

오비탈 용접법을 적용한 STS 316L 파이프 소재의 용접부 특성에 관한 연구

A Study on the Welds Characteristics of Stainless Steel 316L Pipe using Orbital Welding Process

이병우 · 조상명

B. W. Lee and S. M. Joe

(접수일 : 2010년 1월 25일, 수정일 : 2010년 3월 11일, 채택확정 : 2010년 3월 30일)

Key Words : Orbital Welding Process(오비탈 자동용접), Pipe Welds(강관 용접부), Purge Gas(퍼지가스), Ferrite Number(페라이트 번호), Solidification Structure(응고조직) Potentiodynamic Polarization Curve(동전위 분극곡선), Corrosion Current Density(부식전류밀도), Corrosion Rate(부식속도)

Abstract : This paper was studied on microstructure, mechanical properties and corrosion characteristics of 316L stainless steel pipe welds was fabricated by orbital welding process. S-Ar specimen was fabricated by using Ar purge gas and S-N₂ specimen was fabricated by using N₂ purge gas. Ferrite was not detected in weld metal of S-N₂ specimen but the order of 0.13 Ferrite number(FN) was detected in weld metal of S-Ar specimen. Oxygen and Nitrogen concentration of S-N₂ specimen was higher than S-Ar specimen on HAZ and inner bead. The welds microstructural characteristics of S-Ar and S-N₂ specimens are similar. The microvickers hardness values of S-Ar and S-N₂ specimens welds were similar and average values of each regions were in the range of 174~194. The microstructures of S-Ar and S-N₂ weld metal were full austenite by primary austenite solidification. The Solidification structures of S-Ar and S-N₂ weld metal were formed directional dendrite toward bead center. The potentiodynamic polarization curve of STS 316L pipe welds exhibited typical active, passive, transpassive behaviour. Corrosion current density(I_{corr}) and corrosion rate values of S-Ar specimen in 0.1M HCl solution were $0.95\mu A/cm^2$ and $0.31\mu m/year$ respectively. The values of S-N₂ specimen were $1.4\mu A/cm^2$ and $0.45\mu m/year$.

1. 서 론

스테인리스강은 약 12%이상의 크롬(Cr) 성분을 함유하여 산화환경에서 강 표면에 매우 얇고 치밀한 산화층을 형성하여 금속기내로 침입하는 산소를 차단시키는 부동태피막(Passivity Layer)의 역할을 하므로 우수한 내식성을 가지는 강종이다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강은 내식성 및 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 용접성도 양호하여 산업 전반에서 폭넓게 사용되고 있다. 오스테나이트계 스테인리스강으로 분류되는 STS 316L은 STS 304

에 몰리브덴(Mo)의 첨가로 내식성과 공식(Pitting) 저항성이 우수하며, 탄소의 함량을 0.03% 이하로 낮추어 입계부식을 방지하는 성질을 가져 해수설비, 화학공업 장치 및 배관 등의 가혹한 환경에서 주로 사용되고 있다^{1,2)}. 이러한 오스테나이트계 스테인리스강 배관은 일반적으로 자동아크용접이나 레이저 용접 또는 전기저항용접에 의하여 제조되고 있다. 자동아크용접법 중의 하나인 오비탈 용접은 고정된 튜브나 파이프의 원주를 따라 용접토치가 360도 이상 회전하며 자동용접이 되도록 하는 방식의 용접법으로 기계적 성질 뿐만 아니라 외관이 균일하고 우수한 용접부가 요구되는 반도체, 식품,약품, 화학, 고순도 물 또는 가스 순환시스템 등의 고정정 또는 고품질이 요구되는 튜브 및 배관의 용접작업에 널리 이용되고 있는 용접 기술이다³⁾. 오스테나이트

이병우(교신저자) : 부경대학교 신소재공학부
E-mail : leebw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6378
조상명 : 부경대학교 신소재공학부

