

산-염소이온 분위기의 인가전위에 따른 내후성강 용접부의 부식파괴에 관한 연구

최윤석* · 김정구* · 김종집** · 이병훈***

*성균관대학교 신소재공학과

**한국표준과학연구원 소재평가센터

***한국기계연구원

A Study on Corrosion Failure of a Weathering Steel Weldment with Various Applied Potentials in Acid-chloride Solution

*Yoon-Seok Choi, *Jung-Gu Kim, **Jong-Jip Kim and ***Byung-Hun Lee

*Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea.

**Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-340, Korea

***Research on Welding Technology, Korea Institute of Machinery and Materials, Taejon 305-600, Korea

Abstract

The stress corrosion cracking(SCC) and hydrogen embrittlement cracking(HEC) characteristics of a weathering steel weldment were investigated in aerated acid-chloride solution. The electrochemical properties of weldment were investigated by polarization test and galvanic corrosion test. Weathering steel did not show passive behavior in the acid-chloride solution. Galvanic corrosion between the weld metal and the base metal was not observed because the base metal was anodic to the weld metal. The slow-strain-rate tests(SSRT) were conducted at a constant strain rate of 7.87×10^{-7} /s at corrosion potential, and at potentiostatically controlled anodic and cathodic potentials. The weldment of weathering steel was susceptible to both anodic dissolution SCC and hydrogen evolution HEC.

(Received February 11, 2000)

Key Words : Weathering steel, Weldment, Acid-chloride environment, Stress corrosion cracking, Hydrogen embrittlement cracking, Slow-strain-rate testing

1. 서 론

교량, 항만, 발전소 등의 토목 구조물들은 사회기간시설로서 구조적 노후, 예기치 못한 사고 등으로 사용이 중단되는 사태가 발생할 때, 경제적 사회적으로 큰 손실과 혼란이 야기될 수 있는 매우 중요한 구조물이다. 따라서 이 구조물들은 계획, 설계, 시공단계에서뿐만 아니라 사용중에도 엄격히 유지 및 관리 되어야 한다. 특히 교량은 국가의 교통망을 잇는 중요한 구조물이다. 그러나 국내의 기설교량들은 최근의 폭주하는 교통량의 증가와 장기간 사용에 의한 노후화로 인하여 심각한

손상을 받는 경우가 많아서, 이들 교량의 보수, 교체에 막대한 비용이 소모되는 단계에 이르렀다. 이는 국내에서 만의 문제가 아니며, 미국의 경우 FHWA(Federal Highway Administration)의 보고에 따르면, 약 578,000여개의 도로교중 약 42%가 손상을 입어 심각한 상태에 있는 것으로 보고된 바 있다.¹⁾

최근에는 교량을 대기중에서의 부식에 대한 저항성이 강한 내후성강으로 건설하고 있다. 내후성강은 일반강재의 화학조성에 소량의 Cu, Cr, Ni 등의 합금원소를 첨가하여 내식성을 향상시킨 강재이다. 내후성강은 가공성, 용접성이 일반 강재와 차이가 없고 가격도 비교적 저렴하여 무도장으로 교량, 건축물, 송전탑, 가드레

일, 등 대기에 노출되는 강구조물에 활용되고 있다^{1~5)}.

그러나 내후성강은 수분, 염분, 공해에 노출되면 기존의 내식성을 유지하지 못하게 된다. 왜냐하면 표면에 보호역할을 해주는 부식층이 낮은 pH와 높은 Cl 이온 농도에서는 안정하지 못하기 때문이다. 또한 일반적으로 내후성강 표면에 안정한 부식층이 형성되는 데는 장시간이 걸리며^{1,2)}, 그 기간동안 산성비나 염화칼슘에 의해 보호층 형성이 방해받게 된다. 결국 내후성강의 부식도 일반 구조용 강과 비교하여 마찬가지로 악화되고 있다고 할 수 있다⁶⁾. 특히 용접부는 용접열로 인하여 잔류응력, 표면산화, 열영향부(Heat Affected Zone)의 미세조직 변화 등으로 내식성이 모재에 비해 저하되는 경향이 있다⁷⁾. 또한 용가재와 모재 간의 갈바닉 부식, 수소취화에도 노출되어 있다. 여기에 차량하중과 같은 지속적인 기계적 하중이 심하게 부과되면 균열과 함께 파괴가 발생할 가능성도 높아진다.

응력부식균열은 특정 부식환경에서 금속의 연성 감소와 관련이 있기 때문에 일반적으로 연성파괴를 나타내는 금속이라도 부식분위기 하에서는 취성파괴를 나타내어 예기치 않은 사고를 일으킨다⁸⁾. 실제로 1967년에는 오하이오주 강에서 40명이 사망한 교량붕괴사고가 있었는데, 붕괴원인은 중탄소강의 eyebar에 H₂S에 의한 응력부식균열이 발생하였기 때문이었다⁹⁾. 그리고 최근 교량에 적용되는 방식 방법인 음극방식에서는 과방식시 재료의 표면에서 수소의 발생을 유발시켜 수소취성에 의한 재료의 파괴가 유발될 수 있기 때문에, 구조물의 사용여부와 수명을 도출해내기 위해서는 강종설계단계에서 적정 음극전위의 설정과 이의 확인 단계가 필요하다.

