

SCC 분위기 하에서 장시간 인공열화된 304 스테인리스강 용접부의 파괴인성(J_{IC}) 평가

김성우* · 배동호** · 조선영* · 김철한*

Evaluation of Fracture Toughness(J_{IC}) on 304 Stainless Steel Weldments Artificially Degraded under SCC environment

S. W. Kim*, D. H. Bae**, S. Y. Cho* and C. H. Kim*

Key Words : Fracture toughness(파괴인성), Electro-chemical polarization test(전기화학적 분극실험), Degradation(열화), Stress corrosion cracking(응력부식균열), Deoxidization(탈산), O_2 saturation(산소 포화)

Abstract

Fracture toughness(J_{IC}) on 304 austenitic stainless steel weldments artificially degraded for long period under SCC environments were evaluated to investigate its reliability and environmental characteristics. Electro-chemical polarization tests were previously carried out to evaluate corrosion susceptibility of weldment, and stress corrosion cracking was tested under various conditions of 3.5wt.% NaCl solution, the temperature of 25°C and 95°C, and oxygen concentration during 3000hours.

From the results obtained, it was found that 304 stainless steel weldment was so susceptible under high temperature and high oxygen concentration of 3.5wt.% NaCl solution, and fracture toughness(J_{IC}) was also considerably reduced by material degradation.

1. 서 론

에너지 변환 설비 재료의 환경 열화와 손상에 대한 진단 및 평가는 장시간 사용으로 인한 조직 변화에 기초한 열화 기구의 해명과 미소 손상의 비파괴 검출 및 손상 해석으로부터, 궁극적으로 설비의 보수 관리 기술의 향상과 수명 연장이라는 개념으로 이루어지고 있다고 볼 수 있다.

원자력 발전과 화력 발전 시스템의 설비 재료로서 사용되는 오스테나이트계 스테인레스강(austenitic stainless steel)은 냉각수와 증기 발생용수 중의 용존 산소, 염기성 화합물 및 pH에 의해 사용 중 열화되거나 각종 부식 기구들에 의해 손상을 입게 되며, 특히, 에너지 변환 설비인 보일러, 증기 파이프 등의 용접부에서 이와 같은 현상이 더욱 뚜렷이 나타나고 있다.¹⁾ 따라서, 용접부의 전기화학적 부식기구와 응력부식균열(stress corrosion cracking ; SCC)에 의한 파괴

※ 1998년 11월 2일 접수

* 비회원, 성균관대학교 대학원

** 정회원, 성균관대학교 기계공학부

• 배동호 : bae@yurim.skku.ac.kr

기구(fracture mechanism) 규명과 경년 열화에 의한 파괴 인성(fracture toughness)을 평가하는 것은 설비의 안전 진단, 열화재의 수명 예측, 그리고 합리적이고 경제적인 검사 주기를 설정하는데 매우 중요하다. 그런데, 이러한 환경 강도와 환경 파괴 특성을 평가하고 해석하는 등의 연구는 지금까지 단기적으로 수행된 것들이 대부분이고, 장기적으로 수행된 연구 결과는 실험상의 제약이나 어려움이 많다는 이유로 매우 저조한 실정이다. 때문에, 단기간의 가속 실험 data로부터 장시간이 경과된 후의 사고 발생 또는 파괴 진행 과정을 추정할 수밖에 없으나, 경우에 따라서는 그 결과가 실제와는 잘 일치하지 않는 경우도 많음이 지적되고 있으므로, 이러한 문제는 조속히 개선되어야 할 과제 중의 하나이다.

따라서, 본 연구에서는 에너지 변환 설비 등의 산업 설비 재료로 이용도가 높은 반면 환경에 의한 파손 사례가 많이 보고되고 있는 304 스테인레스강의 용접부에 대해 염화물 부식 환경 하에서의 전기화학적 부식 민감성(electro-chemical corrosion susceptibility)을 평가하고, SCC 분위기에서 장기적인 인공열화를 실시한 후, 인공열화재의 파괴 인성(J_{IC}) 평가를 시도함으로써, 경년열화된 산업 설비의 안전성 평가를 위한 기초 자료를 획득하고자 하였다.

