

ERW 강관 용접부의 홈부식거동에 미치는 입열량의 영향

The Effect of Heat Input on Grooving Corrosion Behavior in the Welds of Electric Resistance Welding Steel Pipe

이병우 · 이재식 · 박화순
B. W. Lee, J. S. Lee, H. S. Park

Key Words : Grooving Corrosion(홈부식), Electric Resistance Welding(ERW, 전기저항용접), Grooving Factor(홈부식인자), Corrosion Potential(부식전위), Cyclic Polarization(주기적분극)

Abstract : The microstructure and electrochemical analysis of welds of electric resistance welding(ERW) pipe were investigated. The direction of metal flow line in HAZ of ERW pipe shifted to the inner(or outer) surface of pipe by plastic deformation during welding. The lowest heat input welds of ERW pipe was showed crack by liquid penetrant testing. Accelerated corrosion test by constant current density of 20mA/cm² developed groove at the welds of ERW pipe and the measured grooving factors were about 1.2~1.5. Corrosion potential of base metal obtained by cyclic polarization in artificial sea water(3.5wt.% NaCl solution) was 100mV higher than that of weld metal of ERW pipe.

1. 서 론

홈부식(grooving corrosion)이란 전기저항용접(ERW: Electric Resistance Welding)법으로 제조된 강관에서 흔히 발생하는 부식의 형태이다. ERW 강관(전기저항 용접강관)은 가스관, 수도관, 열교환기용 튜브, 유정용 및 구조용으로 널리 사용되고 있다. 특히 해수, 공업용수, 냉각수 또는 음용수 등의 배관용으로 사용 할 경우 시공조건이나 환경, 유체의 종류 및 성질 등에 따라 용접부가 선택적으로 "U" 또는 "V"형의 홈 모양으로 심하게 부식되는 현상을 말한다.^{1,2)} 강관의 홈부식은 오래전부터 알려져 왔으나 녹물발생 및 누수 등의 문제로 사회적 관심을 끌게된 것은 강관 제조법이 단접법(CBW)에서 전기저항용접법(ERW)으로 변경된 1970년대 이후이다.

홈부식으로 인한 강관의 누수현상은 황함유량이 다소 높은 일본 및 동남아 지역에서는 홈부식 사례가 많으나 비교적 고청정강을 사용하는 미국과 유

럽 국가에서는 홈부식 사례가 많지 않다.³⁻⁵⁾ 우리나라에서도 1985년 이후에 알려지기 시작하여 1990년 초부터 대규모 아파트 단지의 녹물 발생 등의 문제가 야기되기 시작하였다. 홈부식은 해수에서 가장 용이하게 발생하고 냉각 순환수, 공업용수 및 음용수 배관에서도 많은 부식 사례가 보고되었다. 홈부식의 발생인자는 수용액의 종류(해수, 하천수, 음용수, 산성수 등), pH, 염소이온농도, 용존산소, 온도 및 유속 등 환경인자에 의해 영향을 받는다. 그 중에서 가장 큰 영향을 미치는 합금원소 인자로서는 탄소강에 함유된 황 함유량이 홈부식에 지대한 영향을 주는 것으로 밝혀져 최근에는 황 함유량을 0.005wt.% 이하로 감소시키고 Ni 및 Cu를 복합적으로 첨가하고 소량의 희토류 원소(REM)를 첨가한 고청정 내식탄소강 소재가 개발되었다.⁶⁾ 우리나라도 고청정 내식성 수도용 강관(PACOS2)을 개발하여 급수용 강관에 사용하도록 1993년 10월 이후 KS 규격으로 제정하였다. 또 다른 인자로서 용접 후 열처리를 들 수 있는데 일반적으로 소둔 온도를 증가함에 따라 부식 감수성을 저하시키는 경향이 있으나, 황 함유량이 약 0.02wt.% 이상인 탄소강을 700~800℃ 온도범위에서 열처리하면 홈부식이 촉진된다는 연구 보고가 있으며 황 함유량이 많은 탄소강은 후열처리 효과가 낮고 경제적으로나 품질면에서 바람직하지 못하다.⁷⁾

접수일 : 2007년 4월 19일, 채택확정 : 2007년 7월 3일
이병우(책임저자) : 부경대학교 신소재공학부
E-mail : leebw@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1661
이재식 : 주)성도 기술연구소 소장
박화순 : 부경대학교 신소재공학부