본 연구에서는 산성비에 의한 pH의 변화와 염화칼슘 등에서 유입되는 염소이온을 부식환경으로 설정하고, 이 환경적인 요인하에서의 내후성강 용접부의 전기화학적 부식 특성과 평할한 시편을 사용한 저속변형률 시험을 통해 내후성강 용접부의 응력부식균열 저

항성에 미치는 인가전위의 영향을 측정하여, 최적의 인가전위를 설정하고 파괴모드 관찰을 통해 파괴기구를 규명하여, 악화된 부식환경하에서 내후성강의 내식성과 내구성을 평가하는데 목적을 두었다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

2.1.1 시편 및 부식환경

본 연구에 사용된 시편은 두께 15mm인 내후성강 SMA41(KS D3529)로 화학조성 및 기계적 특성을 Table 1과 2에 나타내었다. 시편의 용접은 현장에서 많이 사용하고 있는 FCAW (flux cored arc welding)법을 사용하였다. 용접조건 및 방법은 Table 3에 나타내었다. 용접와이어는 YFA-58W(KS D7109)에 해당하는 내후성강용 티타니아계 플럭스코어드 와이어 1.2mmφ를 사용하여 DCRP, 아래보기, 맞대기 용접을 하였다. Table 4와 5는 용접와이어(filler metal)의 화학조성 및 기계적 특성을 나타내었다. 전기화학 실험을 위한 시편은 용접부를 중앙에 위치시켜 50×20×10mm로 절단한 후, SiC 연마지로 #600까지 연마하였다. 저속변형률 실험을 위한 시편은 NACE의 시편제작 기준¹⁰⁾을 참고하여 제작한 후, 게이지 부분만을 SiC 연마지로 #600까지 연마하였다.(Fig. 1)

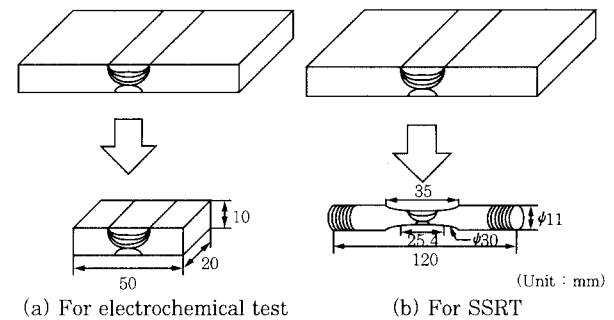


Fig. 1 Schematic diagram of specimen

Table 1 Chemical composition of SMA41 base metal.

Designation	Composition (wt. %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
SMA41	0.15	0.40	1.35	0.027	0.021	0.40	0.60	0.15

Table 2 Mechanical properties of SMA41 base metal.

		Tensile test			Elongation	
		Thickness (mm)	Yield stress (kgf/mm ²)	Tensile stress (kgf/mm ²)	Thickness (mm)	%
SMA41	AW	16 max	25 min	41~55	16 max	17 min

Table 3 Welding procedure specification

welding process	Flux cored arc welding (FCAW)			
base	SMA41			
gas	CO ₂ , 15 l/min			
wire	KS D 7109 YFA-58W (Dual Shield 8100W ø 1.2)			
	current (A)	voltage (V)	welding speed (mm/min)	polarity
first bead	200	23	270	DCRP
second bead	220	24	160	DCRP
third bead	230	25	160	DCRP
fourth bead	250	26	130	DCRP
fifth bead	250	26	300	DCRP

Table 4 Chemical composition of filler metal.

Designation	Composition (wt. %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
Filler	0.04	0.59	1.01	0.015	0.011	0.56	0.54	0.58

Table 5 Mechanical properties of filler metal.

	Yield stress (kgf/mm ²)	Tensile stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)
Filler	56	63	26

국내 산성비의 pH는 대략 4~6 정도이고 염소이온 농도는 수십ppm부터 수백ppm이다¹¹⁾. 본 연구에서 pH는 6으로, 염소이온농도는 제설제 등에 의한 추가적인 염소이온의 유입을 고려하여 1000ppm으로 선정하고 순수공기를 시험 중에 연속적으로 분당 10cc의 속도로 주입하여 용존산소량이 6~7ppm이 유지되도록 하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 미세조직관찰 및 경도분석

미세조직관찰은 용접부의 단면을 0.01µm까지 Al₂O₃ powder로 연마한 다음 Nital(1ml HNO₃, 49ml Methanol)로 에칭하여 광학현미경으로 관찰하였다.

경도측정은 Micro Vickers 경도계(2kgf)를 이용하여 용접부 중앙부터 0.5mm 간격으로 모재까지 측정하였다.

2.2.2 전기화학실험

분극시험은 Epofix resin을 사용하여 시편을 마운팅

하였고, 시편과 마운팅한 틈새를 페인팅 한 후 24시간 상온에서 건조하였다. 시편의 전기화학적 분극은 potentiostat를 사용하여 주사속도는 0.166mV/s로 하였고, 상대전극은 탄소봉을, 기준전극으로는 은/염화은 전극(Ag/AgCl)을 사용하였다. 모든 분극시험은 시편을 장시간 용액 중에 유지하여 전위를 안정화시킨 후에 행하였다.

갈바닉 부식시험은 용접부(용융부+열영향부)와 모재간에 일정한 거리를 두고 고정시켰다. 두 시편이 전기적으로 연결되었을 때 흐르는 갈바닉 전류를 potentiostat에 내장된 Zero Resistance Ammeter(ZRA)로 시간에 따라 연속적으로 측정하였다(Fig. 2). 용접부와 모재부의 면적비는 1 : 1로 하여 72시간 동안 행하였다.