트계 스테인리스강은 용접성이 매우 양호한 소재이지만 열팽창이 크므로 용접시에 변형이 일어날 수 있으며 또 입계 예민화에 의해 입계부식이 일어날 수 있어 용접시 주의가 필요 하다. 스테인리스강의 용접부는 크롬(Cr), 규소(Si) 등의 페라이트 활성화 원소와 니켈(Ni), 망간(Mn) 등의 오스테나이트 활성화 원소 함량에 따라 용접금속 내에 페라이트가 형성될 수 있으며, 이는 고온의 응고과정에서 정출되어 δ -페라이트라고도 불린다. 용접금속내의 페라이트는 오스테나이트계 스테인리스강의 용접과정에서 Slag 형성의 감소효과와 용접금속에서 발생하는 고온균열(Hot crack)의 억제효과를 가지지만 공식(Pitting)에 대해 저항성이 떨어지므로 내식성의 저하를 가져올 수 있어 오스테나이트계 스테인리스강의 용접부가 가지는 페라이트 함량이 매우 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다⁴⁾. 본 연구에서는 반도체의 집적회로에 토대가 되는 실리콘웨이퍼(Silicon wafer)의 화학적인 가공 공정 설비에 사용되는 STS 316L 파이프 소재의 오비탈 용접부에 대한 특성을 검토하였으며, 오비탈 용접시 안정적인 내면비드형성 및 배관내부에 수분과 산소를 제거하기 위해 사용되는 내면 퍼지가스의 종류에 따른 용접부의 내면비드 및 미세조직 관찰과 경도시험, 전기화학적 분석시험 등을 실시하여 기계적, 전기화학적 특성을 비교 분석하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 및 용접조건

실험에 사용된 STS 316L 파이프 소재는 ASTM 규격⁵⁾에 알려진 조성과는 다소 차이가 있었으며 Table 1에 해당 소재의 화학조성을 나타내었다. 특히 스테인리스강의 기지 조직을 결정하는 주요 성분원소중의 하나인 Ni의 함량은 표준 규격보다 약 0.5% 정도 높았다. 시험편은 (주) DOE에서 제공한 1.0mm 두께 및 1/2inch 직경의 STS 316L 파이프 소재를 맞대기 하여 오비탈 용접법을 적용 하였으며 아르곤 가스 및 질소 가스를 내면 퍼지가스로 사용하였고 각각 S-Ar 및 S-N₂의 두 가지 시험편으로 구분하였다. 각 시험편에 대해 아크길이(1.0mm), 백실드가스압력(75mmH₂O), 용접시간(28sec)의 조건은 동일하게 하였으며 각각의 시험편에 대한 용접 조건들은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of 316L stainless steels (wt.%)

Specimen	Cr	Ni	Mo	Mn	P	S	Si	C
STS 316L	17.5	14.5	2.50	0.05	0.04	0.002	0.20	0.02

Table 2 Welding conditions

Specimen	Pulse freq.	Pulse Current	Base Current	Avg. Current	Avg. Voltage	Purge gas purity	
						H ₂ O	O ₂
S-Ar	28Hz	59.1A	27.8A	36.2A	9.2V	10ppb	10ppb
S-N ₂	27Hz	58.9A	29.6A	35.6A	11.2V	45ppb	65ppb

2.2 페라이트 함량측정

오스테나이트계 스테인리스강의 용접금속이 가지는 고온정출상인 δ -페라이트는 용접금속의 응고균열 및 내식특성에 영향을 미친다고 알려져 있어 오비탈용접 된 파이프 소재의 용접부 페라이트의 함량을 아는 것은 중요하다. 따라서 페라이트가 가지는 자기적 특성을 이용하는 페라이트 함량(Ferrite number, FN) 분석⁶⁾을 실시하였다. 페라이트 함량 측정기(Ferrite scope)는 독일 Fischer사의 MP-30ES 장치를 사용하였으며 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 페라이트 함량을 정밀하게 측정하기 위해 영국용접연구소(TWI)에서 보증된 표준시험편 N-3315으로 보정하여 사용하였으며, 시험편에 대한 측정위치는 Fig. 2에 나타나 바와 같이 외면 및 내면에서 각각 5회씩 측정하여 그 평균값을 구하였다.

