

# 고강도 및 고인성 스테인레스강 용접부의 극저온 파괴특성

## Cryogenic Fracture Characteristics on the Weldments of the Stainless Steel with High Strength and High Toughness

권일현\*, 임계규\*, 정세희\*, 劉世程\*\*, 橋田俊之\*\*

\* 전북대학교 공대 기계공학부

\*\* 日本 東北大學 附屬 破壊力學應用研究施設

### 1. 서론

현재 세계는 극저온에서도 저온취성이 나타나지 않는 재료의 개발에 큰 관심을 두고 있다. 이는 산업이 고도화됨에 따라 구조물의 사용조건이 보다 가혹화되어 액체헬륨 온도에서 발생하는 초전도 현상을 응용할 수 있는 단계에 이르고 있기 때문이다.

이상에 주목하여 본 연구는 극저온환경하에서도 고강도 및 고인성을 유지할 수 있도록 개선된 오스테나이트계 스테인레스강의 용접부에 대한 기계적 성질을 얻고자 하였다. 이를 위해 본 저자들은 먼저 미소 시험편을 사용하는 SP시험을 이용하여 JN1 GTA용접부의 용접금속에 대한 파괴특성을 조사하였다. 그 후 SP시험에서 얻어진 SP 에너지와 동일 재료에서 얻어진 탄소성 파괴인성치  $J_{IC}$ 의 비교를 행하여 양 시험법에서 얻어진 데이터의 신뢰성을 확인하였다. 최종적으로는 본 연구에서 얻은 데이터를 기초로 하여 금후 보다 개선된 용접방법을 모색하고자 하였다.

### 2. 실험재료 및 시험방법

#### 2.1 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 1075℃에서 12분동안 열처리된 후 수냉하여 용체화 처리된 두께 200mm의 JN1 단조재(이하 : 모재)이다. 용접재로서는 개선각도 약 20°의 V개선을 가지는 두께 200mm, 폭 250mm, 길이 880mm의 JN1 모재 블록 2개를 기계가공하여 이 두개의 블록에 GTA 용접을 실시한 것이다. Table 1에 JN1 모재와 용접 와이어의 화학성분을 나타내었다. 용접 와이어는 Inconel계의 I-625<sup>R</sup>과 I-625<sup>M</sup>을 사용하였다. I-625<sup>R</sup>은 연성이 높고 열 팽창율이 철기 스테인리스 강보다 낮기 때문에 용접 고온균열을 방지할 수 있다. I-625<sup>M</sup>은 내용접 균열성과 4.2K에서의 항복응력을 향상시키기 위해 I-625<sup>R</sup>로부터 Nb를 제거하여 질소를 첨가한 것이다<sup>(1)</sup>. Table 2에 GTA 용접조건을 나타내었다.

본 실험에 사용된 SP 시험편의 채취위치와 그 약칭을 Fig.1에 보인다. 모든 시험편은 관심있는 위치가 시험편의 중심에 위치하도록 주의하여 가공하여 실험에 제공하였다. SP 시험편은 모두 L 방향으로 채취한 후, 표면을 사포(emery paper) #1200까지 연마하여 경면으로 만들었다. 최종적인 SP시험편의 크기는 10×10×0.5mm였다.

#### 2.2 실험방법 및 시험편

Fig.2는 액체헬륨온도(4.2K)에서 SP시험이 가능하도록 제작된 극저온용 실험장치의 개략도이다. 극저온에서의 실험은 장시간의 온도보정이 중요한 요인으로 되기 때문에 실험장치는 크라이오스타트(cryostat)를 필요로 한다. 크라이오스타트는 내통과 외통으로 구성되며, 4K에서의 SP시험중 온도의 보정은 내통에는 액체헬륨, 외통에는 액체질소를 각각 주입하여 실험중 항상 동일 온도를 유지하도록 하였다. 또, 장치의 로드, 프레임 및 SP 지그등은 저온에서의 열전도율이 낮고 강도가 높은 티타늄합금을 사용하였다.

부하는 Fig.2에 보이는 바와 같이 실험장치의 상부에 설치되어 있는 모터 구동의 부하장치를 이용하여 0.1mm/min의 크로스헤드 속도로 행하였다. 하중-변위곡선은 X-Y레코더 및 컴퓨터에 의해 실험과 동시에 자동기록되었다. 변위는 크로스헤드에 부착된 LVDT에 의해 측정된 값이다. 본 실험에 있어 재료의 기계적성질의 평가에는 SP에너지를 이용하였고, 이는 하중-변위곡선상에

서 파괴에 의해 급격한 하중감소가 발생한 점까지의 곡선의 아래면적으로 정의된 값이다. 시험종료 후 미시적 및 거시적 파면관찰에는 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope: 이하 SEM)을 이용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