2.2.3 저속변형율시험

저속변형율 시험은 7.87×10⁻⁷/s의 일정 변형율로 인장하며 potentiostat를 이용하여 양극분극 전위와 음극분극 전위를 인가하였다. 이때의 전류값은 X-Y recorder를 사용하여 연속적으로 측정하였다(Fig. 3). 상대전극은 백금을, 기준전극으로는 포화 은/염화은 전극(Sat. Ag/AgCl)을 사용하였다.

2.2.4 파면조사

파면의 형상은 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

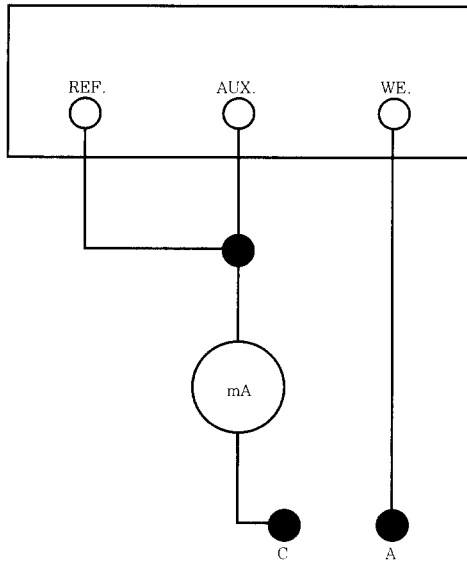


Fig. 2 Zero resistance ammeter for measurement of galvanic current at short circuit

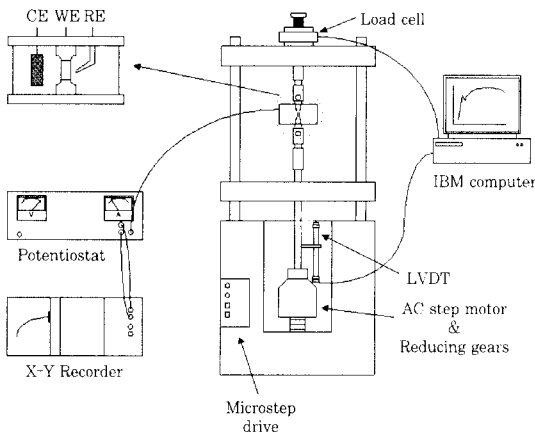
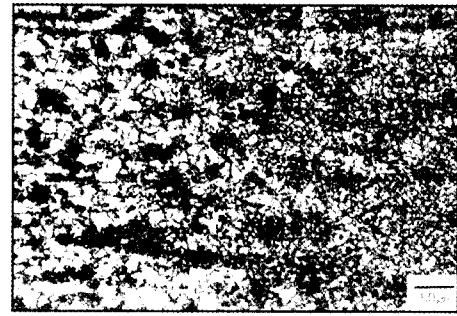


Fig. 3 Apparatus used for slow-strain-rate-test.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직관찰 및 경도분석

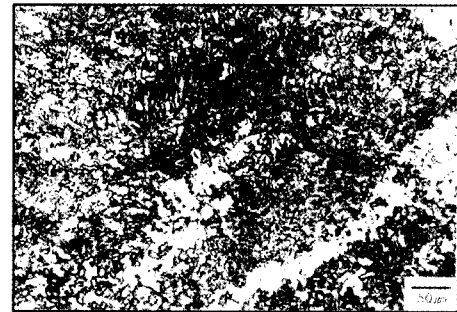
Fig. 4는 모재와 용접부의 단면 미세조직을 (a)모재부와 열영향부의 경계, (b)열영향부와 용융부의 경계, (c)용융부로 각각 구분하여 나타내었다. 미세조직의 관찰에서 모재부는 페라이트 조직(흰부분)과 펄라이트 조직(검은부분)으로 구성되어 있고, 열영향부는 미세화지역과 조대화지역이 뚜렷이 구분되며 용융부와 열영향부의 경계에는 침상의 페라이트 조직이 나타나고 있다. 용융부는 오스테나이트 입계에 초석 페라이트가 석출한 조직이다. 전체적으로 용접결함이 관찰되지 않는 양호한 용접조직을 가지고 있다. Fig. 5는 용접부 중앙을 중심으로 그 부분의 경도분포를 미소경도



(a) base metal/HAZ



(b) HAZ/weld zone



(c) weld zone

Fig. 4 Microstructures of welded SMA41

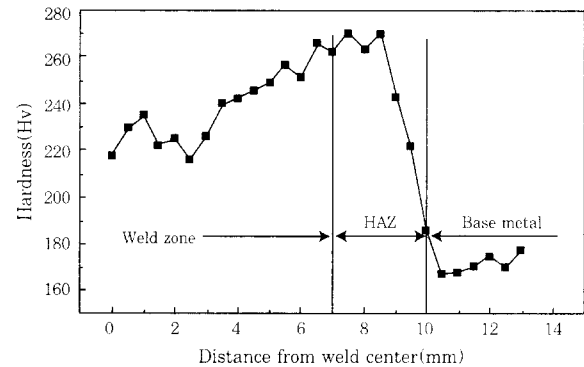


Fig. 5 Hardness distribution of weldment

계를 이용하여 측정된 결과이다. 열영향부에서 최대치를 보이고 모재로 갈수록 현저히 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 일반적으로 용접부의 수소취화균열에 예민한 조직인 마르텐사이트나 베이나이트는 조직

관찰 결과나 경도값으로 미루어 볼 때, 내후성강 용접부에는 존재하지 않는 것으로 사료된다. 이는 저탄소강에서 마르텐사이트가 생성되려면 매우 빠른 냉각속도를 가져야 하는데, 용접과정 중에는 다층용접시 유발되는 반복가열 등으로 인하여 빠른 냉각속도를 가지지 못하기 때문이다.^{7,12)}

3.2 용접부의 갈바닉부식 거동

Fig. 6은 용접부와 모재부의 양극분극곡선을 나타내었다. 본 논문에 표기된 모든 전위값은 포화 은/염화은(Ag/AgCl) 전극을 기준으로 하였다. 각 부분 모두 부동태영역을 형성하지 않고 전위가 증가함에 따라 전류밀도도 급격히 증가하는 활성화 거동을 보인다. 이것은 표면에 형성된 녹층이 대기 분위기와는 달리 보호성이 약하기 때문이다.