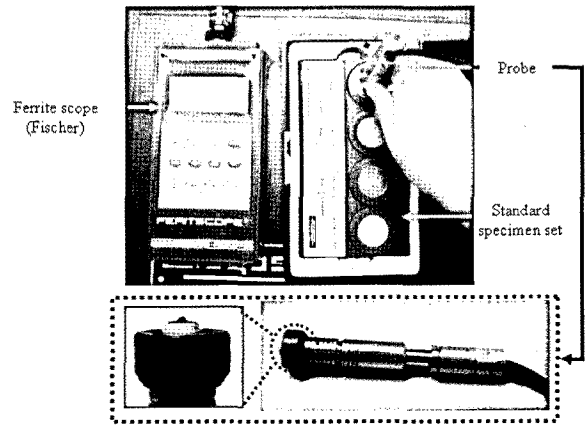


Fig. 1 Apparatus of ferrite scope used in experiment

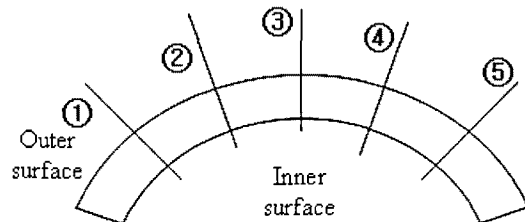


Fig. 2 Schematic of measurement point for ferrite number

2.3 용접부 조직관찰 및 경도측정

용접부의 조직관찰 및 경도 측정을 위해 각 시험편의 용접부를 중심으로 하여 미세절단기로 20mm 길이로 절단하였으며, Fig. 3에 나타난 절단된 시험편을 경화수지로 열간 마운팅하여 용접부의 횡단면에 대해 조직관찰 및 SEM/EDX 분석과 마이크로비커스 경도시험을 실시하였다. 경도시험은 200g의 시험하중으로 모재 내면의 200 μ m 깊이에서 경도를 측정하였으며 압흔간의 간격은 300 μ m로 하였다.

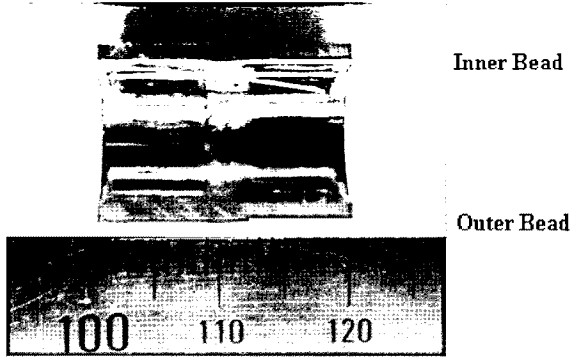


Fig. 3 The cross section of specimen

2.4 동전위 분극시험

동전위 분극시험은 Gamry사의 DC105PC 분극 실험장치를 이용하였으며, 기준전극(Reference electrode)으로는 포화칼로멜전극(SCE)을 사용하였고 보조전극(Counter electrode)으로 고밀도탄소봉을 사용하였다. 시험편의 표면은 별도의 연마처리는 하지 않았으며, 부식환경에 노출되는 용접부의 내면비드 부분에서 3.14mm²의 단면적만이 수용액에 노출 되도록 하였다. 유효단면적 이외의 부분은 수용액에 노출되지 않도록 시험편 전체 및 연결부위를 실리콘으로 매입하여 사용하였다. 0.1M의 HCl 수용액을 Ar가스를 주입하여 10분간 탈기처리 후 시험용액으로 사용하였으며, 시험 전 개방회로 상태에서 10분간 유지 후 부식전위를 측정하고 3mV/sec의 주사속도로 상온에서 동전위 분극시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 페라이트 함량분석

STS 316L 파이프 소재의 모재에 대한 페라이트 함량측정 결과 S-Ar과 S-N₂ 시험편 모두 0 FN이 나왔으며, 용접부에 대한 측정 결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 S-Ar 시험편에서만 외면과 내면비

드에서 각각 평균 0.122 FN, 0.144 FN으로 미량의 페라이트가 검출 되었다.

Table 3 The results of ferrite number measurement by ferrite scope MP-30ES (Unit : FN)

Specimen	Surface	①	②	③	④	⑤	Avg.
S-Ar	외면	0.14	0.10	0.13	0.10	0.14	0.12
	내면	0.17	0.18	0.12	0.13	0.12	0.14
S-N ₂	외면	0	0	0	0	0	0
	내면	0	0	0	0	0	0

