelf toughness 가 약 150 MPa$\sqrt{m}$ 정도가 되는 것으로 판단된다. 이는 저인성 용접부에서 upper shelf 현상이 보다 쉽게 일어나고 그 파괴인성 절대값도 일반적으로 사용되는 200 MPa$\sqrt{m}$ 기준보다 낮음을 보여주었다.

(2) 압입시험을 통한 파괴인성 평가

Fig. 2 는 각 온도에서 압입시험을 통해 얻어지는 하중-변위곡선의 변화를 보여준다. 각각의 압입하중-변위 곡선으로부터 식 (4)를 이용해서 파괴인성값 ($K_{JC,\ Indentation}$)을 구했으며, 이때 파괴응력은 -90°C 에서의 PCVN 시험결과로부터 2740MPa 로 결정하였다. Fig. 3 에는 압입시험으로 얻은 파괴인성값, $K_{JC,\ Indentation}$과 3 점 굽힘시험을 통해 측정한 파괴인성값, $K_{JC,\ 1T}$ 및 Mater Curve 를 나타내었다. 용접부 비드내의 각 조직별로 수행된 압입시험을 통해 평가된 파괴인성값들은 조직에 따른 뚜렷한 차이를 보이지는 않았으며, 이는 Fig. 4 의 Brinell 경도시험 결과로부터도 확인할 수 있었다. Fig. 3 에서 보듯이 압입시험으로부터 예측된 파괴인성 값들은 ASTM master curve 의 경향과 잘 일치하며, PCVN 3 점 굽힘시험으로부터 설정된 $K_{JC,\ 1T}$의 5%-하한과 95%-상한선 이내의 값들을 갖는 것으로 평가되었다.

5. 결론

원자로 압력용기의 저인성 용접부(Linde 80) 천이온도 영역에서 3 점 굽힘시험 및 압입시험을 통해 조사전 파괴인성값을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PCVN 파괴인성 시험으로 얻어진 천이특성 기준온도는 -83°C 로 일반 원자로 압력용기강 모재의 조사전 특성에 비해 그다지 나쁘지 않았다.
2) 온도에 따른 파괴인성의 변화는 ASTM 의 master curve 로 평가되는 경향에 잘 일치하였으며, 시험결과의 편차도 이론적 분포범위와 잘 일치하였다.
3) IEF 이론을 적용하여 압입시험으로 평가된 파괴인성값 $K_{JC,\ Indentation}$ 은 실제 파괴인성 시험으로부터 얻어진 파괴인성 천이특성을 잘 예측해주었으며, 그 편차범위도 5% 하한선 및 95% 상한선 범위로 잘 분포되었다.
4) 비교적 저온인 -75°C 이상에서부터 upper self 의 파괴특성이 관찰되었으며 그 파괴인성 값은 약 150 MPa$\sqrt{m}$ 정도로 낮았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 사업중 원자력재료기술개발 원자로압력경계재료 및 전력연구원의 원전수명관리연구 과제의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 홍준화 등, "고리 1 호기 원자로 압력용기 건전성평가(저인성 파괴해석)", KAERI/CR-005/94, 한국원자력연구소 보고서 (1994)
2. K. K. Yoon, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 117, pp.378-382 (1995)
3. ASTM E1921-97, "Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_o, for Ferritic Steels in the Transition Range" (1998)
4. T. S. Byun, J. W. Kim and J. H. Hong, J. Nuc. Mater., **252** (1998) 187
5. T.S.Byun, S.H.Kim, B.S.Lee, I.S.Kim, and J.H.Hong, J. Nuc. Mater., Vol. 277 (2000) 263-273
6. K.Wallin, Eng. Fract. Mech., Vol. 19 (1984) 1085-1093
7. J.G.Merkle, K.Wallin, D.E.McCabe, "Technical Basis for an ASTM Standard on Determining the Reference Temperature, T_o, for Ferritic Steels in the Transition Range", NUREG/CR-5504 (1998)
8. 이봉상, 양원존, 허무영, 김주학, 홍준화, 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권 제 2 호, (2000) 303-310

Table 1. Chemical composition of the test material (Linde 80 weld, WF-233) (wt.%).

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
0.10	1.52	0.37	0.012	0.015	0.61	0.08	0.48	0.011	0.23	0.01

Table 2. Mechanical properties of the test material.

YS	UTS	USE	T_{41J}	RT_{NDT}
485 MPa	594 MPa	90.6 J	-21℃	-23℃

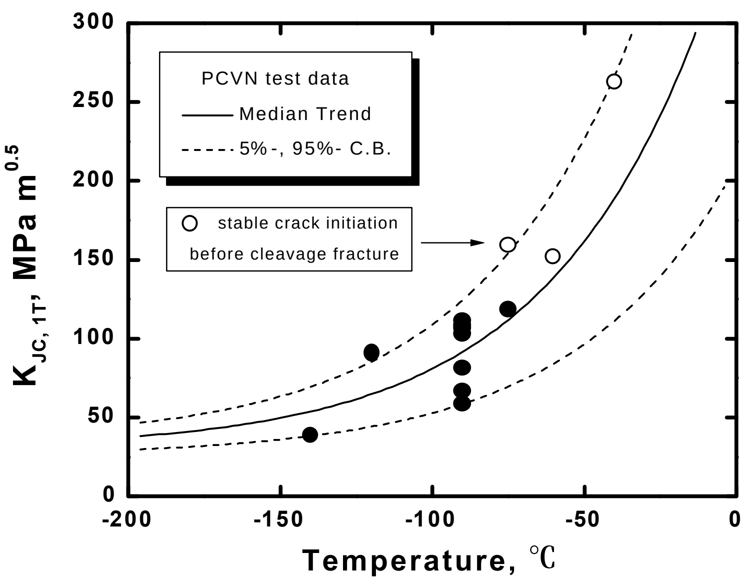

Fig. 1 Fracture toughness test result from PCVN specimens with the ASTM master curve trend lines (T_o= -83°C)