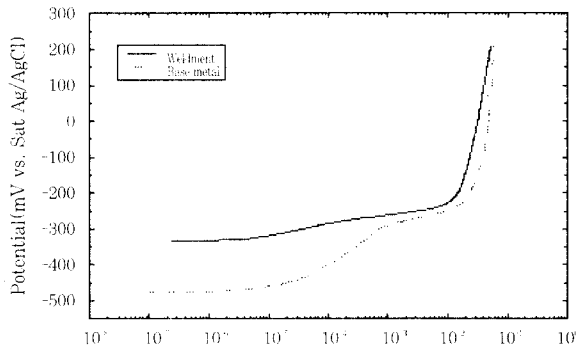


Fig. 6 Anodic polarization curves of weldment and metal

부식속도는 Faraday 법칙에 의거하여 부식전류밀도로부터 부식속도를 다음과 같이 구할 수 있다.¹³⁾

$$\text{부식속도 (mpy)} = \frac{0.13 \times \text{부식전류밀도 } (\mu\text{A}/\text{cm}^2) \times \text{E.W.}}{\text{밀도 } (\text{g}/\text{cm}^3)}$$

$$\text{E.W. (equivalent weight)} = \frac{\sum f_i M_i}{n_i}$$

f_i : 원자분율, M_i : 원자량, n_i : 원자가

Table 6은 용접부와 모재부의 부식속도와 부식전위를 나타내었다. 모재부가 용접부에 비해 부식속도는 높고 부식전위는 낮다. 따라서 모재부가 용접된 시편의 갈바닉 부식에 있어서 양극으로 작용한다고 볼 수 있다. Fig. 7은 모재부의 양극곡선과 용접부의 음극곡선을 나타내었다. 두 곡선이 만나는 점은 갈바닉 부식 전위(-452mV)와 갈바닉 부식전류밀도(16.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)가 되며, 양극의 부식속도는 갈바닉쌍을 형성하기 전보다 증가하고 음극의 부식속도는 감소한다. Fig. 8에 이러

Table 6 Results of corrosion rate and corrosion potential measurements.

	Corrosion rate (mpy)	Corrosion potential (mV vs. Sat. Ag/AgCl)
Weldment	7.046	-337
Base metal	10.9	-475

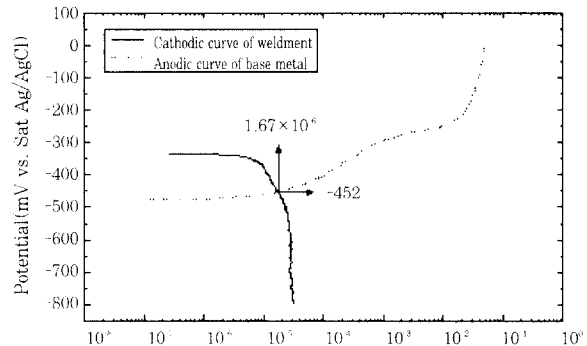


Fig. 7 Anodic polarization curve of base metal and cathodic polarization curve of weldment

한 갈바닉 효과를 정량적으로 평가하기 위해 ZRA를 이용하여 측정된 시간에 따른 갈바닉 전류밀도를 나타내었다. 모재부를 양극으로 설정하고 용접부를 음극으로 설정하였다. 분극실험 결과와 마찬가지로 갈바닉 부식전류밀도는 양의 값을 가지며, 이는 모재부가 갈바닉쌍에서 양극으로 작용한다는 결론이 된다. 따라서 보통의 용접 구조물은 모재부의 면적이 용접부의 면적에 비해 훨씬 넓으므로 대양극소음극이 되어 내후성강 용접부는 갈바닉 부식에 민감하지 않다는 결론을 내릴 수 있다.

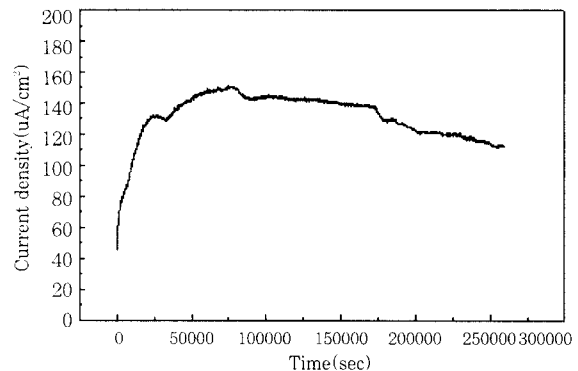


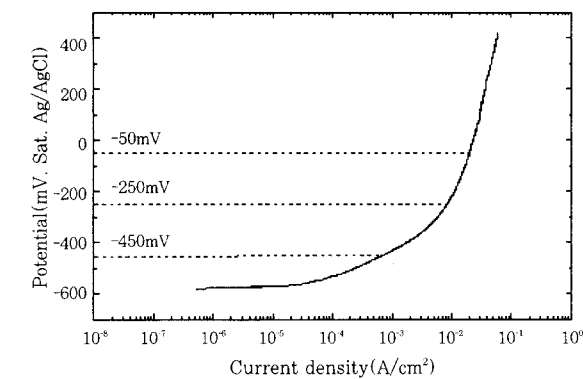
Fig. 8 Galvanic current density between base metal(anode) and weldment(cathode)