오스테나이트계 스테인리스강 용접시 용접금속의 응고 마지막 단계에서 덴드라이트 경계에 액상의 막이 존재 하게 되면 인장응력에 의해 액상막(Liquid film)이 찢어지면서 균열이 발생하게 되며, 이러한 응고균열(Solidification crack)은 오스테나이트 조직의 용접금속에 페라이트가 생성되면 억제된다고 알려져있다.⁷⁾ 페라이트의 응고균열 감소효과는 오스테나이트보다 페라이트의 열팽창계수가 작아 응고수축에 의해 발생하는 응력이 작기 때문이며 또한 저융점 개재물을 형성하는 S, B, P 등의 불순물 원소에 대한 고용도가 높아 액상막의 존재를 감소시키기 때문이다. 그러므로 S-Ar 시험편은 약 0.13 FN의 페라이트 함량을 가지지만 내면 퍼지가 스로 질소를 사용한 S-N₂ 시험편은 용접금속 내에 페라이트 함량이 전혀 없어 응고균열의 발생 가능성이 높을 것으로 생각된다.

3.2 용접부 비드 관찰 및 미세조직 특성

오비탈용접 된 STS 316L 파이프를 절단하여 용접부의 내면비드 표면을 육안으로 관찰한 결과 슬래그(Slag)는 관찰되지 않았으며, 파이프 내면의 열영향부(HAZ)와 용접비드에 걸친 1mm×1mm 면적에 대한 EPMA 분석결과를 Fig. 4에 나타내었다. S-Ar 시험편을 기준으로 질소(N) 및 산소(O)농도를 비교한 결과 S-N₂ 시험편의 질소 농도가 약간 높게 나타났으며, 산소(O) 농도역시 S-Ar 시험편보다 미량 검출되었다. 각 시험편의 용접부 횡단면을 광학 현미경으로 관찰한 미세조직사진을 Fig. 5에 나타내었다. S-Ar 시험편은 외면비드가 약 4mm, 내면비드가 약 3mm의 크기를 가지고 S-N₂ 시험편은 외면비드가 약 3mm 내면비드가 약 2mm의 크기를 가져 S-Ar 시험편이 S-N₂ 보다 비드가 크게 생성되어 있으나 내면퍼지가스에 의한 영향은

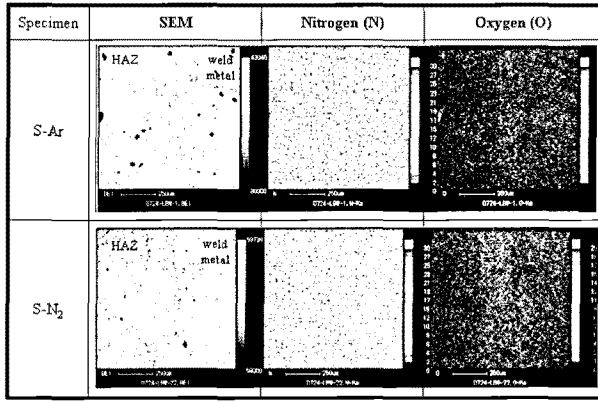


Fig. 4 EPMA analysis of inner bead surface

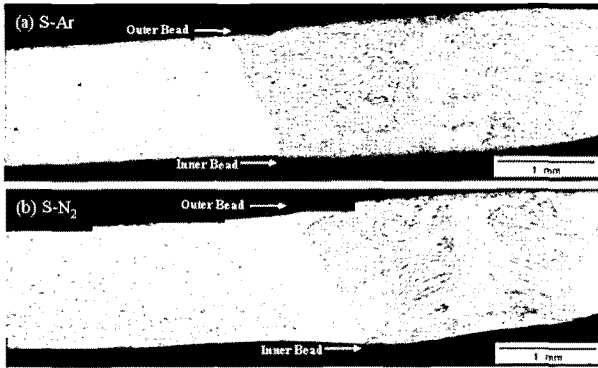


Fig. 5 Microstructure of STS316L welds
(a) S-Ar (b) S-N2

아닌 것으로 생각된다. 일반적으로 비드 폭의 크기 변화는 용접조건(텅스텐 전극형상, 아크길이 등)의 영향을 크게 받을 수 있는 것으로 알려져 있다.⁸⁾