본 연구에서는 용접 입열량을 변화시켜 시험 제작한 ERW강관(KS; 40A)에 대하여 용접부의 조직학적 관찰, 비파괴시험에 의한 결함분석, 흠부식시험 후 강관의 부식상태 관찰 및 양극분극시험 후의 전기화학적 분석 등을 통하여 용접부의 흠부식에 미치는 입열량의 영향에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험제작 강관 재료의 화학성분

Table 1은 시험제작한 강관 재료의 화학성분을 측정한 결과이다. KS규격 및 JIS규격 배관용 탄소강관의 화학조성은 S와 P의 양을 0.04wt.% 이하로 규정하고 있으며, 강관제작에 사용된 재료의 화학성분은 P는 약 0.017wt.%였고 S은 약 0.0064wt.%로서 규격 규정치인 0.04wt.% 이하이므로 KS규격의 SPP강관 화학성분 범주에 해당된다.

Table 1 Chemical composition of ERW pipe

ERW pipe	Chemical composition (wt.%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ni	Cr	Fe
	0.037	0.008	0.212	0.017	0.0065	0.009	0.029	0.002	0.007	bal.

2.2 ERW 용접조건

본 실험에서 제작한 강관은 40A(외경: 48.6mm, 두께: 2.8mm)로서 제작시의 용접조건은 실제로 현장에서 일반적으로 사용하는 적정입열 조건인 용접전압 9.5KV, 용접전류 16A, 용접속도 48m/min로 하였다. 또한 용접 입열량에 따른 용접부 미세조직 및 균열현상 등을 비교·검토하기 위하여 적정 입열량을 기준으로 약 3% 및 7%가 더 높은 고입열 2 종류의 조건과 3%, 5% 및 7%가 더 낮은 저입열 3 종류의 조건을 적용하였다. 용접 입열량의 변화는

Table 2 Welding conditions of ERW pipes

Welding conditions	Welding variations			
	Welding voltage(KV)	Welding current(A)	Welding speed(m/min)	Heat input(%)
1	10.2	16	48	107
2	9.8	16	48	103
3	9.5	16	48	100
4	9.2	16	48	97
5	9.0	16	48	95
6	8.8	16	48	93

용접전압을 변화시켜 조절하였는데, 용접전류는 용접전압의 변화에 따라 비교적 미소하게 변화하므로 편의상 16A로 일정하게 취급하였으며, 용접속도도 일정하게 유지하였다. 이때 사용한 각각의 용접조건을 Table 2에 나타내었다.

2.3 용접부 결함 검사와 용접부 및 모재의 조직 관찰방법

각각의 용접조건으로 제조된 강관의 내·외부에 형성된 비드는 용접직후 제거하였다. 또한 제조가 완료된 강관 용접부에 대하여 액체침투탐상검사(PT) 및 방사선투과검사(RT)를 실시하였다. 용접된 강관 용접부의 조직관찰을 위하여 강관 길이방향에 수직하게 절단하여 용접부를 채취하였으며, 채취 용접부를 에폭시수지로 마운팅하여 경면 연마하였다. 용접부 및 모재 단면의 매크로 조직을 2% 나이탈(nital) 용액 및 피크랄(picral) 용액으로 에칭을 하여 관찰하였고 각 부 미세조직의 경우도 매크로조직과 동일한 방법으로 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였고 용접부에 일부 발생한 균열의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 또한 용접중심부(용접금속) 근방의 특정성분의 편석을 확인하기 위하여 EPMA 분석을 실시하였다.

2.4 흠부식 실험 및 부식시험

강관의 모재부와 용접부의 흠부식 거동 및 전극전위를 알아보기 위해 입열량에 따라 ERW강관의 용접부 단면과 모재가 부식 환경에 노출될 수 있게 시편을 채취하여 실험 하였다. 흠부식 실험은 부식액으로 3.5wt.% NaCl 수용액을 사용하여 상온에서 DC전원을 이용하여 정전류로 실험을 수행하였고, 부식시험은 Gamry사 DC 105 system 을 이용하였으며 모재와 용접부를 절단 분리한 시편을 에폭시수지로 마운팅하여 연마한 후 각각의 시편을 1시간 이상 3.5wt.% NaCl 수용액에 침적시켜 자연전극전위를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 적정입열 조건으로 용접한 강관의 조직