3.3 인가전위에 따른 SCC 및 HEC 거동

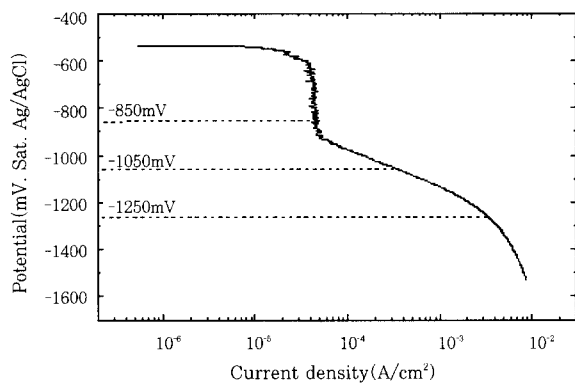
일반적으로 precracked 시편을 사용하는 파괴시험에서 얻어진 K1SCC값이나 균열전파속도 등은 재료의 균열전파에 대한 저항성을 잘 나타내지만 균열발생

에 관한 정보는 제공하지 못한다. 평활한 인장시편을 사용한 저속변형률 시험은 균열의 발생에서 전파에 이르는 전과정에 대한 응력부식저항성을 측정할 수 있는 장점이 있다¹⁴⁾. 인가전위를 결정하기 위해 분극실험을 행하였다. Fig. 9의 (a)는 용접시편의 양극분극거동을 나타내었다. 앞의 분극실험 결과와 마찬가지로 활성화 부식 형태를 나타내었다. Fig. 9의 (b)는 음극분극 거동으로서 산소환원반응($O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$)은 -950mV까지이다. O_2 의 환원반응에서, 시편의 한계 전류밀도는 별로 차이가 없으나 수소환원반응($2H^+ + 2e \rightarrow H_2$)에서는 전위가 낮아질수록 한계전류 밀도가 커진다. 수소분자(H_2)는 수소환원반응 초기에 생성되는 수소원자(H)들의 조합으로 형성된다. 수소 취화에 직접적인 영향을 주는 것은 수소원자로서 전위가 낮아질수록 보다 많은 수소분자가 발생하게 되고 이러한 수소분자를 형성하는 수소원자의 일부가 재료 내부로 침투할 확률이 높아지므로 수소취화에 노출될 확률이 큰 것을 의미한다^{11,15-17)}.

이와 같은 분극거동을 기초로 하여 양극인가전위를 -450, -250, -50mV(vs. Ag/AgCl)로 하고, 음극인가전위는 산소환원반응영역인 -850mV, 수소환원영역인 -1050, -1250mV(vs. Ag/AgCl)로 결정하였다. 또한 인가전위의 영향을 비교하기 위해 대기중과 개방회



(a) anodic polarization curve



(a) cathodic polarization curve of weldment

Fig. 9 Determination of applied potential

로전위하에서도 저속변형률 실험을 행하였다. Fig. 10은 대기중과 개방회로전위하에서의 응력-변형률 곡선을 나타내었다. 개방회로전위하에서의 경우 대기중과 거의 일치하여, 이 경우에는 응력부식균열이나 수소취화균열에 의한 영향이 전혀 없다고 볼 수 있다. Fig. 11은 양극분극시켰을 때의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 전위가 증가할수록 항복강도, 인장강도, 파괴시간, 연신율과 같은 거의 모든 기계적 성질의 저하가 관찰된다. 이는 인가전위가 증가할수록 부식에 의한 양극용해가 가속화되어 재료가 인장응력에 의한 탄성변형과 소성변형에 대한 저항력이 감소되는 응력부식균열의 특성¹⁸⁾을 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 12는 음극분극시켰을 때의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 인가전위가 낮아질수록 항복강도와 인장강도에는 큰 차이가 없지만 파괴시간, 연신율 그리고 단면수축율은 낮아진다. 즉, 음극분극에 의해 발생한 수소가 재료의 표면에 영향을 주지 않고, 소성변형에 의해 재료 내부로 침투하여 어느 정도의 시간이 경과한 후에 균열이 발생하는 지연균열(delayed cracking)의 형태¹⁹⁾를 보여주고 있다.

Fig. 13은 인가전위의 변화에 따른 기계적인 특성의 변화를 나타내고 있다. 앞서 말했듯이 양극분극의 경

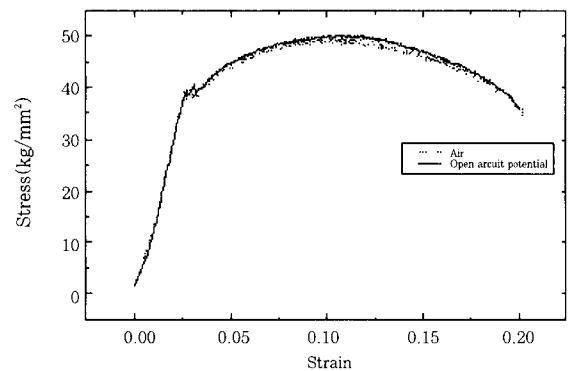


Fig. 10 Stress-strain curves for slow-strain-rate test in air and at open circuit potential