JN1강 모재와 각 위치의 용접금속 시험편을 대상으로 77K와 4.2K환경에서 SP실험을 실시하여 얻은 하중-변위곡선을 Fig.3에 나타내었다. 77K의 곡선을 보면, 시험편 채취위치에 관계없이 모든 용접금속 시험편에서 얻은 곡선상의  $P_{max}$  및  $\delta_{max}$ 는 JN1강 모재에 비해 저하된 값을 보이고 있다. 이와 같은 경향은 T W.M10 시험편에서 뚜렷이 나타나 모재에 비해 더욱 낮은  $P_{max}$  및  $\delta_{max}$  값들을 보이고 있다. 4.2K에서 얻은 용접금속 시험편의 곡선을 살펴보면, 용접루트 10mm위치의 시험편, 즉 T W.M10을 제외하고 77K의 곡선상에서 얻어진  $P_{max}$  및  $\delta_{max}$ 보다 오히려 증가하고 있다. 이와 같이 용접금속이 77K에서 보다 4.2K에서 우수한 파괴거동을 보이는 것은 극저온 파괴강도를 증가시키기 위해 첨가한 질소(N)의 고용강화(solid-solution strengthener)효과에 기인하였다고 생각된다<sup>(2)</sup>. 즉, 질소는 극저온에서 강도를 증가시키지만 인성은 저하시키는 작용을 하기 때문에 JN1강 모재에 비해 비교적 소량의 질소를 함유하고 있는 용접금속의 파괴거동은 4.2K에서 보다 개선되었다고 생각된다. 그러나, T W.M10 시험편에서 얻어진 곡선을 살펴보면, 4.2K 곡선에서의  $P_{max}$  및  $\delta_{max}$ 가 다른 위치의 용접금속의 시험편에 비해 현저하게 감소하고 있다. 후술하는 바와 같이 이상의 용접금속의 채취위치에 따른 기계적 성질의 차이는 용접금속에 포함된 질소량의 차이에 기인된다고 생각된다. 그리고, 4.2K에서 얻은 JN1강 모재 및 용접금속 시험편의 곡선상에서 극저온 특유의 현상인 서레이션(serration)이 관찰되었다. 용접금속의 서레이션 현상은 모재의 것에 비해서 비교적 낮은 부하단계에서 발생하고 있고, 서레이션에 따른 하중 강하량도 감소하고 있다. 서레이션은 재료의 소성변형 능력과 관련한다고 보고<sup>(3)</sup>되고 있어 용접금속은 모재에 비해 극저온에서도 비교적 큰 연성을 유지하고 있음을 시사하고 있다.

이를 증명하기 위해 4.2K에서 실험 종료후 SEM관찰을 행하여 얻은 각 위치의 용접금속 시험편으로부터 얻은 미시적 파면 사진을 Fig.4에 나타내었다. 4.2K환경에서 얻은 용접금속의 파괴양상은 모든 시험편에서 원주형 파괴였고, 미시적 파면도 시험편 채취위치에 관계없이 주로 연성의 덩플파면이 관찰되었다. 그러나, 덩플의 반경에 있어 차이를 보여 T W.M175 용접금속 시험편의 덩플반경이 약 5~10 $\mu$ m로 용접금속중 가장 큰 덩플을 보이고 있다. 따라서, T W.M175 용접금속 시험편은 용접금속중 가장 큰 소성유동을 동반한 후 파괴에 도달하였음을 알 수 있다. 그리고, T W.M10 용접금속 시험편의 파괴양상 및 파면도 시험온도에 무관하게 다른 위치의 용접금속 시험편에서 관찰된 원주형파괴와 연성 덩플파면이 관찰되었다. 그러나, 덩플반경은 다른 용접금속에서 관찰된 것 보다 작은 약 5 $\mu$ m의 미세한 덩플이 관찰되어 T W.M10 용접금속 시험편은 다른 위치의 용접금속 시험편에 비해 작은 소성변형을 한 후 파괴에 이르렀음을 알 수 있다.

Fig.5는 SP시험의 하중-변위곡선으로부터 얻은 SP에너지(이하  $E_{SP}$ )와 권<sup>(4)</sup> 및 Horoguchi 등<sup>(5)</sup>에 의해 얻어진 용접금속의 4.2K의 파괴인성치의 상관성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이  $E_{SP}$ 와  $J_{IC}$ 는 일응적인 대응관계를 가짐을 알 수 있고, 이는 SP시험이 극저온에서 용접부와 같은 구조부위의 파괴특성치의 평가에 유용한 방법임을 지적하고 있다.