2. 실험

2.1 분극실험

2.1.1 시편의 재료 및 형상

본 실험에 사용된 재료는 오스테나이트계(18Cr - 8Ni)인 304 스테인레스강이고, 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. 그리고 시편은 GTAW(gas tungsten arc welding)와 SMAW(shield metal arc welding)를 사용하여 용접하였으며, 용접 조건과 방법은 Table 2와 같다.

시편의 두께는 15mm이며, 용접이음부(weld bead)의 대칭성을 유지하기 위하여 이음부를 X형 groove로 가공한 후 용접하였고, 용접부의 형상은 Fig.1과 같다.

시편은 50×20×10mm의 직사각형 모양으로 제작한 후, Struers사의 에폭시 레진(epofix resin)을 사용하여 마운팅(mounting)하였고, 시편과 마운팅의 틈새는 Ameron사의 Amercoat 90으로 페인팅(painting)한 후 24시간 상온에서 건조하였다. 그리고, 시편의 표면은 600-grit SiC paper로 연마하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of 304 stainless steel(wt.%)

| | | | | | | |
|----------------------|------|---------------------------------|-----|----------------|-------|------|
| C | Cr | Ni | Mn | Si | P | S |
| 0.08 | 19.0 | 8.5 | 1.9 | 1.0 | 0.045 | 0.03 |
| yield strength (MPa) | | ultimate tensile strength (MPa) | | elongation (%) | | |
| 351 | | 579 | | 55 | | |

Table 2. Welding conditions

| | | | |
|-----------------|-----------------|-------------|--------------|
| W.P.S no. | GT.SM-8.8-05 | | |
| welding process | GTAW & SMAW | | |
| base metal | SUS 304 | | |
| filler metal | GTAW | SMAW | |
| | spec. | AWS ER308L | AWS E308L-16 |
| | blend name | SFA 5.9 | SFA 5.4 |
| | shielding gas | ARGON 99.9% | |
| | gas flow | 8-15 l/min | |
| | backup material | ceramic | ceramic |

| pass | welding process | electrode dia. | | polarity | current (A) | voltage (V) | welding speed (cm/min) |
|-------------|-----------------|----------------|------|----------|-------------|-------------|------------------------|
| | | class | dia | | | | |
| as required | GTAW | ER 308L | φ2.4 | DC SP | 90-150 | 12-18 | 8-10 |
| | SMAW | E308 L-16 | φ3.2 | AC | 70-90 | 22-28 | 6-9 |
| | SMAW | E308 L-16 | φ4.0 | AC | 90-130 | 22-28 | 6-9 |

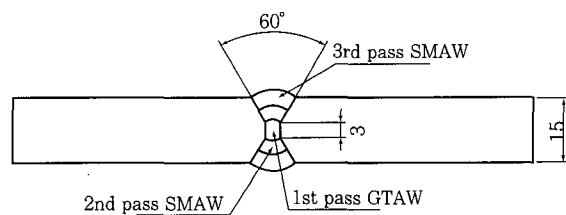


Fig. 1 Configuration of welded joint

2.1.2 실험장치 및 실험방법

전기 화학적 분극시험 장치는 EG&G사의 potentiostat 273A를 사용하였고, 각 시편과 용액 반응에서 부식시편과 open-circuit potential에서 15초간 유지한 후 실험을 시작하였다. 실험의 scan. rate는 0.166mV/s로하였고, 용액은 3.5wt.% NaCl 수용액을 이용하였다. 그리고, 본 실험에서는 용액중의 용존산소에 의한 부식 영향을 검토하기 위해 용액 중

의 용존산소를 질소 가스(N₂gas)로 제거한 경우(탈산, deoxidization)와 이와 반대로 산소를 용액 중에 포화시킨 경우(산소 포화, O₂ saturation)의 2가지 환경 조건으로 수행하였다. 각각의 경우에 대해 실험 시작 1시간 전부터 부식조내의 용액을 각각 질소와 산소로 퍼징(purging)하여 용존산소량을 조절하였으며, 실험이 시작될 때의 용액중 용존산소량은 산소포화의 경우 16.7ppm, 탈산의 경우는 0.2ppm이었다.