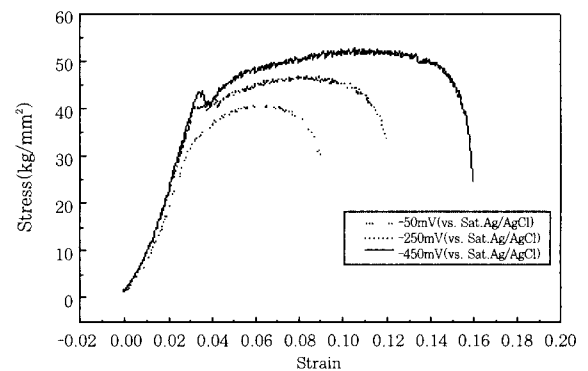


Fig. 11 Stress-strain curves for slow-strain-rate at anodic applied potentials

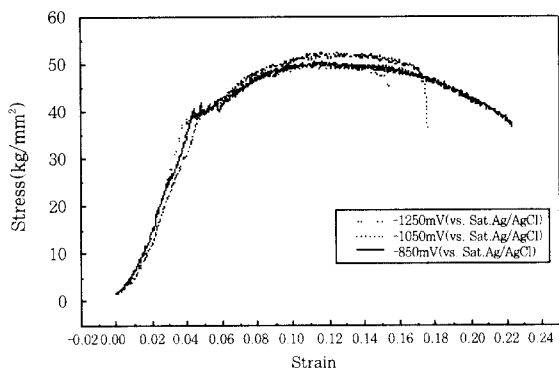


Fig. 12 Stress-strain curves for slow-strain-rate test at cathodic applied potentials

우에는 응력부식균열로 인해 모든 기계적인 특성값이 낮아졌고, 음극분극의 경우에는 수소취화균열의 한 특성인 지연균열로 인해 파괴시간, 연신율 그리고 단면 수축율에서만 감소가 나타났다.

Fig. 14는 -250mV의 인가전위하에서 응력을 가한 경우와 응력이 배제된 상태의 전류밀도를 비교하였다. 철계 합금의 경우, 이와 같은 정전위시험시 전류밀도의 증가는 국부균열의 생성 및 성장으로 해석되고, 전류밀도의 감소는 보호피막의 재생성으로 해석되었다. 20) 본 연구에서도 응력이 가해지지 않은 경우에는, 시간이 지남에 따라 표면에 생성된 녹층으로 인해 전류밀도가 안정화되었으나, 응력이 지속적으로 가해

진 경우에는 이러한 녹층이 표면에 밀착력있게 존재하지 못하므로 부식에 의한 균열의 성장으로 전류밀도는 파괴가 일어날때까지 계속 증가하는 경향을 보였다.

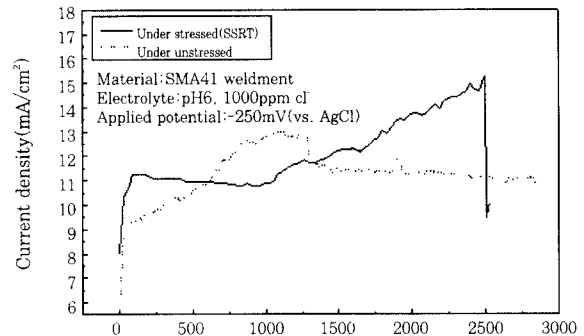


Fig. 14 Comparison of current densities between stressed and unstressed conditions

3.4 인가전위에 따른 파면관찰

Fig. 15는 대기중과 개방회로전위, 그리고 양극전위 (-450mV)와 음극전위(-1050mV)에서의 거시적 파단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 먼저 대기중(a)과 개방회로전위하(b)에서의 경우를 보면, 모두 상당량의 소성유동을 하여 shear-lip zone, radial zone 그리고 fibrous zone이 뚜렷이 나타나는 cup-and cone 형태를 띠고 있다. 이에 반해 양극전위(c)와 음극전위