Fig.6은 극저온 SP시험후 동일 위치로부터 시험편을 채취하여 불활성 가스용해 적외선 흡수법에 의해 용접금속내의 질소 함유량을 측정된 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 용접루트로부터 50mm에 대응하는 시료의 질소 함유량은 약 0.05wt%로 거의 일정하고, 이는 용접 와이어 I-625의 질소 함유량(0.029wt%)보다 높고, I-625M의 질소 함유량(0.150wt%)보다는 낮았다. 용접금속의 루트부 근방에서는 질소 함유량이 0.075wt%로 높지만, 모재인 단조재의 질소 함유량은 0.32wt%이고, Fig.1에 보인 바와 같이 용접재의 루트에서는 개선폭이 14mm로 좁기 때문에 용접시 단조재의 질소가 용접금속으로 용입한 것이라 생각된다.

극저온 구조재료인 오스테나이트계 스테인레스강 및 그 용접금속의 경우, 4.2K환경하에서 항복응력의 상승을 목적으로 하여 질소가 첨가되지만, 질소 함유량의 증가는 인성을 저하시킨다고

보고되고 있다<sup>6)</sup>. 본 시험재에서는 Ni기 용접재료를 이용하고 있지만, 용접금속의 극저온 강도향상을 위해 고질소 와이어인 I-625M을 사용하고 있고, 이는 결국 용접시 용융되는 용접봉에 함유된 질소와 Ni의 균일 구배를 요하고 있다. 결국, GTA 용접부의 용접루트부에서 얻은 파괴특성의 저하는 질소함유량이 다른 위치에 비해 현격히 높기 때문이라고 생각된다.

이상의 고찰로부터 새로 개발된 JN1 GTA용접재가 극저온 및 강자장에서 사용되는 핵 용합로의 구조재료로 사용되기 위해서는 용접금속내에 질소의 용입을 보다 균질하게 분포시킬 수 있는 용접방법의 개발뿐만 아니라 용접 잔류응력의 영향을 포함하여 보다 포괄적이고도 상세한 검토가 필요로 된다고 생각된다.

#### 4. 결론

극저온에서 고강도 및 고인성을 유지하는 오스테나이트계 스테인레스강 JN1 단조재의 GTA용접재의 용접금속 및 용융선 부위의 파괴특성을 조사하기 위해 SP시험을 실시하였다. 그 후 SP시험에서 얻어진  $E_{SP}$ 와 탄소성 파괴인성치  $J_{IC}$ 의 상관관계를 조사하여 SP시험의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 이상의 목적에 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. SP시험으로부터 JN1 GTA용접재의 용접금속의 극저온 파괴특성은 채취위치에 따라 다른 성질을 나타내었다. 특히, 용접루트부의 약 5mm위치에서 채취한 용접금속의 파괴특성은 다른 위치의 용접금속에 비해 현격히 저하된 파괴특성을 나타내었다.
2.  $E_{SP}$ 와  $J_{IC}$ 사이에는 일응적인 대응관계가 성립하였고, SP시험만으로 극저온용 구조재료의 파괴인성의 추정이 가능함을 알았다.
3. 용접금속의 시험편 채취위치에 따른 파괴특성의 차이는 용접금속내에 분포된 질소 함유량의 차이에 기인함을 알았다.
4. JN1 GTA용접재가 핵 용합로의 구조재료로 사용되기 위해서는 용접금속내에 질소의 용입을 보다 균질하게 분포시킬 수 있는 용접방법의 개발뿐만 아니라 용접 잔류응력의 영향을 포함하여 보다 포괄적이고도 상세한 검토가 필요하다.

#### 후 기

본 연구의 일부는 일본 통상산업성 공업기술연구원으로부터 (財)오사카 기술센터 부속 신소재 센터로의 위탁에 의한 「석유대체 전원 신소재의 시험·평가방법의 표준화에 관한 조사연구」 극저온 재료 분과회에서 실시된 것이다. 더불어, 日本 東北大學 故 高橋秀明교수님의 진심어린 명복을 빕니다.

Table 1 Chemical compositions of JN1 forged plate and weld metal of GTA 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 <sup>K</sup>	0.035	0.14	0.05	0.008	<0.001	21.6	24.32	--	0.029	9.0	3.55
Weld metal I-625 <sup>K</sup> M	0.008	0.10	0.15	0.001	0.0004	21.8	24.32	--	0.15	8.50	--

Table 2 Welding conditions for JN1 GTA 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-I625(1.2φ) YT-I625M(1.6φ)

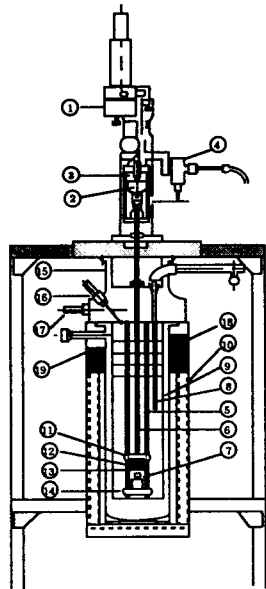


Fig. 1 Cryostat for SP test apparatus.