Fig. 1은 적정입열(9.5KV) 조건으로 용접한 소재강관의 용접부 근방의 단면 매크로 조직 및 미세조직을 나타낸 것이다. 그림 중심의 백색 부분이 용접 금속이며 양 모재측에 점선으로 표시한 것은 열영

향부와 모재의 경계를 대략적으로 나타낸 것이다. 용접금속으로 보여지는 영역의 폭은 일반적인 용접과 달리 하나의 선으로 보일 정도로 매우 좁게 나타나고 있는데, 이러한 것은 순간적으로 가열되어 용융된 용액이 가압력에 의하여 관의 내부 또는 외부로 밀려나와서 비드를 형성하게 되고, 따라서 극히 적은 양의 용액만이 용접중심부(용접금속)를 형성하는 전기저항용접(ERW)의 특성이다. 그리고 용접직후 강관 제작단계에서 내부 및 외부에 생성된 비드를 제거한 상태에서 강관의 내부 또는 외부에 용접균열이나 용입불량 등의 용접 결함은 관찰되지 않는다. 또, 모재의 미세조직(a)은 비교적 균질하게 분포되어 있는 페라이트(ferrite)와 그 입자 사이에 미세하게 펄라이트(pearlite)가 혼재한 형태를 보이고 있다. 강관 용접부는 급열과 급냉의 열이력을 받기 때문에 열영향부 및 용접금속의 미세조직은 모재의 조직과는 다른 조직을 가진다. 열영향부의 조직은 모재 및 용접금속과 인접한 곳에 따라 약간의 차이가 있다. 모재근방의 열영향부 조직(b)은 모재에 비하여 조대한 페라이트와 일부 펄라이트로 구성되어 있으며, 용접금속 인접 열영향부 조직(c)은 모재근방의 열영향부보다 더 미세한 침상 페라이트와 widman-stätten조직으로 구성되어 있다. 용접금속 조직(d)은 페라이트 결정립이 열영향부보다 조금 더 미세하지만 전반적으로 인접 열영향부의 조직(c)과 거의 유사한 형태를 나타내고 있다. Fig. 2는 모재 및 용접부에서의 층상조직(metal flow) 및 응고조직을 관찰하기 위하여 피크랄(picral) 용액으로 에칭한 것이다. 모재, 열영향부 및 용접중심부의 각 영역에서 metal flow가 잘 관찰되고 있으며, 모재층의 경우 시험편 표면과 평행하게 발달되어 있고, 열영향부 및 용접중심부에서는 용접중의 가압력에 의하여 굴곡되어 나타나 있다. 특히 두께 방향의 중간 위치(a)에 보이는 진하게 나타나는 metal flow 선은 강관의 제조과정에서 특정성분의 중앙편석에 기인한 것으로서 다른 부위보다 더 심하게 에칭되어 검고 진하게 보이는 것이다.

이러한 각 편석부의 성분을 알아보기 위하여 용접중심부의 편석부와 metal flow가 모여 있는 Fig. 2의 (a)지점을 EPMA로 면분석하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. EPMA 분석결과에서는 metal flow를 따라서 S, Mn 및 P 성분의 편석이 미량 확인되지만, 용접중심부에서는 특정 성분의 편석이 관찰되지 않았다. 이것은 시험편을 장시간 에칭한 과정에서

편석성분들이 모두 용해되어 제거되고 철 탄화물만이 용접부에 잔류된 것으로 생각된다.

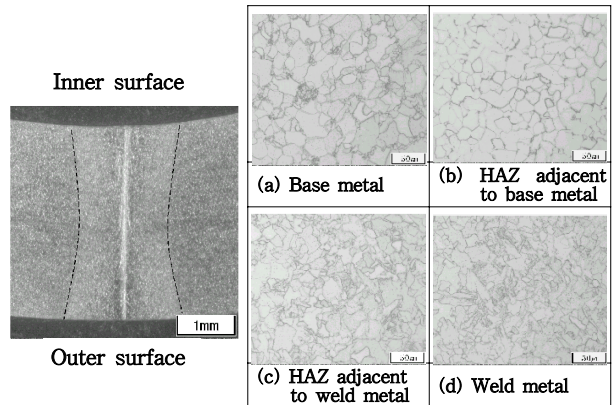


Fig. 1 Cross sectional macro structure and microstructures of ERW pipe with 9.5KV heat input