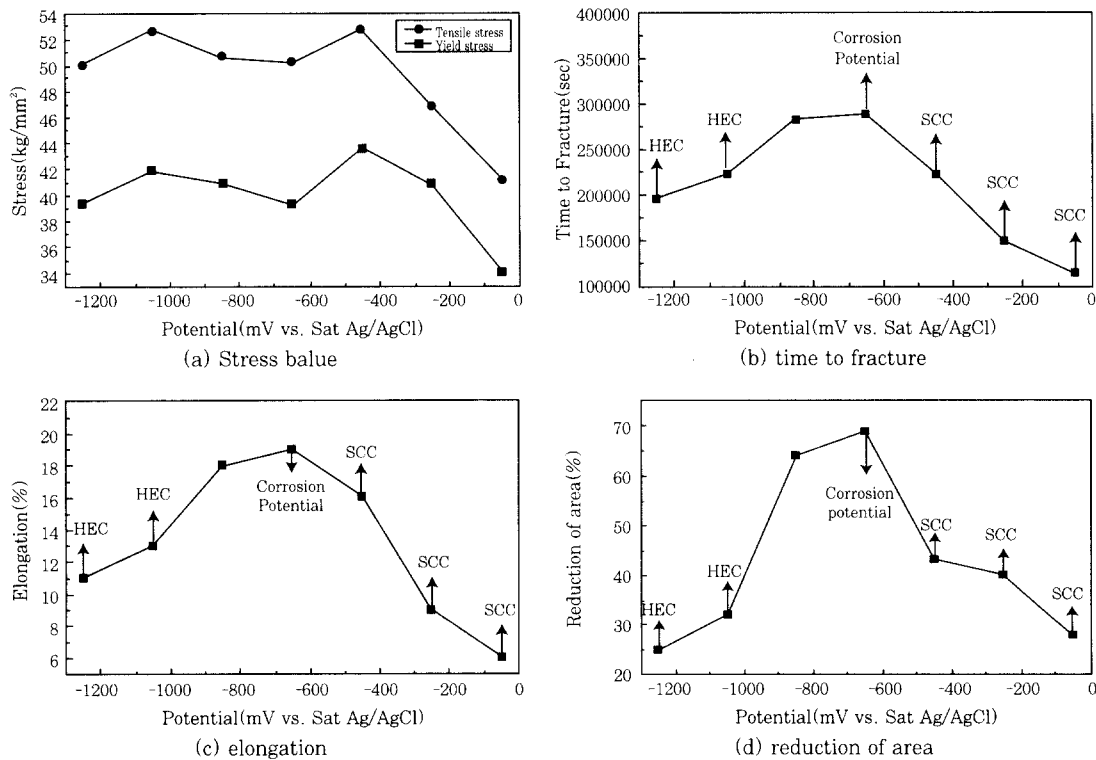


Fig. 13 Variation of mechanical properties

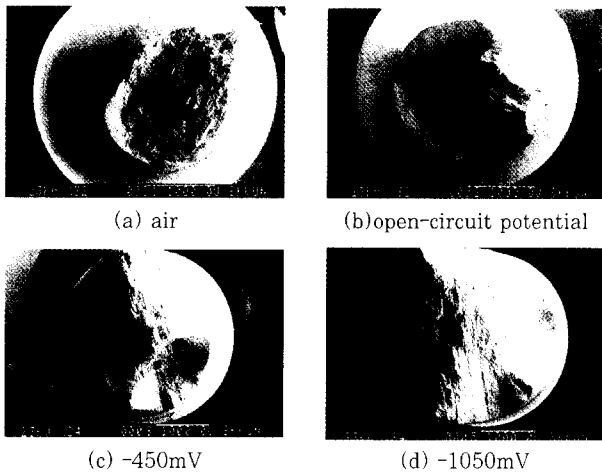


Fig. 15 Macro-fracture surfaces of a welded weathering steel after SSRT

(d)를 인가한 경우에는 양극용해 또는 수소의 장입에 따른 적은 양의 소성유동으로 인해 shear-lip zone과 fibrous zone은 거의 나타나지 않고 radial mark는 미세화된 취성파괴의 형태를 띠고 있다. Fig. 16은 대기중과 개방회로전위, 그리고 양극전위(-450mV)와 음극전위(-1050mV)에서의 미시적 파단면을 나타내었다. 대기중에서와 개방회로하에서는 모두 연성파괴에서 전형적으로 나타나는 MVC(Microvoid Coalescence) 형태의 파괴양상을 나타내고 있다. 이는 응력부식에 의한 손상이 전혀 없다는 의미이다. 그러나 양극분극시킨 경우(c)의 파단면은 덩플파면과 입내파면이 혼재된 벽개파괴(cleavage fracture)를 나타내고 있어 부식에 의한 표면의 손상이 탄성 및 소성 변형이 됨에 따라 재료 내부로 균열을 진행시켜 파괴를 촉진시켰음을 알 수 있다. 이러한 경향은 양극인가 전위가 증가할수록 더욱 심해지는데, 이는 활성화거동을 보이는 부식특성에 기인한다.

음극분극시킨 경우(d)의 파단면은 입내균열(transgranular cracking)에 의한 취성파괴를 나타낸다. 인가 전위가 낮아질수록 이러한 경향이 더욱 심해진다. 이는 수소원자가 재료내부로 침투하여 균열선단에 흡착된 수소가 일정농도 이상이 되면, 금속원자간의 결합력을 약화시켜 원자들이 전단변형을 일으켜서 전위를 생성하여 균열을 진행시킨다는 '흡착이론'²⁰⁾과 잘 부합하는 결과이다.

결국 앞의 음극분극실험 결과와 같이 산소환원 영역인 -850mV 인가시에는 수소의 발생이 없기 때문에 수소취화가 일어나지 않지만 -1050mV 이하로 전위가 낮아질수록 수소환원영역에서 한계전류밀도의 증가에 따른 수소의 발생량이 증가하기 때문에, 인가전위가

낮아질수록 수소취성에 의한 재료의 파괴가 촉진되었다고 사료된다. 따라서 음극분극전위의 결정에 있어서 수소환원영역이 시작되는 -950mV(-1072mV vs. Cu/CuSO₄)이하의 전위는 수소 발생에 의한 수소취화의 위험이 존재하므로 -950mV이상의 값으로 분극전위를 결정하는 것이 바람직하다는 것을 제시한다.

