

研究論文

소형편치 시험법에 의한 초전도 마그넷 구조용강 TIG 용접부의 극저온 파괴특성 평가

권 일 현* · 橋田俊之** · 정 세 희***

Evaluation of Cryogenic Fracture Characteristics on TIG Weldments of Superconducting Magnets Structural Steel by Small Punch Testing Method

I. H. Kwon*, T. Hashida** and S. H. Chung***

Key Words : Cryogenic fracture characteristics, Superconducting magnets, Small punch testing, Austenitic stainless steel JN1 base metal and TIG weldment

Abstract

In order to evaluate the cryogenic fracture characteristics of structural steels for superconducting magnets of fusion reactor, small punch (SP) testing was performed on austenitic stainless steel (JN1 base metal) and its TIG weldments at 293K, 77K and 4K. The mechanical properties with respect to the extracted location of the weld metal, on the effects of welding heat cycle about base metal near fusion line in TIG weldments were investigated.

The mechanical property of the weld metal in TIG weldments depends on distance from welding root, root region of weldments having the lowest mechanical property. The base metal near fusion line showed degradation of mechanical property caused by cyclic heating during the TIG welding. Based on the test results, HAZ was found to be up to 5mm from the fusion line. It is shown that SP testing is a useful tool to evaluate the mechanical properties with respect to the microstructures changes such as HAZ as well as weld metal in TIG weldments at cryogenic temperature.

* 정회원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과 대학원

** 비회원, 일본 동북대학 공학부 부속 파괴역학응용연구시설

*** 정회원, 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

1. 서 론

차세대 핵융합로의 초전도 마그넷과 그 지지부재는 극저온 및 강자장하에서 사용되며, 용접에 의한 대형구조물로 구성될 계획이다^{1,2)}. 대형 용접 구조물인 초전도 마그넷에 있어 용접부의 존재는 불안정 파괴의 잠재요인으로 될 수 있어, 기존의 극저온용 강에 비해 기계적 성질과 용접성이 뛰어난 구조용 강의 개발이 요구되었다³⁾. 이에 부응하여 최근 극저온에서 강도와 인성이 뛰어난 오스테나이트계 스테인레스강 JN1 단조재 및 불활성 가스 텅스텐 아크 용접법 (inert tungsten arc welding: 이하 TIG 용접)이 개발되어 핵 융합로의 지지부재로서의 적용여부에 관심이 집중되고 있다. 그러나, JN1 단조재의 용체화재 (이하:모재) 및 그 용접재가 실기 구조물의 지지부재로 적용되기 위해서는 극저온에서의 파괴특성에 대한 평가가 선행되어야만 한다. 용접부는 상이한 조직을 갖는 용착금속, 용융선 및 용접열영향부 (heat affected zone: 이하 HAZ)로 구성된다. HAZ는 매우 취약한 기계적 성질을 보인다고 알려져 있고^{4,5)}, 특히 극저온 및 강자장하에서 사용이 예상되는 JN1 TIG용접재에서 HAZ의 존재는 구조부재의 건전성에 큰 영향을 미칠수 있는 요인으로 지적된다. 따라서, 이에 대한 규명이 시급한 과제로 되고 있으나, 지금까지 보고된 결과들은 JN1 모재와 TIG 용접재의 용접금속^{6,7,8)}에 한정되어 있을 뿐 용접재의 용융선 근방의 HAZ에 대한 연구는 거의 행해지지 않고 있다. 이는 비교적 소형시험편을 사용하는 샤피 (charpy) 충격시험이나 삼점굽힘 시험으로도 용접부의 HAZ와 같은 미소 국부영역의 기계적 성질의 평가에는 상당한 어려움이 있기 때문이다. 특히, 현재까지 극저온에서의 시험법이 아직 확립되어 있지 않기 때문에 이는 더욱 어려운 문제로 되고 있으며, 미국과 일본을 중심으로 극저온 시험법의 확립^{9,10)} 및 극저온 기계적 성질의 간편평가법 개발^{11,12)}을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편, 원자로 노벽의 재질열화를 평가하기 위해 개발된 소형편치 (small punch:이하 SP) 시험법¹³⁾은 소형화된 시험편을 이용하기 때문에, 대형 시험편의 제조가 불가능한 신 재료의 개발을 위한 파괴인성 시험법¹⁴⁾으로도 적용되고 있다. 또, 용접부와

같은 국부영역의 각 미세조직에 따른 파괴인성평가에도 적용되어 그 유용성이 보고되고 있다¹⁵⁾.

이상의 관점으로 부터 본 연구는 초전도 마그넷 구조용강 JN1 TIG용접부에 대한 극저온 기계적 성질의 평가를 위한 시험방법의 하나로써 SP시험법의 유용성을 검토하였다. 이를 위해 먼저 TIG용접부의 용접금속에 대해 실온 (293K)에서 극저온 (4K)까지의 온도범위에서 SP시험을 행하여 극저온 파괴거동의 조사를 행하였다. 또한, 용접시 열사이클에 의한 용융선 근처 모재의 취화정도를 정량적으로 평가하고자 TIG 용접부의 용융선으로부터 거리에 따라 채취한 시험편을 대상으로 기계적 성질의 평가를 행하였다. 이상의 결과로 부터 극저온 용접구조물로의 JN1 TIG 용접재의 적용을 위한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 오스테나이트 (austenite)계 스테인리스강 JN1 모재 및 그 용접재로서 차세대 핵융합로 마그넷 및 그 지지부재의 후보재료이다. JN1 모재는 판 두께 250mm의 단조재를 용체화 처리 (1075℃×12분, 수냉)한 것이다. 용접재는 판 두께 200mm의 용체화재에 TIG 용접을 실시한 것으로, 용접봉의 재료로 Inconel-625^R 합금 및 그 개량재인 Inconel-625^M합금을 사용하였다. JN1 단조재와 용접재의 화학성분 및 4K에서의 기계적 성질을 각각 Table 1과 2에 나타내었다. Table 3에 시험재에 대한 용접조건을 나타내었다.