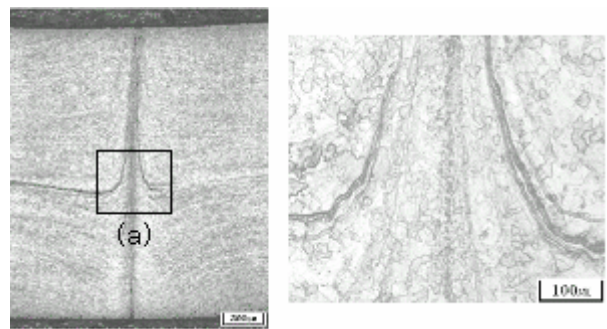


Fig. 2 Cross sectional view of ERW pipe showing metal flow line of the weld, etched in picral

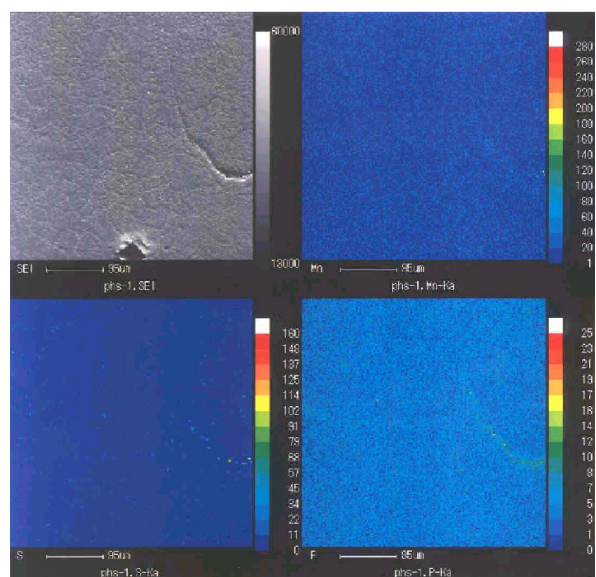


Fig. 3 EPMA analysis at flow line of weld metal

3.2 고입열과 저입열 조건으로 용접한 강관의 조직 및 그 특성

고입열과 저입열 조건으로서 용접입열에 따른 용접부에서의 각종 변화를 관찰한 결과, 강관의 용접부 형상불량 등의 외관상 특이한 사항은 관찰되지 않았다. 특히 고입열에서는 열영향부의 폭이 약간 증가 하였으나 저입열에서는 입열량이 감소하더라도 현저한 열영향부 폭 변화는 관찰되지 않았으며, 적정 입열 조건에서의 열영향부 폭과 비슷하여 용접 입열에 따른 열영향부의 폭 변화의 연관성을 찾을 수 없었다.

Fig. 4는 고입열(10.2KV)과 저입열(9.0KV) 조건으로 용접한 강관 각부의 미세조직을 나타낸 것으로서, 열영향부의 조직은 적정입열 조건으로 용접한 경우와 거의 유사하다. 그러나, 고입열 용접중심부의 조직은 적정입열 조건의 경우에 비하여 결정립이 약간 조대해진 것을 알 수 있는데, 이것은 입열량이 증가함에 따라 가열온도가 높아진 결과라 할 수 있는 것이다. 저입열 조건에서의 모재 및 용접부의 미세조직은 열영향부를 비롯한 용접중심부 각각의 미세조직은 적정입열 조건의 경우와 유사하였다.

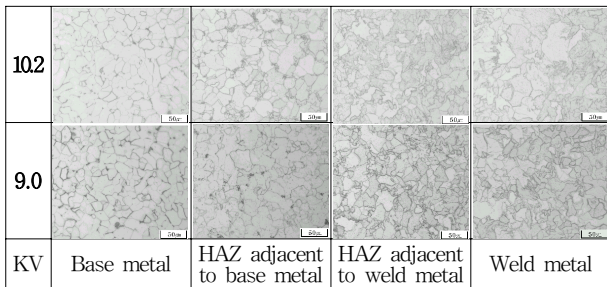


Fig. 4 Microstructures of ERW pipe with 10.2KV and 9.0KV heat input

3.3 용접부의 비파괴 결함검사 결과

적정입열 용접조건을 포함하여 고입열, 저입열 조건으로 제조한 6종류의 강관에 대하여 액체침투탐상검사를 실시한 결과 최저입열로 용접한 경우에서만 용접선을 따라 종결함이 일부 관찰되었고, 와전류검사 결과에서도 일부 불합격 판정이 나왔다.