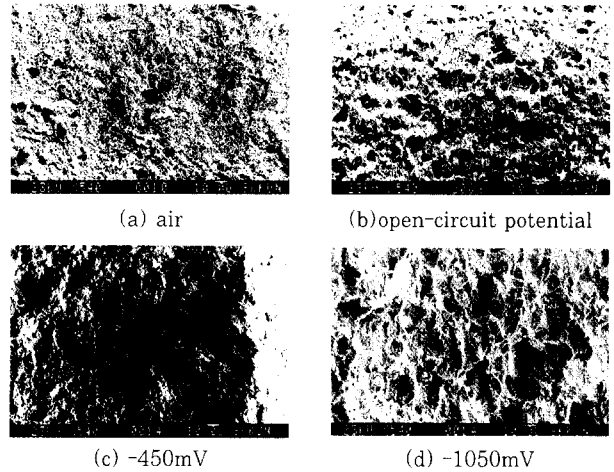


Fig. 16 Macro-fracture surfaces of a welded weathering steel after SSRT

4. 결 론

1. 내후성강 용접부는 산-염화이온 수용액에서 활성화 거동을 보이며 부동태피막을 형성하지 않는다. 또한 용접된 내후성강은 모재부가 양극으로 작용하고 용접부가 음극으로 작용하여 모재부의 부식속도가 증가하나, 대양극소음극 효과로 인해 갈바닉 부식에 민감하지 않다.
2. 양극전위를 인가하여 응력부식균열에 대한 민감도를 평가한 결과, 인가전위가 증가할수록 양극용해가 가속화되어 항복강도, 인장강도, 파괴시간, 연신율 그리고 단면수축율과 같은 거의 모든 기계적 성질이 저하된다.
3. 음극전위를 인가하여 수소취화균열에 대한 민감도를 평가한 결과, 산소환원영역의 전위(-850mV)에서는 수소 발생의 부재로 수소취화균열이 일어나지 않지만, 수소환원영역의 전위(-1050mV, -1250mV)에서는 소성변형에 따른 수소의 침투 및 확산으로 인해 항복강도와 인장강도에는 큰 차이가 없지만 파괴시간, 연신율 그리고 단면수축율의 저하가 관찰된다.
4. 파단면을 관찰한 결과, 대기중과 개방회로 전위하에서는 연성파괴에서 나타나는 MVC형태의 파면을 나타내었으며, 응력부식균열이 일어난 경우에는 벽개파

면을, 수소취성이 일어난 경우에는 입내파괴를 나타내었다.

5. 현재 강구조물의 전기방식기준은 -850mV (vs. Cu/CuSO_4) 이하로 규정하고 있다. 내후성강 용접부의 경우 수소환원영역이 시작되는 -1072mV (vs. Cu/CuSO_4) 이하에서는 수소취성에 민감하였다. 따라서 적절한 방식전위는 $-850\text{mV} \sim -1072\text{mV}$ (vs. Cu/CuSO_4)임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. P. Albrecht, A.H. Naeemi: Performance of weathering steel in bridges, National cooperative highway research program report 272, (1984), 1-11.
2. POSCO : Application note for unpainted weathering steel structures, PCP No. 95-1, (1995), .1-4.
3. J.H. Wang, F.I. Wei, H.C. Shih: Modeling of Atmospheric Corrosion Behavior of Weathering Steel in Sulfur Dioxide-Polluted Atmospheres, Corrosion, 52-12(1996), 900-909.
4. H. Okada and Y. Hosoi: Electrochemical Reduction of Thick Rust Layers Formed on Steel Surfaces, Corrosion, 26-10(1970) 429-430.
5. A. Raman and B. Kuban: Infrared Spectroscopic Analysis of Phase Transformation Processes in Rust Layers Formed on Weathering Steels in Bridge Spans, Corrosion 44-7(1988) 483-488.
6. H.E. Townsend and T.C. Simpson: Structures of Rust on Weathering Steel in Rural and Industrial Environments, Corrosion, 50-7(1994), 546-554.
7. T.G. Gooch : Welding J. 53 (1974) 287s.
8. 이재봉: Cu-25at%Au 단결정의 입내응력부식균열에 관한 연구, 대한금속학회지, 34-12(1996), 1585-1595.
9. J.A. Bennet, H. Mindlin: Metallurgical Aspects of the Failure of the Point Pleasant Bridge, J. of Testing and Evaluation 1-2(1973), 152-161.
10. NACE Standard TM0177-96, NACE, Houston, Texas, (1996)
11. 정원석, 김정구, 서창제, 이병훈: 산성비 분위기에서 교량용 강재 SWS400의 용접부 부식에 관한 연구, 대한용접학회지, 15-5(1997), 498-507.
12. G.M. Linnert: Welding Metallurgy, Vol. 1, 4th Ed., AWS, Miami, (1994), 836-840.
13. S.W. Dean : Handbook on Corrosion Testing and Evaluation, John Wiley, (1971), 171.
14. 김준식, 권혁상, 김규영, 이성근, 심인옥, 김영우: HY-130강의 응력부식균열에 미치는 인가전위와 미세구조의 영향, 한국부식학회지, 22-4(1993), 223-232.
15. J. Benson and R.G.J. Edyvean: Hydrogen Permeation Through Protected Steel in Open Seawater and Marine Mud, Corrosion, 54-9(1998), 732-739.
16. C.F. Barth and A.R. Troiano: Cathodic Protection and Hydrogen in Stress Corrosion Cracking, Corrosion, 28-7(1972), 259-263.
17. J.G. Kim and R.A. Buchanan: Stress Corrosion Cracking of Fe₃Al and Fe-16%Al Alloys, Corrosion, 53-5(1997) 356-364.
18. R.H. Jones: Stress-corrosion cracking, Metals Handbook, Vol. 13, 9th Ed., ASM, (1987), 145-162.
19. Bruce Craig : Hydrogen Damage, Metals Handbook, Vol. 13, 9th Ed., ASM, (1987) 163-169.
20. 맹완영, 남태운: 고온·고압 환경하에서 정전위법에 의한 인코넬합금의 입계응력부식 저항성 평가, 대한금속학회지, 35-8(1997), 1019-1026.