S-Ar과 S-N₂ 시험편의 용접부 조직이 가지는 전체적인 경향은 유사한 것으로 생각되며 크게 모재, 열영향부, 용접금속의 세 가지 영역으로 구분할 수 있다. 용접부 조직의 모재는 오스테나이트 조직이며, 열영향부는 조대화 된 오스테나이트 조직이 약 1mm 이하의 크기로 형성되어 있다. 용접금속은 모재의 오스테나이트 결정립으로부터 적층성장 하여 용접금속의 중심부를 향하는 방향성을 가지고 있는 것으로 관찰된다. 냉각속도에 따라 모재와 접촉하는 부분에서 Globular 형태의 조직을 시작으로 중심부를 향하는 Dendrite 조직으로 나타났으며, 중심부에 가까울 수록 Cell 형태의 조직을 가지는 것을 알 수 있었다. Hammer & Svensson의 식 (1)과 (2)를 통해 Cr과 Ni 원소의 당량비를 구하여 Cr_{eq}/Ni_{eq} 값에 따라 용접금속의 응고 양식을 예측할 수 있다.

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.37 \times \%Nb + 1.5 \times \%Si + 2 \times \%Mo + 3 \times \%Ti \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 0.31 \times \%Mn + 22 \times \%C + 14.2 \times \%N + 1 \times \%Cu \quad (2)$$

Cr_{eq}/Ni_{eq} 값이 약 1.50 이하이면 초정 오스테나이트 응고가 일어나게 된다.^{9,10)} S-Ar과 S-N₂ 시험편의 화학조성에 따라 Cr_{eq}/Ni_{eq} 값을 구하면 약 1.3의 값을 가지므로 용접금속은 모두 초정 오스테나이트 정출에 의해 응고 된 오스테나이트 조직으로 생각된다. 페라이트 안정화 원소인 Cr 등은 마지막으로 응고하게 되는 용접금속의 중심부로 밀려나게 되어 이들 원소의 함량이 증가하여 페라이트가 생성된다면 용접금속 중심부에 존재할 수 있을 것이라 예상되므로 용접금속 중심부의 결정입내 및 입계에 대해 SEM 관찰 및 EDX 분석을 실시한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

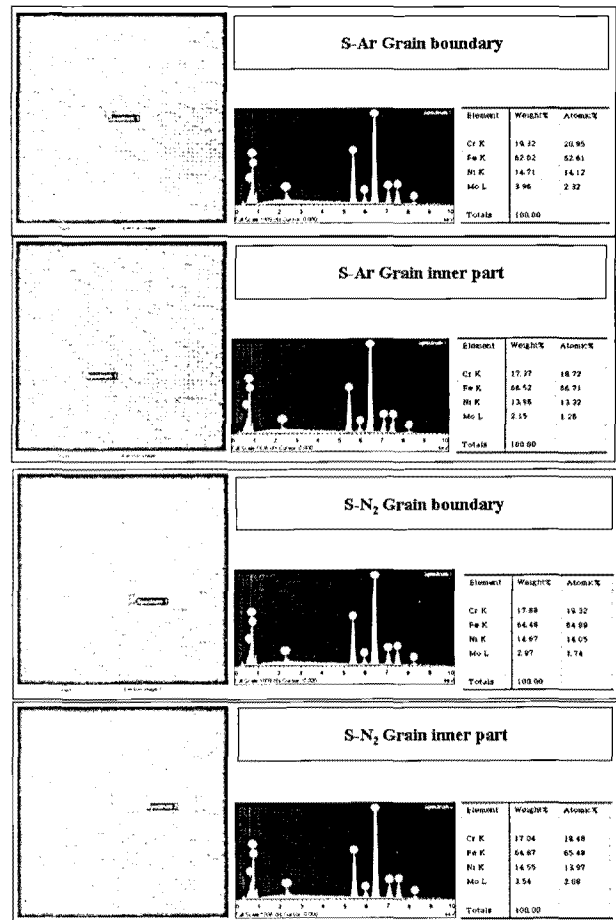


Fig. 6 SEM micrograph and EDX analysis of the central area in weld metal

S-N₂ 시험편은 결정입계 및 입내에서 모재의 함량과 거의 유사한 Cr 함량을 가졌고, S-Ar 시험편은 결정입계에서 Cr의 함량이 약 19.3%로 입내 및 모재보다 약 2%정도 높은 값을 나타내어 오스테나이트 결정입계에 페라이트의 생성 가능성이 있을 것으로 생각되나 조직적으로는 확연히 구분할 수

없었다.