Fig. 5는 최저입열(8.8KV) 조건으로 용접한 강관에 대하여 액체침투탐상(a) 및 방사선투과검사(b) 결과이다. 액체침투탐상에서 보듯이 용접선을 따라 발생한 결함이 명확하게 관찰된다. 이러한 종류의 결함의 원인은 저입열 용접부에서 나타낸 바와 같이 용접부의 미세조직이 적정입열 용접부에 비해

용접금속의 결정립이 다소 작게 나타나는 것으로 생각된다. 방사선 투과결과 입열별로 제조된 전 시편에서는 모두 결함이 발견되지 않았고 최저입열의 방사선 투과결과도 동일하게 결함등급은 1등급으로 산출되었다. film의 농도는 강관 두께에 따라 다소 차이가 있지만 1.5~3.5의 범위로 KS규격에 의하면 적당하였다.

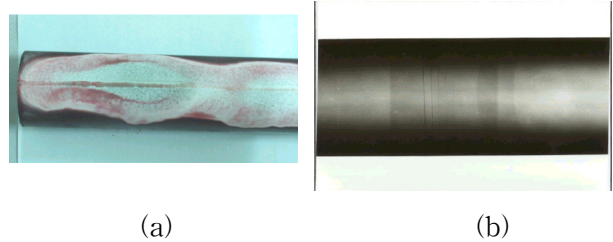


Fig. 5 Nondestructive test results of ERW pipe with 8.8KV heat input

3.4 흠부식 실험 결과 및 전기화학적 특성

3.4.1 흠부식 가속실험 결과

흠부식의 진행여부를 확인하기 위하여 정전류 양극 분극법에 의한 흠부식 가속실험을 수행하였다. 부식액은 3.5wt.% NaCl 수용액을 사용하여 상온에서 정전류로 분극실험을 수행하였다. 전류밀도는 예비실험을 통하여 흠부식 가속적정실험 전류밀도인 20mA/cm² 조건에서 72시간 장시간 분극시켰다. 흠부식 촉진실험의 결과는 용접부와 모재의 상대적인 부식속도를 비교하여 표현하는 흠부식인자(α)를 사용한다. 흠부식인자는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 흠부식으로 용해 제거된 용접부의 두께(d_1)와 균일 부식으로 용해 제거된 모재의 두께(d_2) 비율로 정의되며 $\alpha = d_1/d_2$ 로 표현할 수 있다.

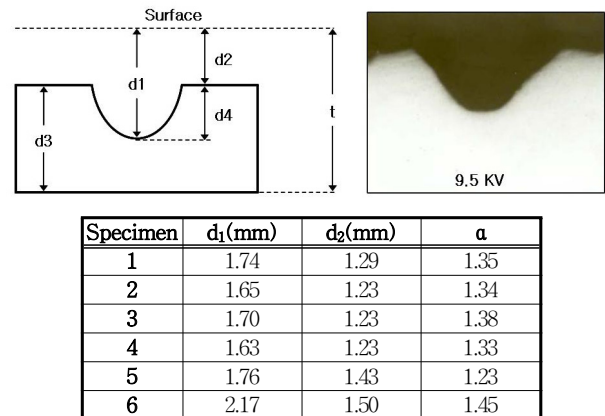


Fig. 6 Grooving factor(α) and groove appearance for ERW pipe polarized at 20mA/cm² in 3.5wt.% NaCl solution

홈부식인자(grooving factor)를 계산한 결과 약 1.2~1.5 값으로 계산되었다. 이 값은 홈부식에 대한 내식성이 양호한 편이고 홈부식 형상은 U자형이거나 V자형 홈이 아니고 접시형(D형) 홈의 형상을 하고 있다. 이 실험 결과는 실제 배관에서는 U자형이나 V자형으로 심한 홈부식이 일어날 수 있다는 지표로서 활용되어야 한다. 본 실험에서는 홈부식이 모재와 용접부의 전위차에 의해 형성된 것으로 특히, ERW 강관의 용접부와 열영향부는 일반적으로 모재보다 전극전위가 낮아 부식율이 모재보다 크기 때문에 전봉강관을 일정한 전류밀도로 강제 부식시키면 모재보다 용접부 및 열영향부가 더 빨리 용해된다.