본 실험에 제공된 각각의 SP 시험편의 채취위치와 그 약칭을 Fig.1에 보인다. 모든 시험편은 관심 있는 위치가 시험편의 중심에 위치하도록 주의하여 가공하여 실험에 제공하였다. SP 시험편은 모두 L (longitudinal) 방향으로 채취한 후, 표면을 사포 (emery paper) #1200까지 연마하여 경면으로 만들었다. 최종적인 SP시험편의 크기는 10×10×0.5mm였다. 특히, 용융선이 시험편의 중심에 위치한 시험편 (이하:용융선 시험편)의 경우, 용융선이 시험편의 중심에 위치하도록 가공한 후 강구중심과 용융선이 일치하도록 하여 실험을 행하였다.

Table 1 Chemical compositions of JN1 forged plate and weld metal of TIG welded joint (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	N	Mo	Nb
Forged plate	0.040	0.97	3.88	0.022	0.001	15.07	24.32	0.023	0.32	-	-
Weld metal I-625 ^H	0.035	0.14	0.05	0.008	<0.001	21.6	21.6	-	0.029	9.0	3.55
Weld metal I-625 ^M	0.008	0.10	0.15	0.001	0.0004	21.8	22.4	-	0.15	8.50	-

Table 2 Mechanical properties of JN1 forged plate and weld metal of TIG welded joint at 4K.

Material	σ_y (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	J_{IC} (kJ/m ²)	K_{IC} (MPam ^{1/2})
Forged plate	1363	1752	31	42	235*	218*
Weld metal	855	1280	-	-	-	-

Here, σ_y and UTS are yield strength and ultimate strength, respectively.

* : Data of rolled plate with a thickness of 100mm.

Table 3 Welding conditions for TIG welding.

Steel	Plate size	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Welding wire
Solution treated JN1 forged plate	200t×250W×880L	250~270	10~11.5	10~12	YT-1625 (1.2 ϕ) YT-1625M (1.2 ϕ)

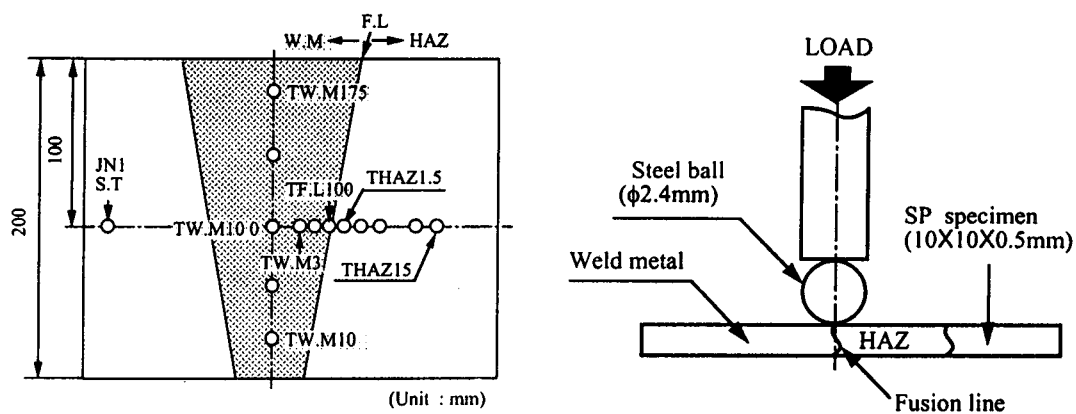


Fig. 1 Schematic illustration showing the extracted position and loading method for SP specimen. (Here, F. L and B. M means fusion line and base metal.)

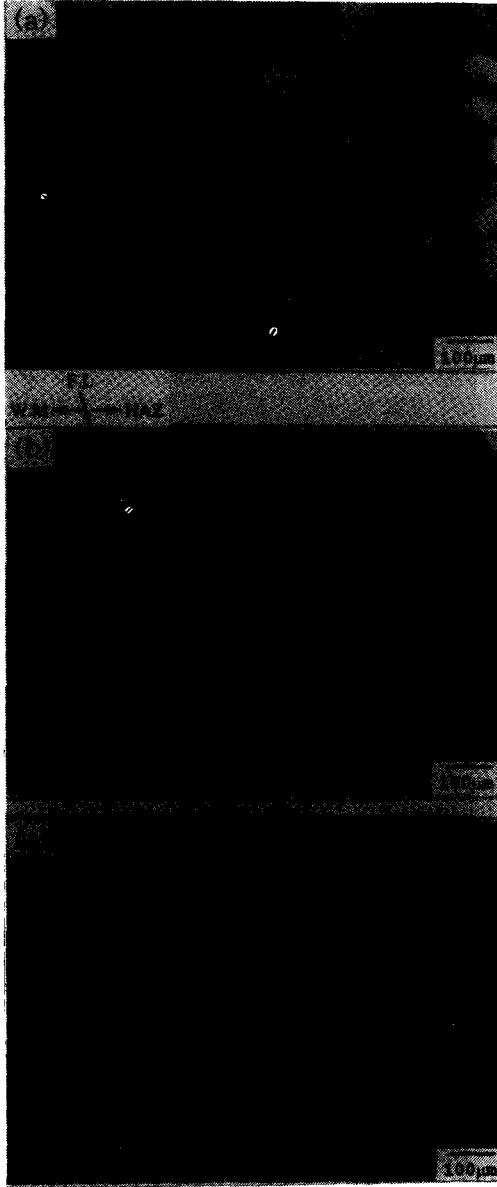


Fig. 2 Various microstructures in TIG weldments.
(a) JN1 base metal ; (b) fusion line
(c) weld metal

그 도식적인 그림을 Fig. 1에 보인다.

Fig. 2는 TIG 용접부의 미세조직 사진이다. 모재 및 용융선 근방의 HAZ로 여겨지는 부분의 미세조

직은 모두 잔류 오스테나이트 조직으로 구성되어 있고, 용접시 용접열에 의한 용융선 근처 모재의 조직변화는 보이지 않고 있다. 또한, 용접금속의 미세조직도 오스테나이트 조직이 관찰되었다.