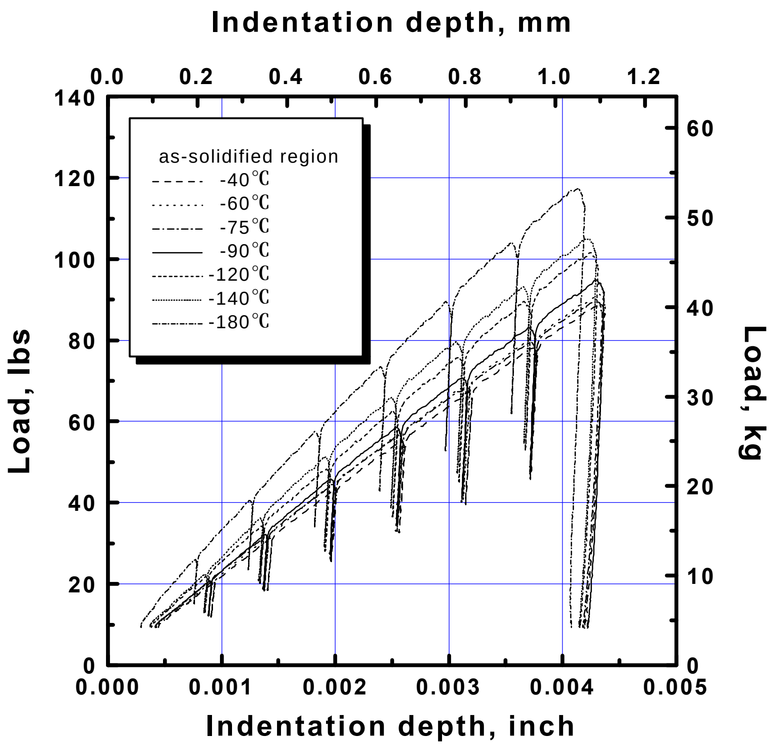

Fig. 2 Indentation load-depth curves at different temperatures in ABI tests

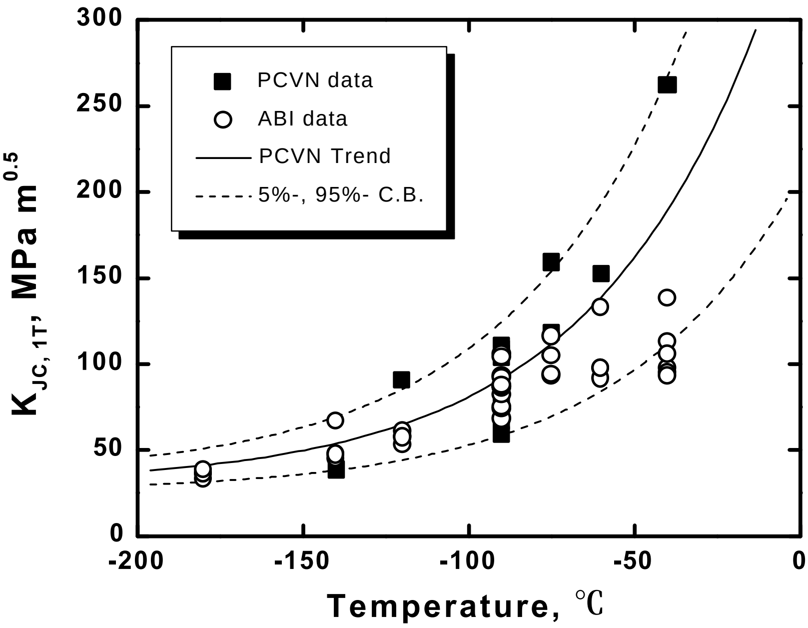

Fig. 3 Fracture toughness data estimated from ABI tests with the actual PCVN test data.

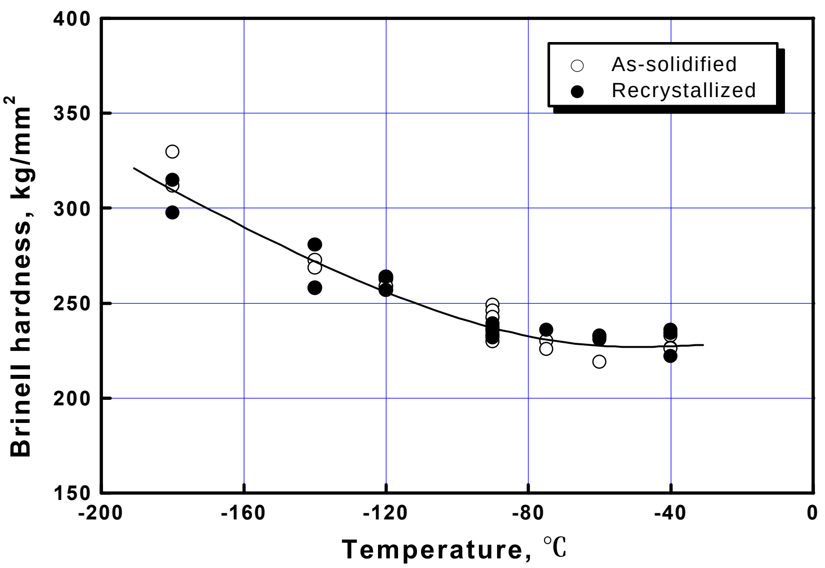

Fig. 4 Brinell hardness data from ABI tests for two different welding structures.