3.3 용접부 경도분포 특성

각각의 시험편에 대해 내면비드표면 하의 200 μ m 깊이에서 모재, 열영향부, 용접금속의 각 영역에 대한 경도측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

S-Ar과 S-N₂ 시험편 모재의 평균 경도값은 각각 180, 175의 값으로 유사하였고, 열영향부 또한 각각 179, 185로 유사한 값을 가졌다. 용접금속은 각각 194, 174의 값으로 S-Ar 시험편이 약 20정도 높은 값을 나타내었는데 이는 용접금속의 경도측정 부위의 Cellular 또는 Dendrite 등의 미세한 응고 조직적 특성에 의한 것으로 생각된다.

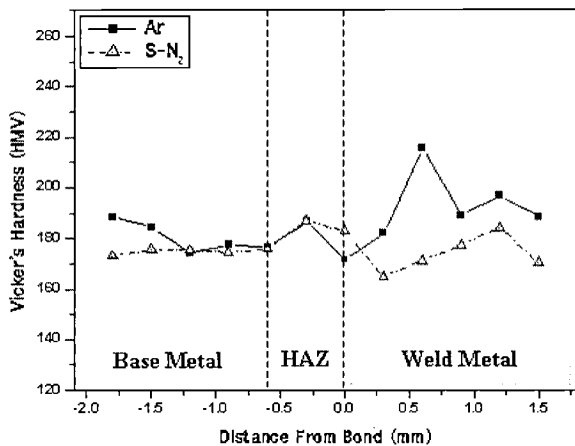


Fig. 7 Distribution of micro vickers hardness of STS 316L welds

3.4 모재 및 용접부의 전기화학적 부식특성

Fig. 8과 Fig. 9는 S-Ar 및 S-N₂ 시험편 각각의 모재와 용접부를 상온의 0.1M HCl 수용액에서 동전위 분극시험에 의한 분극곡선을 나타낸 것이다. 분극곡선은 오스테나이트계 스테인리스강에서 볼 수 있는 활성화, 부동태, 부동태 천이 영역을 나타내었다.¹¹⁾

Table 4는 각각의 분극곡선으로부터 부식전위 (E_{corr}), 부식전류밀도(I_{corr}), 타펠외삽법에 의한 부식속도(Corrosion rate) 값들을 나타낸 것이다. 316L 스테인리스 파이프 모재의 부동태 파괴전위(E_b)는 두 시험편 모두 0.75~1.0V 사이에서 발생하고 있으며, 부식전위(E_{corr})값은 S-Ar 시험편의 경우가 S-N₂ 시험편 보다 약 42mV 낮은 값을 가진다. 이는 S-Ar 시험편 모재의 초기 부식활성 정도가

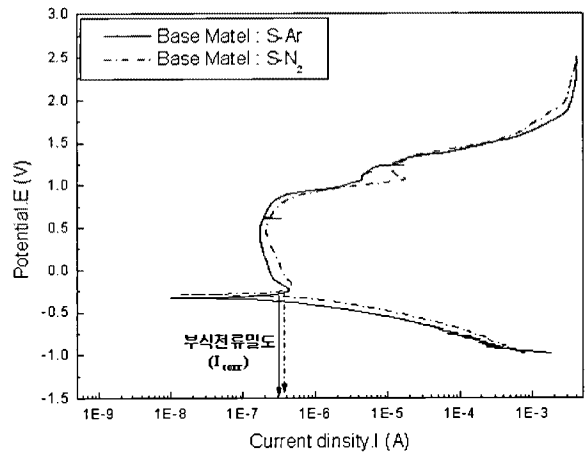


Fig. 8 Potentiodynamic polarization curves of base metal in 0.1M HCl solution

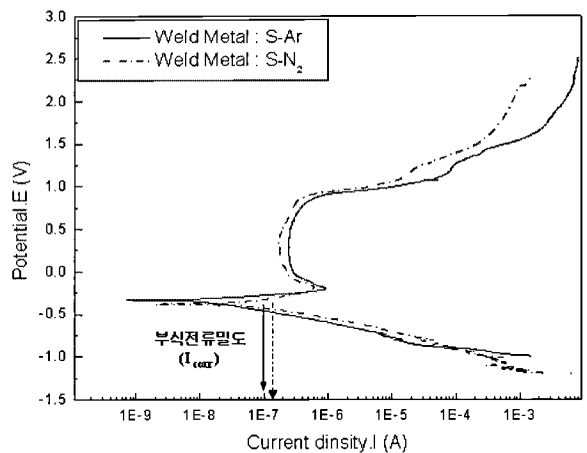


Fig. 9 Potentiodynamic polarization curves of weld metal in 0.1M HCl solution

Table 4 Electrochemical parameters of STS 316L derived from polarization curves in 0.1M HCl solution