2.2 인공열화 및 파괴인성(J_{IC}) 실험

2.2.1 시편의 재료 및 형상

사용된 재료와 화학적·기계적 성질 및 용접 방법은 분극실험의 시편과 동일하며, 형상은 CT시편으로 하였다. CT시편은 ASTM E399(2)에 의거하여 Fig. 2와 같이 제작하였다. 시편의 표면은 가공시 용접부의 잔류응력 이완(relaxation of residual stress)을 고려하여 습식으로 기계 가공하였다. 그리고 열영향부(heat affected zone ; HAZ)에 지름이 0.1mm인 wire를 이용하여 notch를 방전 가공(EDM)한 후, 피로에 의한 예균열(pre-crack)을 ASTM E647-93³⁾에 의거하여 $a/W=0.55$ 가 되도록 생성시킴으로써 장시간 열화실험 중에 열영향부에서의 SCC에 의한 균열 발생과 성장을 관찰할 수 있도록 하였다. 시편 표면과 부식 용액간의 불필요한 전기 화학적 반응(electro-chemical reaction)을 억제하기 위해서는 열영향부를 제외한 시편의 표면을 실리콘 접착제(silicon bond)로 도포 하여 부식 용액과의 접촉을 방지하였다.

2.2.2 실험 장치

실험 장치는 자체 개발한 유압에 의한 lever식 하중 장치(2 ton)로서, 실험의 편의성과 실용성을 고려하여 기존의 장치에 비해 소형으로 제작하였으며, 실험 목적과 부하 방식에 따라 시험기의 자세가 가변적일도록 하였다. 특히, 본 실험과 같이 장시간 동안 실험이 수행되어야 하는 경우는 부식조(corrosion cell)와 시편 grip과의 접촉부에서 용액이 누설되어 실험에 어려움을 초래하는 경우가 많은데, 이를 방지하고, 전위(electro-potential)측정을 위한 전극의 부식을 방지하기 위해 본 실험에서는 수평식으로 하였다.

하중 장치와 유압 장치 및 용액 순환 장치 전체에 대한 구성도는 Fig. 3과 같다. Fig. 4의 부식조는 실험 중 부식 용액과의 화학반응을 방지하기 위해 비금속 재료인 아크릴 수지판(지름:120mm)으로 제작하였다. 그리고 고온 조건하에서 실험하는 경우는 부식조에 냉

각장치를 부착하여 실험중 부식 용액의 증발에 의한 부식 용액의 농도 변화를 억제함으로써, 용액의 화학적 평형이 일정하게 유지되도록 하였다.