2.2 실험방법

실온 (293K) 에서 액체헬륨온도 (4K) 까지의 온도 범위에서 SP실험이 가능하도록 제작된 극저온용 SP실험장치의 개략도를 Fig. 3에 보인다. 극저온에서의 실험은 장시간의 온도보정이 중요한 요인으로 되기 때문에 실험장치는 크라이오스태트 (cryostat) 를 필요로 한다. 크라이오스태트는 내통과 외통으로 구성되며, 4K에서의 SP실험중 온도의 보정은 내통에는 액체헬륨, 외통에는 액체질소를 각각 주입하여 실험중 항상 동일 온도를 유지하도록 하였다. 또, 장치의 로드, 프레임 및 SP 지그 등은 저온에서의 열전도율이 낮고 강도가 높은 티타늄합금을 사용하였다. SP 시험용 지그는 상·중·하부 다이 (die) 및 4개의 체결나사로 구성되며, 시험중 시험편에 집중하중이 가해지도록 지그의 다이내에 시험편을 위치시킨 후 토크 렌치에 의해 0.5m·N으로 체결되었다.

77K와 4K에서의 SP실험은 크라이오스태트내에서 행하였다. 4K의 경우, 시험편을 SP시험용 지그에 체결한 후, 내통에 액체질소를 주입하여 시험편을 예냉하였다. 그 후 내통의 액체질소를 모두 추출한 상태에서 다시 내통에 액체헬륨을 주입하였다. 이때 외통에는 액체질소를 주입하여 액체헬륨의 소모를 억제하였다. 액체헬륨의 주입에 트랜스퍼 튜브 (transfer tube) 를 이용하였으며, 시험중 항상 시험편이 액체헬륨에 잠기도록 하여 실험을 행하였다. 부하는 Fig. 3에 보이는 바와 같이 실험장치의 상부에 설치되어 있는 모터 구동의 부하장치를 이용하여 0.1mm/min의 크로스헤드 속도로 행하였다. 또, 시험편에의 집중하중은 직경 2.4mm의 강구에 편치를 압축하여 가해졌다. 하중-변위 곡선은 X-Y레코더 및 컴퓨터에 의해 실험과 동시에 자동기록되었다. 변위는 크로스헤드에 부착된 LVDT (linear variable differential transducer) 에 의해 측정된 값이다. 본 실험에 있어 재료의 기계적성질의 평가에는 SP에너지를 이용하였고, 이는 하중-변위곡선상에서 파괴에 의해 급격한 하중감소가

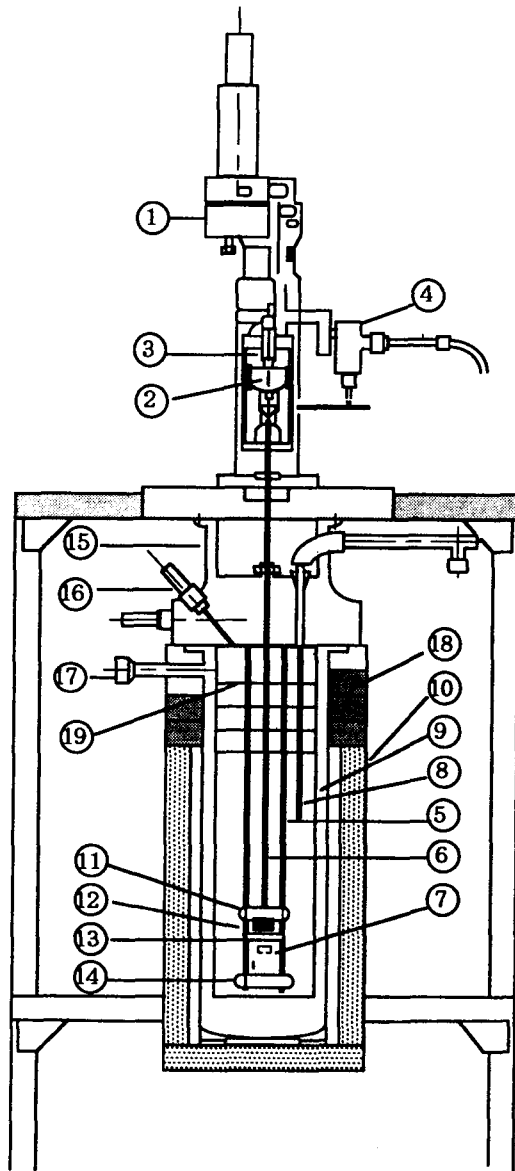


Fig. 3 Cryostat for SP test apparatus.

(1) loading unit, (2) load cell, (3) load cell adapter, (4) LVDT, (5) load column, (6), (12) pull rod, (7) puncher and dies for SP test, (8) liquid helium transfer tube, (9) liquid helium dewer, (10) liquid nitrogen dewer, (11) load plate, (13) upper crosshead, (14) lower crosshead, (15) base frame, (16) electrical feed-through, (17) vacuum valve, (18) styrofoam (exploded polystyrene plastic), (19) radiation shield plates.

발생한 점까지의 곡선의 아래면적으로 정의된 값이다. 이용된 SP에너지 값은 하나의 실험조건에서 2개 이상의 시험편을 대상으로 반복실험에 의해 얻어진 평균값이다. 시험종료 후 미시적 및 거시적 파괴면관찰에는 주사전자현미경(scanning electron microscope: 이하 SEM)을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 JN1 TIG 용접재 용접금속의 용접루트로 부터 거리에 따른 파괴특성

전술한 바와 같이 여러 연구자들에 의해 JN1 모재 및 TIG용접재의 용접금속에 대한 극저온 탄소성 파괴인성시험이 행해져 유용한 탄소성 파괴인성치 J_{IC} 가 보고되고 있다^{6,8}. 그러나, 이 시험법은 실험방법 및 시험편의 크기등의 문제로 인해 보다 소형화된 시험편에 의한 간편 평가법의 개발이 요망된다. 따라서, 본 절에서는 소형화된 시험편을 이용하는 SP시험법을 적용하여 극저온 구조용강 모재 및 용접부의 용접금속에 대한 기계적 성질의 평가 가능성을 검토하였다. 이를 위해 각 용접금속의 SP 시험편은 다른 연구자들⁹이 탄소성 파괴인성 시험을 위해 TIG용접재로 부터 시험편을 채취한 것과 동일한 위치에서 채취하였고, 실온에서 극저온까지의 SP 실험에 제공하였다. 용접금속 시험편의 채취위치를 Fig.1에 보인다. 각 시험편의 명칭은 Fig.1에서 TW. M10, TW. M45, TW. M100, TW. M155 그리고 TW. M175로 표시하였다. 여기에서 첨자 10, 45, 100, 155 및 175등은 용접 루트부로부터 시험편 중심까지의 거리를 나타낸다.