Specimen		E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	Corrosion rate (μ m/year)
Base metal	S-Ar	-330	0.23	0.77
	S-N ₂	-288	0.28	0.92
Weld metal	S-Ar	-344	0.95	0.31
	S-N ₂	-381	1.4	0.45

S-N₂ 시험편보다 높다고 생각 할 수 있다. 그러나 타펠 외삽법에 의한 부식속도와 직접적 관련이 있는 부식전류밀도(I_{corr})값은 S-Ar 시험편이 약 $5 \times 10^{-2} \mu$ A의 낮은 값을 가졌고, 부식속도는 약 0.15 μ m/year 낮은 값을 가져 S-Ar 시험편의 모재가 S-N₂ 보다 유리한 내식성을 가질 것으로 생각된다.

용접부의 부동태 파괴전위(E_b) 또한 0.75~1.0V로 모재와 동일한 값을 가졌다. 부식전위(E_{corr})값은 S-Ar 시험편이 S-N₂ 시험편보다 약 37mV 큰 값을 가져 용접부는 S-N₂ 시험편이 초기 부식활성 정도가 더 높다고 생각된다. 부식전류밀도(I_{corr}) 및 부식속도 또한 S-Ar 시험편이 약 $5 \times 10^{-2} \mu A$, 약 0.14 $\mu m/year$ 낮은 값을 가져 S-Ar 시험편의 용접부가 S-N₂ 용접부보다 유리한 내식성을 가진 것으로 생각할 수 있다.

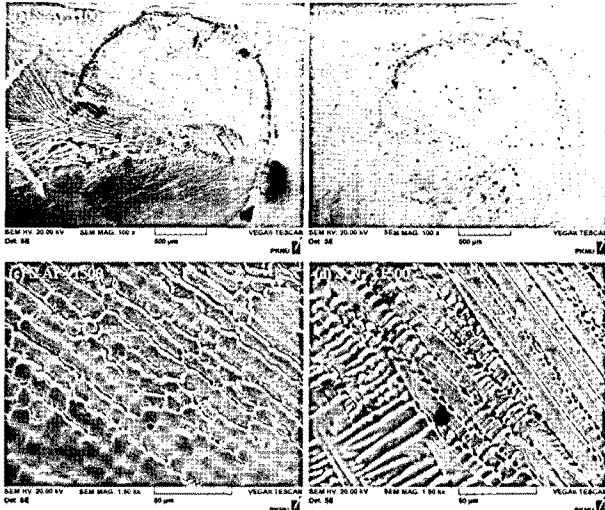


Fig. 10 SEM micrographs of STS 316L weld metal after potentiodynamic polarization test

Fig. 10은 S-Ar과 S-N₂ 시험편의 용접금속을 0.1M HCl 수용액에서 부동태 전위가 일어나는 2.5V 까지의 전압을 인가하여 동전위 분극시험을 한 후 수용액에 노출된 표면 부위를 전자 주시식 현미경을 통해 관찰한 것이다. (a)와 (b)는 100배 배율의 사진으로 두 시험편 모두 마킹 테이프가 부착되어 있던 원형의 틈에서 국부적인 부식이 관찰되었다. 이것은 마킹 테이프의 접착 틈에서 시험편 표면의 농도차가 일어나게 되어 발생하는 틈부식(Crevice corrosion)으로 생각된다. 또 두 시험편 모두 용접금속의 비드 중앙부위에서 집중적으로 부식이 진행되어 있는 것을 관찰할 수 있다. (c)와 (d)는 비드 중앙부위의 집중적인 부식이 일어난 부분을 1500배 배율로 관찰한 사진으로 S-Ar과 S-N₂ 시험편 모두 용접금속내의 결정입계를 따라 선택적으로 우선 부식이 일어난 것을 알 수 있으며, 공식과 함께 부식이 진행된 것을 확인할 수 있다. 이것은 동전위 분극시험 과정에서 부동태 전위가 일어나는 2.5V의 높은 영역까지 전압을 인가하였기 때문이라

생각되며, 특히 S-N₂ 시험편의 부식정도가 더욱 심한 것으로 관찰된다.