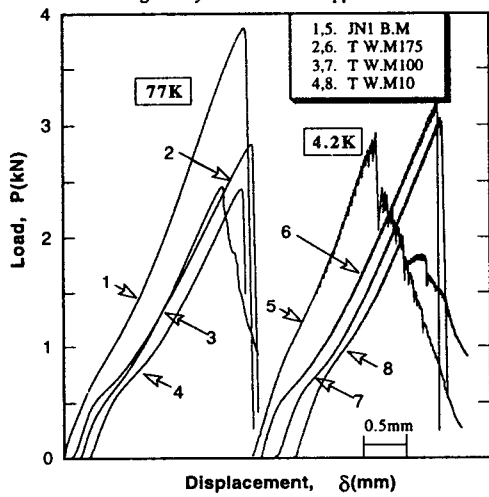


Fig. 3 Load-displacement curves obtained from each of weld metal specimens extracted in GTA weldments of JN1 steel.

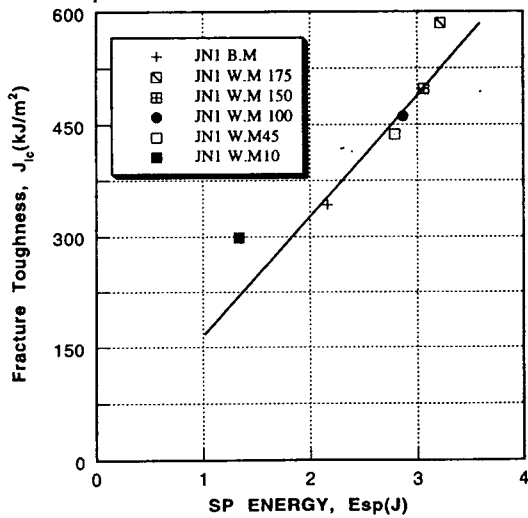


Fig. 5 An extended plot of the correlation between the valid  $J_{Ic}$  and  $E_{SP}$  obtained from the HN1 GTA weldments.

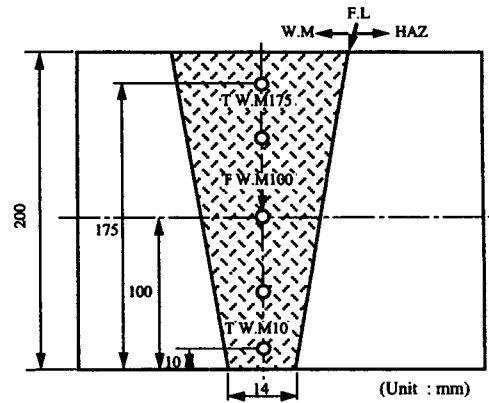


Fig. 2 Location of SP specimen extracted in GTA weldments of JN1 steel.

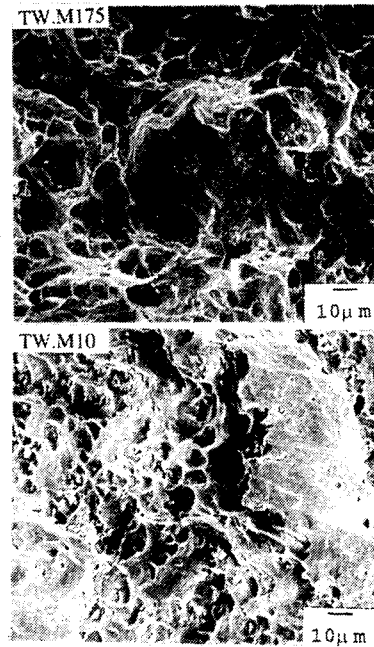


Fig. 4 SEM microfractographs obtained from each of weld metal in GTA weldments.

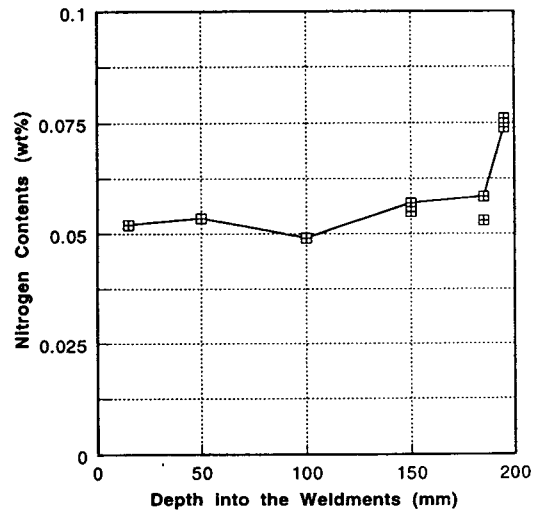


Fig. 6 Nitrogen contents according to depth into the weldments.