JN1모재와 각 위치의 용접금속 시험편을 대상으로 SP실험에 의해 얻은 하중-변위곡선을 Fig.4에 보인다. 모재의 경우, 시험온도의 저하에 따라 최대하중 및 최대하중까지의 변위량이 감소하고 있다. 한편, 용접금속 시험편의 경우, 용접루트 10mm위치의 시험편, 즉 TW. M10을 제외하고 시험온도의 저하와 더불어 최대하중 및 최대하중까지의 변위량이 증가하고 있다. 이는 극저온 파괴강도를 증가시키기 위해 첨가한 모재와 용접금속내의 질소(N) 함유량의 차이에 기인한다고 생각된다. 질소는 극저온에서 고용강화(solid-solution

strengtheners)에 의해 강도를 증가시키지만 인성은 감소시키는 작용을 하기 때문에 모재에 비해 소량의 질소를 함유한 용접금속이 4K에서 우수한 파괴 거동을 보인다고 생각된다¹⁶⁾.

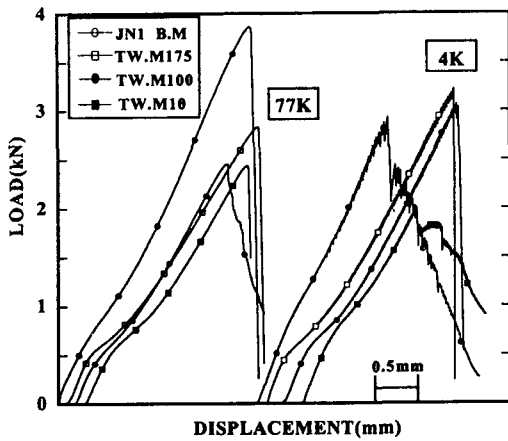


Fig. 4 Load-displacement curves obtained from weld metal specimens in TIG weldments at 77K and 4K.

여기서 TW.M10 시험편에서 얻어진 곡선을 살펴보면, 77K에서는 다른 위치의 용접금속 시험편의 곡선과 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나, 4K의 곡선에서는 다른 위치의 용접금속의 시험편에 비해 최대하중 및 최대하중까지의 변위량이 크게 감소하고 있다. 이는 후술하는 바와 같이 용접 루트로부터 거리에 따른 질소함유량의 차이에 기인된다고 생각된다.

또, 4K에서 얻은 JN1 모재 및 용접금속 시험편의 곡선상에서 극저온 특유의 세레이션(serration) 현상이 관찰되었다. 용접금속의 세레이션 현상은 모재의 것에 비해서 비교적 낮은 부하단계에서 발생하고 있고, 세레이션에 따른 하중 강하량도 감소하고 있다. 세레이션은 재료의 소성변형 능력과 관련한다고 보고¹⁷⁾되고 있어 용접금속은 모재에 비해 극저온에서도 비교적 큰 연성을 유지하고 있음을 시사하고 있다. 이를 증명하기 위해 실험 종료 후 SEM관찰을 행하여 얻은 모재와 TW.M175 용접금속 시험편의 거시적, 미시적 파면 사진을 Fig. 5에 나타내었다.

먼저 거시적 파괴양상은 모재와 용접금속 시험편 모두 상당량의 소성변형을 한 후 반구 정점부위로 부터 멀리 떨어진 위치에서 원둘레 방향으로 균열이 생성하여 전파하는 원주형 파괴가 관찰되었다. 또한 모재와 용접금속에서 관찰된 미시적 파면도 각 미세조직에 무관하게 연성 덩플파면이었다. 그러나, 덩플의 반경에 있어 차이를 보여 TW.M175 용접금속 시험편의 덩플반경은 약 5~10 μ m로 모재보다 큰 덩플반경을 보이고 있다. 따라서, TW.M175 용접금속 시험편은 모재 시험편에 비해 비교적 큰 소성유동을 한 후 파괴에 도달했음을 알 수 있다. 하중-변위곡선으로 부터 용접금속 시험편중에서 극저온 파괴특성의 저하가 가장 두드러지게 나타난 TW.M10 용접금속 시험편의 파괴양상 및 파면을 살펴보면, 시험온도에 무관하게 다른 위치의 용접금속 시험편에서 관찰된 원주형 파괴와 연성 덩플파면이 관찰되었다. 그러나, 덩플반경은 다른 용접금속에서 관찰된 것 보다 작은 약 5 μ m의 미세한 덩플이 관찰되어 TW.M10 용접금속 시험편은 다른 위치의 용접금속 시험편에 비해 작은 소성변형을 한 후 파괴에 이르렀음을 알 수 있다. 이상의 파면관찰 결과는 하중-변위곡선의 파괴거동과 좋은 상관성을 보이고 있어, SP 실험에 의해 얻어지는 하중-변위곡선은 각 미세조직의 극저온 파괴거동을 반영하고 있음을 알 수 있다.

본 실험에 있어 각 재료의 기계적 성질을 조사하기 위해 SP에너지를 이용하였다. SP 에너지는 하중-변위곡선에서 최대하중후의 급격한 하중강하가 발생한 변위점까지의 곡선의 아래면적으로 정의하였다. 또, 재현성을 위해 각 실험조건에서 2매이상의 시험편을 대상으로 얻어진 SP에너지의 평균값을 이용하였다. Fig. 6은 JN1 모재 및 용접부의 각 위치에서 채취한 각각의 용접금속 시험편으로 부터 얻은 SP에너지의 온도 의존성이다. JN1 모재의 SP에너지는 77K에서 최대치를 보인 후 4K에서 크게 감소한 값을 보이고 있다. 반면, 용접금속은 77K에서 모재에 비해 낮은 값을 보이고 있으나, 4K에서는 TW.M10 시험편을 제외하고 오히려 높은 값을 보이고 있다. 또, 용접금속의 각 채취위치에 따른 SP에너지를 비교하면, 용접부의 루트부로부터 먼 곳에 위치한 곳으로부터 채취한 시험편이 시험온도에 관계없이 비교적 높은 값을 보이고 있다. 그러나, 용접 루트부 근방에서 채취