4. 결 론

STS 316L 파이프 소재의 오비탈 용접시 Ar 및 N₂ 가스를 내면퍼지가스로 사용한 파이프 용접부의 미세조직 관찰, 경도시험, 전기화학적 분극시험 등의 각종 물성시험 결과로 다음과 같은 결론을 나타내었다.

1. 페라이트함량 측정결과 STS 316L 파이프소재의 오비탈 용접시 내면퍼지가스로 Ar 가스를 사용한 경우 용접금속 내에 미량의 페라이트가 검출되어 N₂ 가스를 사용한 경우보다 고온균열의 발생가능성이 낮을 것으로 예상된다.

2. 용접부의 횡단면을 관찰한 결과 STS 316L 파이프 소재의 용접금속은 S-Ar과 S-N₂ 시험편 모두 모재로부터 적층성장하여 중심부를 향해 방향성을 가지는 덴드라이트 응고조직 거동을 나타내었고, S-Ar과 S-N₂ 시험편의 모재, 열영향부 및 용접금속 각각의 평균 경도 값은 유사하였다.

3. 열영향부와 용접비드의 EPMA 분석결과 S-N₂ 시험편이 S-Ar 시험편 보다 질소(N) 및 산소(O)의 농도가 약간 높게 나타나 내면퍼지가스로 Ar 가스를 사용하는 것이 보다 청정한 내면 용접부를 가진 것을 알 수 있었다.

4. 0.1M HCl 수용액에서 S-Ar과 S-N₂ 시험편의 모재 및 용접부 모두 분극곡선은 오스테나이트계 스테인리스강에서 나타나는 전형적인 활성화-부동태 특성을 나타내었다. 부식전위, 부식전류, 부식속도의 값을 종합적으로 비교한 결과 내면퍼지가스로 Ar 가스를 사용한 경우 N₂가스를 사용한 용접부보다 유리한 내식성을 가진 것으로 생각된다.

5. 0.1M HCl 수용액에서 부동태 전위가 일어나는 2.5V까지의 전압을 인가하여 동전위 분극시험 후 시험편 용접금속 표면의 SEM 관찰결과 두 시험편 모두 중심부 쪽으로 우선 부식되는 현상을 나타내었으며 공식과 함께 결정입계를 따라 부식이 진행된 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. J. R. Davis. et al., "ASM Specialty Handbook. Stainless Steels.", 1996, 2nd edi.. The

- Materials Information Society, pp. 13-37.
2. Stanley C. Theobald. et al., "Metal Handbook Volume 13A.", 2003, ASM International, pp. 257~301.
 3. I. C. Jung and D. N. Sim, 2004, "The use of orbital TIG welding process for the construction and the repair of field piping", Proceeding of KWS spring conference, Jeju, pp. 27~29.
 4. Y. H. Moon and S. D. Huh, 1987, "A Factor of Delta-Ferrite formation in Austenitic stainless steel welds", J. of KWS, Vol. 5, No. 1, pp. 19~22.
 5. Edward L. Langer. et al., "Metal Handbook Volume 1.", 1990, 10th edi. ASM International, pp. 841~858.
 6. KS B 0524, 2002, "Determination of Ferrite number(FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel weld metals", pp. 1~7.
 7. Sindo Kou, "Welding metallurgy", 1987, JOHN WILEY & SONS, INC. pp. 211~236.
 8. M. H. Kim. et al 2002, "The inference System of Bead Geometry in GMAW", J. of KSIA, Vol. 5, No. 2, pp. 111~118.
 9. J. S. Lee and S. H. Kim, 1998, "A Study of Metallurgical Phenomena in Austenitic Stainless Steel Fusion Welds(1)", J. of KWS, Vol. 16, No. 3, pp. 239~248.
 10. Erich Folkhard, "Welding Metallurgy of Stainless Steels", 1988, Springer-Verlag pp, 52~102.
 11. B. W. Lee, D. K. Lee, H. S. Kim and S. H. Hong, 2009, "The Welds Characteristics of 200 Grade Stainless Steel with Street pole Material", J. of KSPSE, Vol. 13, No. 3, pp. 33~39.