3.4.2 용접부의 전기화학적 특성

철은 수용액에서 수소전극전위(SHE)로는 -440mV 이고, 칼로멜 전극전위(SCE) 약 -680mV이다. 그러나 탄소강은 순철이 아니기 때문에 함유된 합금원소와 불순물에 의해 어느정도 영향을 받겠지만 해수 중에서 전극전위가 약 -740mV SCE로 알려져 있다.

해수 중에서 모재부와 용접부단면(열영향부 포함)의 전극전위가 시간에 따라 어떻게 변화하는가 알아보기 위하여 외부전원을 연결시키지 않은 상태에서 측정된 자연전극전위(open circuit potential)를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 초기에 모재 시편과 용접부의 전극 전위차가 큰 이유는, 시편의 표면상태 또는 표면에 노출된 개재물들의 형상 등에 영향을 받으나 시간의 경과와 함께 표면상태의 영향이 점차 사라지고 정상상태에 이르면 전극전위가 두 시편의 내부상태를 정밀하게 반영하는 값에 이르게 되는 것으로 생각된다. 강관의 모재의 전극전위는 -720mV에 도달하였고, 용접부 단면의 전극전위는 1~5번까지는 약 -740mV 정도로 일정하였으나, 최저입열인 6번 시편의 경우 -780mV로서 모재와 60mV정도의 차이가 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 염색침투탐상의 결과로 표면에서의 균열의 형상으로 인해 전위가 낮아진 것으로 생각된다.

모재와 용접부에 대한 반주기적 분극곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서와 같이 용접부의 부식전류밀도가 모재보다 더 크며, 전위는 약 100mV까지 차이가 난다. 이와 같은 전위차는 실제 배관에서 모재와 용접부 사이에 갈바닉 부식을 일으킬 수 있는 가능성을 부여한다. 즉, 모재에서는 산소 환원반응

에 의한 음극반응이 일어날 수 있으며, 용접부에서는 철이 용해되는 양극반응이 일어날 수 있다. 특히, ERW 강관의 용접부는 폭이 100 μ m이하로서 매우 좁기 때문에 음극에 대한 양극(용접부) 면적비가 매우 적어 모재와 용접부의 작은 전위차에 의해서도 양극 즉, 용접부에 집중된 전류밀도가 상당히 커서 홈부식이 일어날 수 있다.⁶⁾

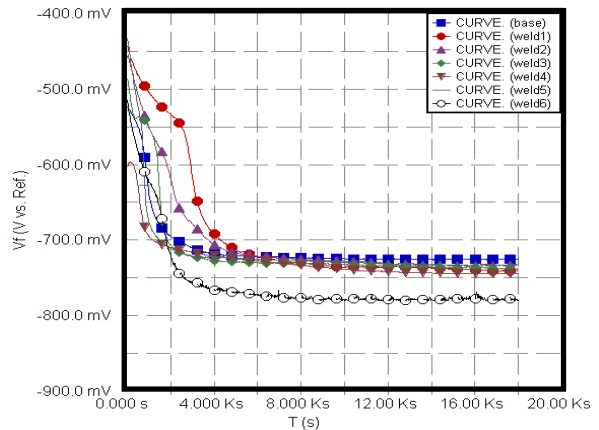


Fig. 7 Electrode potential of base and weld metal of ERW pipes in 3.5wt.% NaCl solution

이상과 같은 홈부식에 대한 전기화학적 이론은 용접부와 모재의 전위 차이와 면적비가 홈부식을 일으킨다고 하는 것으로 용접부에 편석되어 있는 개재물의 성분과 형상은 단지 용접부의 전극전위를 낮게하는 요인으로 간주되고 있다. 그러나, 틈부식이 홈부식에 결정적으로 기여한다는 주장도 간과할 수는 없다. 용접부에 가용성 화합물입자(황화물, 탄화물 등)가 편석되어 있으면 홈부식 속도가 빨라지기 때문이다.^{8,9)}

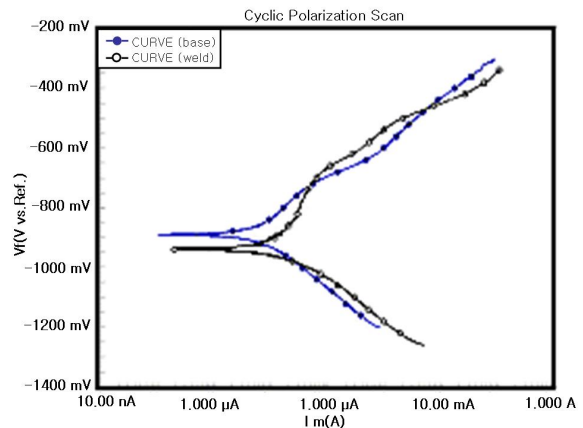


Fig. 8 Cyclic polarization diagram for the base and weld metal of ERW pipe in 3.5wt.% NaCl solution