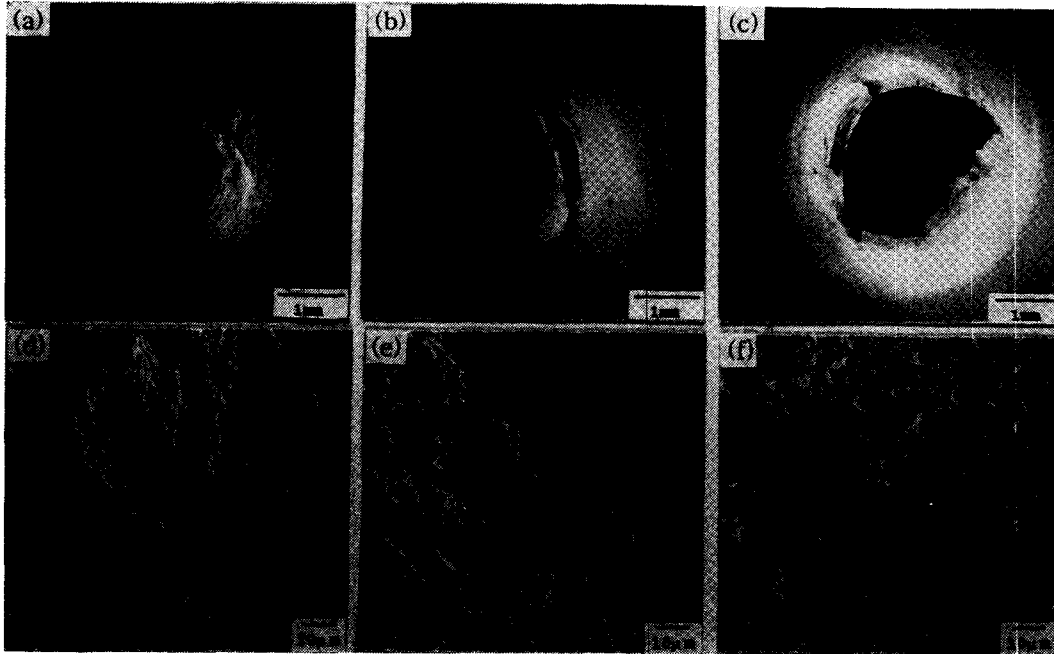


Fig. 5 SEM macro- and micro-fractographs of JN1 base metal and weld metal in TIG weldments at 4K.
 (a), (d) JN1 base metal ; (b), (e) TW.M175 (175mm location from the welding roots) ; (c), (f) TW.M10 (10mm location from the welding roots)

한 용접금속 시험편 즉, TW.M10 시험편의 SP에너지 값은 77K에서 다른 용접금속 시험편과 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 시험온도가 4K로 저하됨에 따라 SP에너지는 큰 폭으로 감소되어 TW.M175 시험편에 비해서는 약 40%에 불과한 현저히 낮은 값을 보이고 있다. 이상의 SP실험으로부터 얻어진 결과로부터 알 수 있듯이 JN1 TIG용접재의 용접금속은 시험온도의 저하에 따라 용접 루트부로 부터 거리에 따른 기계적 성질 의존성을 보이며, 4K에서 그 경향은 더욱 현저히 나타나고 있음을 알 수 있다. 이에 대해 Horiguchi등⁸⁾은 TIG 용접재의 용접금속내의 질소 함유량을 조사하여, 용접 루트부의 질소함유량이 다른 부위에 비해 높은 값을 보이기 때문에 극저온 기계적 성질이 저하되었다고 보고하고 있다. 결국, SP시험에 의해 얻은 결과는 JN1 TIG용접재의 용접금속에서 얻어진 탄소성 파괴인성치 JIc가 용접 루트로부터 시험편 채취위치에 의존한다는 다른 연구자들의 보고⁹⁾와 좋은 일치를 보이고 있어, SP시험은 극저온에 있어

JN1 모재뿐 아니라 용접부의 기계적성질 평가를 위한 유용한 시험법이라고 사료된다.

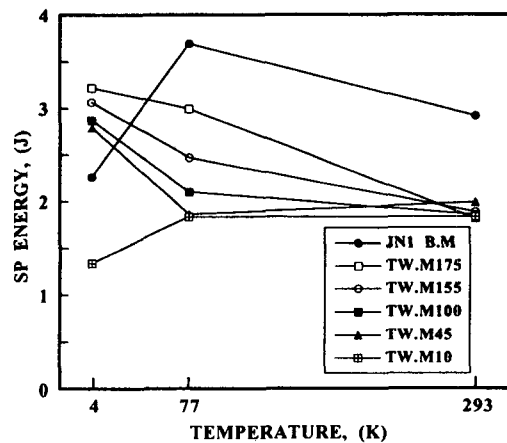


Fig. 6 Temperature dependence of the SP energy obtained from JN1 base metal and weld metal in TIG weldments.

3.2 TIG 용접재의 용융선 근방 모재 및 용접금속의 파괴특성

일반적으로 구조물의 용접시 용접열에 의해 용융선 근방의 모재 즉, HAZ는 기계적 성질의 저하가 예상되며, 이는 초전도 마그넷의 구조재료의 적용이 기대되는 본 TIG용접재에 있어서도 피할 수 없는 것이라 생각된다. 따라서, 용접재의 HAZ에 대한 파괴거동의 규명은 초전도 마그넷의 구조 건전성의 견지에서 매우 중요한 과제로 되고 있으나, 이에 대한 보고는 거의 알려져 있지 않다. 이에 주목하여 본 절에서는 용접부의 극저온 파괴거동의 해명에 유용하다고 증명된 SP시험법을 적용하여 용융선 근처의 HAZ에 대한 파괴거동의 조사를 행하였다. 각 시험편의 채취 위치를 Fig.1에 나타내었다. 그림에서 각 시험편의 명칭은 THAZ 1.5, THAZ3, THAZ5, THAZ10, THAZ15로 나타내었다. 덧붙여, 용융선을 중심으로 채취위치에 따른 용접금속의 기계적 성질에 대한 조사도 병행하였다. 이때의 시험편 명칭은 각각 TW.M1.5, TW.M5로 표시되었다. 여기에서 첨자는 용융선으로부터 시험편 중심까지의 거리를 나타낸다.

Fig.7은 SP실험을 행하여 얻은 용융선 근방 HAZ의 77K와 4K에서의 하중-변위곡선이다. 77K에서 얻은 용융선 시험편 TF.L100과 용융선 근방

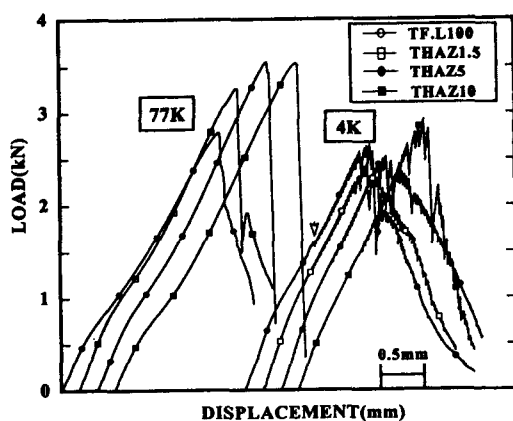


Fig. 7 Load-displacement curves obtained from base metal specimens near the fusion line in TIG weldments at 77K and 4K.

의 HAZ 시험편의 곡선을 비교하면, HAZ 시험편은 용융선으로부터 거리의 증가에 따라 최대하중의 증가를 보이고 있다. 반면, 4K에서 얻어진 THAZ 1.5 및 THAZ5(용융선으로부터 1.5mm 및 5mm 위치의 모재측에서 채취한 시험편)의 곡선은 TF.L100 시험편에 비해 낮은 최대하중값을 보이고 있으나, 모재측의 10mm위치의 THAZ10 시험편에서는 오히려 TF.L100 시험편보다 높은 최대하중값을 보이고 있다. 이상의 하중-변위곡선으로부터 용융선 근방의 모재는 용접시 열이력에 의해 기계적 성질이 저하되었음을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 실험종료 후 얻어진 파면관찰로부터 잘 알 수 있다. 용융선 근방의 모재측 시험편으로부터 얻어진 4K에서의 파면과 파괴양상을 Fig.8에 보인다. 거시적 파괴양상은 Fig.5에 보인 모재의 경우와 동일하게 채취위치에 무관하게 원주형 파괴가 관찰되었다. 그러나, 파면에 있어서는 차이를 보여, THAZ5 시험편에서 얻어진 파면은 모재의 파면과 다르게 연성 덩플외에 의벽개 또는 입계파면이 혼재하고 있다. 또한, THAZ10 시험편의 파면도 THAZ5 시험편의 파면과 동일한 혼재파면이 관찰되었으나, 의벽개파면 면적의 감소와 더불어 덩플 반경은 증가하고 있다. 이상의 파면관찰로부터 알 수 있듯이 용융선 근처의 모재는 용접시 열이력에 의해 취화되며, 용융선으로부터 멀리 떨어진 위치의 시험편일수록 연성을 회복하고 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 용융선 근방의 용접금속에 대해 SP실험을 행하여 얻어진 77K와 4K의 하중-변위곡선이다. 곡선에서 알 수 있듯이 77K와 4K의 온도에서 용융선으로부터 시험편 채취거리의 증가에 따라 최대하중의 증가를 보이고 있다. 그러나, 77K에서 얻어진 TW.M100 시험편의 최대하중값은 다른 시험편에 비해 오히려 저하된 값을 보이고 있어, 용융선 근처의 용접금속이 용융선에서 먼 거리의 용접금속에 비해 뛰어난 기계적 성질을 가짐을 알 수 있다.

Fig.10에 용융선 근방의 용접금속 시험편에 대해 4K의 실험에서 얻어진 파면과 파면양상을 보인다. 시험온도 및 채취위치에 관계없이 모든 시험편에서 얻어진 파괴양상은 원주형 파괴였고, 파면은 연성 덩플파면이 관찰되었다. 또한, 4K에서 얻은 모든 용접금속과 HAZ 시험편의 곡선상에서 세레이

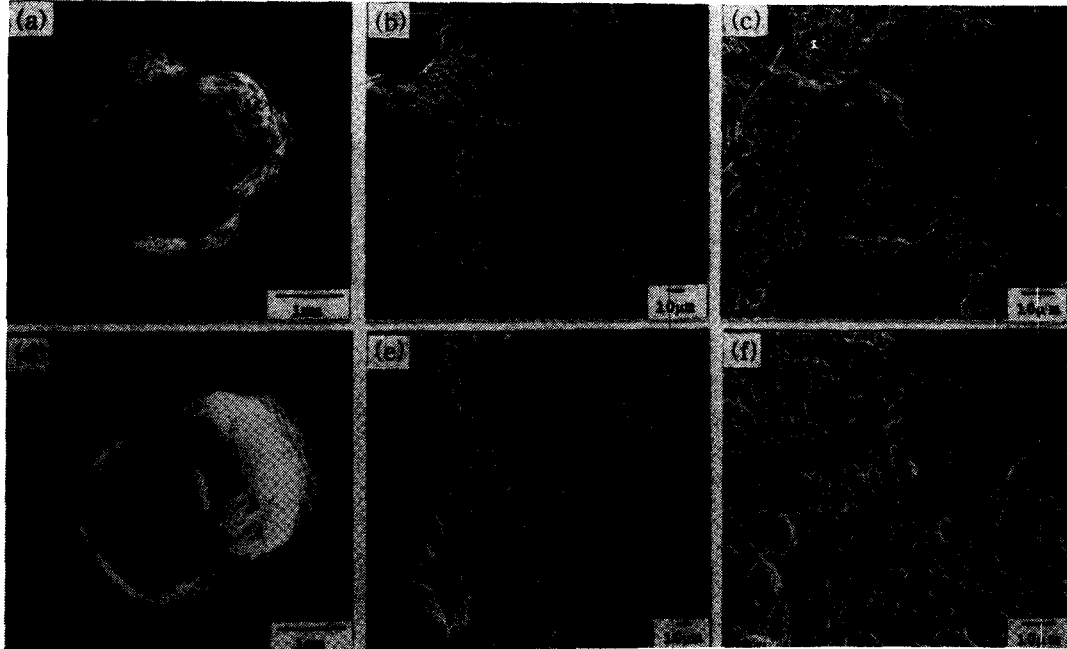


Fig. 8 SEM macro- and micro-fractographs observed from base metal specimens near the fusion line in TIG weldments at 4K.
 (a), (b), (c) THAZ5 (5mm location from the fusion line)
 (d), (e), (f) THAZ10 (10mm location from the fusion line)