그러므로 흠부식은 두가지 부식기구 즉, 틈부식에 의한 산소 농도차부식과 전위차에 의한 갈바닉부식 기구가 동시에 작용하여 흠 부식이 빠른 속도로 진행되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

시험제작 된 ERW강관의 용접부에 대한 조직학적 관찰, 비파괴시험에 의한 결함분석, 흠부식실험 후 강관의 부식상태 관찰 및 양극분극시험 후의 전기화학적 분석에 관하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1) ERW강관에 대하여 비파괴시험 결과 용접부에 용입불량이나 용합불량 등의 결함은 관찰되지 않았다. 다만, 액체침투탐상에 의해 적정 입열조건 보다 입열량이 7%정도 낮은 조건에서 강관의 용접선을 따라 균열이 관찰되었다.

2) 용접부의 미세조직은 입열량에 따라 용접중심부의 결정립크기 차이는 다소 관찰되었지만 전반적으로 현저한 차이는 없었다. 용접부와 인접 열영향부는 급냉되어 widman-stätten 조직이며 모재 인접 열영향부는 미세한 공석조직으로 나타났고 용접중가압력에 의해 소성 변형되어 강관 표면에 수직으로 층상조직이 발견되었다.

3) 인공해수에서 전류밀도 20mA/cm²의 정전류로 양극분극하여 부식시킨 결과 용접부에 접시형(D형) 흠부식이 발생되었고 흠부식인자(a)는 입열량에 따라 차이는 있으나 1.2~1.5 였다.

4) 강관 모재시편의 인공해수에서 자연전극전위값은 -720mV, 용접부 단면시편은 -740mV로 측정되었으며 최저 입열조건인 경우는 -780mV 로 측정되었다. 모재와 용접부를 인공해수에서 주기적 분극을 시켜 본 결과 용접부의 부식전류밀도가 모재보다 크며 전위는 약 100mV까지 차이가 난다. 이와 같은 전위차는 모재와 용접부 사이에 갈바닉부식을 일으킬 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. C. Kato, Y. Otaguro, S. Kado and Y. Hisamatsu, 1978, "grooving Corrosion in Electric Resistance Welded Steel Pipe in Sea Water", Corrosion Science, Vol. 18, pp. 61~74.

2. W. Stichel, 1996, "Corrosion of Welds in Galvanizes Steel Tubes of Drinking Water Supplies", Materials and Corrosion, Vol. 47, pp. 452~456.

3. C. Kato, Y. Otaguro, S. Kado, 1976, "Grooving in ERW Pipe in sea water", Proc. 6th International Congr. Metallic Corrosion, Sydney, Austral, P1104, December 8.

4. K. Masamura, I. Matsushima, 1981, "Grooving corrosion of Electric Resistance Welded Steel Pipe in Water, 1981, Case Histories and Effects of Alloy Elements", Corrosion/81, Toronto, Canada, 6~10, Apr.

5. K. Masamura, I. Matsushima, 1982, "Case Studies of Grooving Corrosion of Electric Resistance Welded Pipe", Corros. Eng. Vol. 31, pp. 332~335.

6. T. Kurisu, T. Kyuno, S. Harada, T. Doi, 1979, "Effects of Various Factors, Mechanisms and Preventive Methods of Grooving Corrosion of ERW and CBW Carbon steel Pipes", Kawasaki steel Tech. Rep. Vol. 11, No.3, pp. 321~336.

7. C. Duran, E. Treiss, G. Herbsleb, 1986, "The Resistance of High Frequency Inductive Welded Pipe to Grooving Corrosion in Salt Water", Mater. Perform., Vol. 25, No.9, pp. 41~48.

8. K. Risch, 1988, "Grooving and Tunnelling Corrosion of Electric Resistance Welded Carbon Steel Tubes", 3R Int, Vol. 27, No.5, pp. 360~369.

9. Young Tai Kho, 1997, "Grooving Corrosion of Galvanized Steel Pipe", J. Corrosion Sci. Soc. of Korea. Vol. 26, No. 6, pp. 524~526.