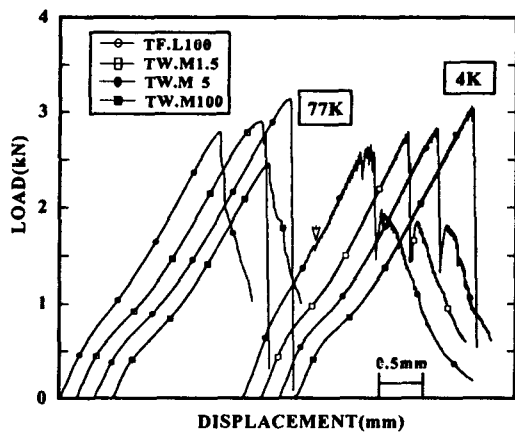


Fig. 9 Load-displacement curves obtained from weld metal specimens near the fusion line in TIG weldments at 77K and 4K.

에서 발생한 보통의 세레이션과 다른 pop-in현상¹⁸⁾의 발생은 확인되지 않았다. 따라서, 4K의 곡선상에서 발생한 pop-in과 같은 불규칙한 파괴거동은 용융선 특유의 현상임을 알 수 있다.

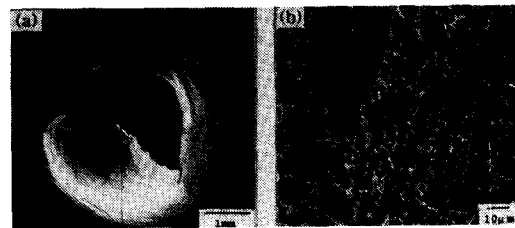


Fig. 10 SEM macro- and micro-fractographs observed from TW.M1.5 weld metal specimens near the fusion line in TIG weldments at 4K, showing fracture morphology in (a), and fracture surface in (b).

선 현상이 관찰되었지만, TF.L100 용융선 시험편

Fig. 11에 이상의 용융선으로부터 거리에 따라 채취한 각 시험편을 대상으로 SP실험을 행하여 얻은 SP에너지의 온도 의존성을 보인다. 용융선 시험편을 중심으로 한 용접금속측의 SP에너지의 경우, 77K에서는 용융선으로부터 5mm까지는 SP에너지의 점진적인 증가를 보이고 있지만, 용융선에서 가장 먼 거리의 시험편인 TW. M100에서는 현저히 감소한 값을 보이고 있다. 또, 4K의 SP에너지는 용융선으로부터 거리의 증가와 함께 점진적인 증가를 보여 용융선에서 가장 먼 거리에서 가장 높은 값을 보이고 있다. 이와 같은 용접금속의 용융선으로부터 거리에 따른 기계적 성질의 차이는 전술한 바와 같이 용접금속내의 질소 분포도의 차이에 기인한다고 생각된다. 즉, 질소는 고용강화에 의해 극저온 강도를 증가시키는 역할을 하지만, 용접부의 제조시 용접금속내에 그 분포도가 일정하지 않기 때문에 위치에 따른 기계적 성질의 차이를 가져 온다고 생각된다. 또, 용융선을 중심으로 한 모재측의 SP에너지의 경우, 77K와 4K의 온도에서 용융선으로부터 거리의 증가와 함께 점진적인 증가를 보이고 있다. 여기서 주목할만 한 점은 4K에서 얻어진 채취위치에 따른 SP 에너지의 차이이다. 용융선 근방 모재측의 5mm위치까지의 시험편에서 얻어진 4K의 SP 에너지는 모재 시험편의 값보다 낮은 값을 유지하고 있지만, 용융선에서 5mm이상의 시험편에서 얻어진 값은 거의 모재에 상당하는 SP에너지 값을 보이고 있다. 따라서, SP시험에 의해 얻어진 에너지값의 고찰로부터 용접시 열이력은 용융선 근처의 모재에 영향을 주어 모재와 용접금속에 비해 기계적 성질의 저하를 가져온 HAZ가 형성되었음을 알 수 있다. 즉, 200mm 판 두께 TIG 용접부의 용접 루트부로부터 100mm위치에서 HAZ는 적어도 용융선으로부터 5mm의 영역내에서 발생하고 있음을 시사하고 있다. 이상의 고찰로부터 SP시험은 좁은 영역에서 불규칙하게 변화하는 HAZ의 각 미세조직에 따른 기계적 성질을 평가할 수 있는 유용한 시험법임을 알 수 있다.

4. 결 론

오스테나이트계 스테인리스 강 JN1 단조재 및

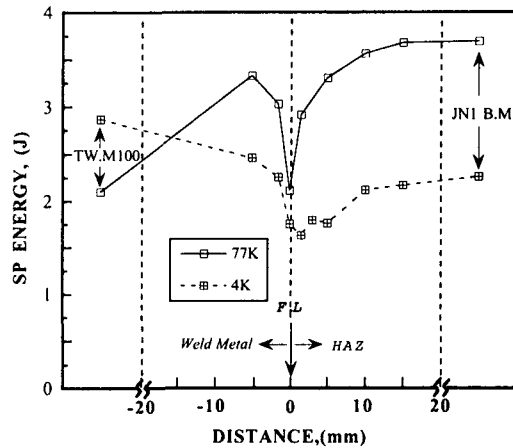


Fig. 11 SP energy with respect to the extracted distance from the fusion line in TIG weldments.

TIG용접재에 대한 극저온 파괴특성을 조사하기 위해 미소 시험편을 이용하는 소형펀치 (small punch : SP) 시험을 행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. TIG 용접재의 용접금속은 용접 루트로부터 거리에 따른 기계적 성질의 의존성을 보여, 용접 루트부에서 가장 취약한 파괴거동을 보였다. 용접금속 기계적 성질의 용접 루트 거리에 따른 의존성은 77K보다 4K에서 보다 뚜렷이 나타났고, 특히 용접 루트부에서 가장 가까운 위치의 시험편인 TW. M10의 4K에서 얻어진 SP에너지는 TW. M175 시험편의 에너지값의 약 40%에 불과한 현저히 저하된 값을 보였다.

2. 용융선 근방 모재로부터 관찰된 파괴양상은 모재와 동일한 원주형 파괴가 관찰되었으나, 파면은 연성 덩플외에 의벽개 또는 입계파면이 혼재하고 있는 파면을 보여 용접시 열이력에 의해 취화되었음을 알 수 있었고, 이는 하중-변위곡선으로부터 얻어진 파괴거동과 좋은 일치를 보였다. 또, 용융선으로부터 5mm 위치까지의 시험편에서 얻어진 SP에너지는 모재에 비해 낮은 값을 보이고 있어, TIG용접재의 HAZ는 적어도 용융선으로부터 5mm영역내에서 발생하고 있음을 알았다.

3. 4K의 하중-변위곡선상에서 관찰된 보통의 세레이션과 다른 pop-in에 따른 하중강하는 용접금속과 HAZ 시험편에서 관찰되지 않아 용융선 시험편만의 독특한 현상임을 알았다.

4. 이상의 JN1 모재 및 TIG용접재에 대한 하중-변위곡선, SP에너지 그리고 파면 관찰등의 고찰로부터 SP시험은 용접부의 용접금속뿐 아니라 HAZ와 같은 미세조직의 변화에 따른 극저온 기계적 성질의 평가에 매우 우수한 시험방법임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구의 일부는 일본 통상산업성 공업기술연구원으로부터 (財)오사카 기술센터 부속 신소재센터로의 위탁에 의한「석유대체 전원 신소재의 시험·평가방법의 표준화에 관한 조사연구」극저온 재료 분과회에서 실시된 것이다. 더불어, 본 연구를 수행하는데 있어 많은 지도와 애정을 베풀어 주신 일본 동북대학 故 高橋秀明교수님께 진심어린 애도의 마음을 바칩니다.

참 고 문 헌

- G. M. Goodwin : Welding Process Selection for Fabrication of a Superconducting Magnet Structure, *Welding Journal*, Vol. 62, No. 2, (1985), pp. 19-26.
- 小川忠雄, 小關敏彦 : 極低溫用ステンレス鋼の溶接, *日本溶接學會誌*, 第57卷, 第6號, (1988), pp. 443-449.
- H. I. Mchenry and R. P. Reed : Structural Alloys for Superconducting Magnets in Fusion Energy Systems, *Nuclear Engineering and Design*, 58, (1980), pp. 219-236.
- R. E. Dolby and J. F. Knott : Toughness of Martensitic and Martensitic-Bainitic Microstructures with Particular Reference to Heat-Affected Zones in Welded Low-Alloys Steels, *Journal of The Iron and Steel Institute*, (1972), pp. 857-865.
- E. Banks : Toughness Properties of HAZ Structures in Structural Steel, *Welding Research Supplement*, (1974), pp. 299-306s.
- T. Ogawa and T. Koseki : Weldability of Newly Developed Austenitic Alloys for Cryogenic Service : Part II -High-Nitrogen Stainless Steel Weld Metal, *Welding Research Supplement*, (1988), pp. 8-17s.
- T. Ogawa, T. Koseki, S. Ohkita and H. Nakajima : 4K Properties of High-Nitrogen Stainless Steel Weldments, *Welding Research Supplement*, (1990), pp. 205-212s.
- K. Horiguchi, Y. Shindo, T. Kobori, H. Takahashi, H. Nakajima and H. Tsuji : Cryogenic Fracture Toughness and Temperature Rise of Thick Section Weldment in JN1 Forged Plate with Inconel 625 Type Filler Metals, *Proceeding of the 1995 Annual Meeting of JSME/MMD*, 95-2(B), (1995), pp. 199-200.
- H. Nakajima, K. Yoshida and S. Shimamoto : Round Robin Tensile and Fracture Test Results for an Fe-22Mn-13Cr-5Ni Austenitic Stainless Steel at 4K, *Advances in Cryogenic Engineering (Materials)*, Vol. 34, (1988), pp. 241-249.
- T. Ogata, K. Nagai, K. Shibata and S. Murase : VAMAS Second Round Robin Test of Structural Materials at Liquid Helium Temperature, *Advances in Cryogenic Engineering (Materials)*, Vol. 38, (1992), pp. 69-76.
- 竹内正道, 庄子哲雄, 高橋秀明, 穴山武 : 核融合爐大形超電導マグネット構造 材料の極低溫における破壊じん性評價, *日本機械學會論文集(A編)*, 第51卷, 第470號, (1985), pp. 2256-2263.
- I. S. Hwang, M. M. Morra, R. G. Ballinger, H. Nakajima, S. Shimamoto and R. L. Tobler : Charpy Absorbed Energy and J_{1c} as Measure of Cryogenic Fracture Toughness, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 20, No. 4, (1992), pp. 248-258.
- JAERI-memo 62-192, (1987)

14. 齊藤雅弘, 高橋秀明, 鄭熙敦, 川崎亮, 渡邊龍三 : 微小試験片法による/セラミックス複合材料の破壊靱性評價, 日本機械學會論文集(A編), 第57卷, 第535號, (1991), pp. 522-529.
15. D. Y. Lyu, H. S. You, W. S. Chang, J. K. Lim and S. H. Chung : Fracture Toughness Evaluation of Welded Steel Joint by Small Punch Test, Proceeding of the KSME/JSME Joint Conference, Fracture and Strength 90, (1990), pp. 1482-1487.
16. R. P. Reed and N. J. Simon : Low temperature strengthening of austenitic stainless steels with nitrogen and carbon, *Advances Cryogenic Engineering Materials*, Vol. 30, (1984), pp. 127-136.
17. 福島英二, 後藤昭 : 極低溫における各種金屬, 合金のセレーション變形, 鐵と鋼, Vol. 39, No. 2, (1975), pp. 182-187.
18. I. H. Kwon, S. C. Liu, Maribel M. Saucedo and H. Takahashi: Fracture Toughness Evaluation of Austenitic Stainless Steel (JN1) Weldments by Means of Cryogenic Small Punch (SP) Test, Proceeding of the 1995 Annual Meeting of JSME/MMD, 95-2(B), (1995), pp. 201-202.