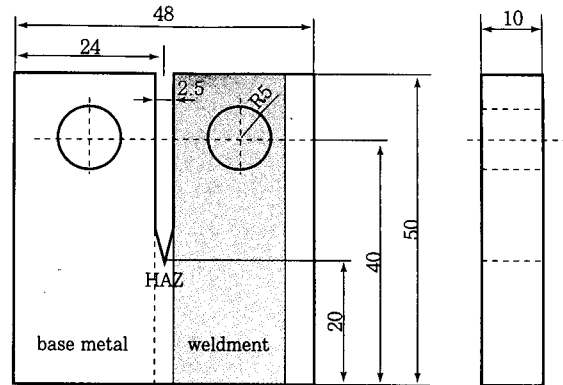


Fig. 2 Geometry of specimen

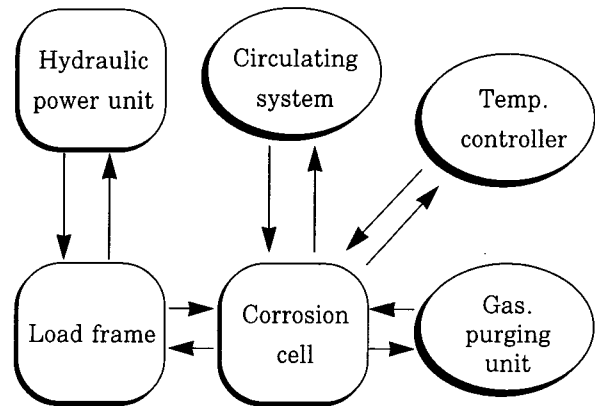


Fig. 3 Block diagram of SCC test equipment

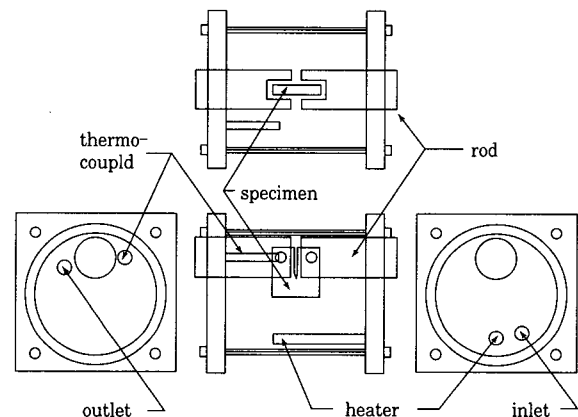


Fig. 4 Corrosion cell

2.2.3 실험 조건

실험 하중의 선정은 ASTM E647-93(3)에 의거하였다. 시편 폭에 대한 균열 길이 비 $a/W=0.55$ 일 때의 K_{max} 를 결정하고, Srawley의 식(1)⁴⁾을 이용해 최대 유효 하중 P_{max} 를 구한 후, P_{max} 의 80%인 4.5kN을

시편에 정적으로 부하 하였다.

부식 용액은 3.5wt.%의 염수(NaCl solution)로 하고, 용액의 온도는 상온(25℃)과 비등점(boiling point: 약 95℃)으로 하여 실험하였다. 용존산소는 분극시험과 마찬가지로 산소포화와 탈산의 2가지 조건으로 수행하였다.

실험 시간은 설정된 부식 환경 조건하에서 비교적 장기간에 해당되는 약 4개월(3000h)로 하여, 304 스테인리스강 용접부에 대한 SCC 민감성(susceptibility)을 평가하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+\alpha)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}} (0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2+14.72\alpha^3-5.6\alpha^4) \quad (1)$$

2.2.4 실험 방법

CT시편에 부하된 하중 값은 시편에 연결된 load cell과 유압장치의 압력계로부터 하중-압력관계 선도를 구하여 정적 하중량을 압력으로 환산하여 제어하였다. 그리고, 온도를 제어하기 위해서는 부식조에 석영히터(quartz heater)를 설치하고, 열전대(thermo-couple)와 온도 조절기(thermo-controller)를 통하여 수용액의 온도가 일정하게 유지되도록 하였다. 부식조의 용액은 시편 표면과의 전기 화학적 반응에 의해서 시간 경과에 따른 부식 용액의 염화물 농도 변화를 일정하게 유지하기 위해서 순환시켰으며, 화학적 평형을 위해서 7일(168hrs)을 주기로 새로운 용액으로 교체하였다.

탈산(deoxidation)의 경우는 순도 99.99%의 질소 가스를 0.5 l/min로 계속 주입하였고, 산소 포화의 경우는 순도 99.99%의 산소를 0.3 l/min씩 계속 주입하여 용액 중의 산소 포화 농도가 일정하게 유지되도록 하였다.

이상과 같은 조건하에서 일정 시간이 경과한 후 예상되는 응력부식균열의 발생 및 성장유·무와 피복 처리하지 않은 노출부(HAZ부)의 부식에 의한 열화 정도를 파악하기 위해서는 직류전위차법(DCPD method)을 이용하고, $V/V_{-a}/W$ 교정곡선으로부터 균열의 성장 여부를 판단하였다.

SCC 분위기하의 열화재에 대한 파괴인성치(J_{IC}) 측정에는 ASTM E813⁵⁾에 준하여 실시하였으며, 컴플라이언스법(compliance method)에 의한 균열 길이 측정을 위하여, 균열 길이가 0.25mm진전할 때마다 하중의 10%를 제하(unloading)하였다. 또한, 시험에 사용된 개구변위계(COD gage)는 총 변위가 12mm로 시험시 변위가 12mm가 되면 시험을 멈추도록 하였으며, 전체적인 제어는 개구변위계에 의한 변위제어로 진행

하고 제하시에만 로드셀(loadcell)에 의한 하중 제어가 되도록 하였다.

그리고, 실험 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 실험의 제어와 data 처리는 MTS사의 파괴 인성 평가 전용 프로그램을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 전기화학적 부식 민감성 평가

전 절 2.1의 분극실험을 통하여 얻어지는 부식전류 밀도(current density)와 ASTM G5⁶⁾에 제시된 식(2)로부터 부식속도(corrosion rate)를 구하여 부식 민감성을 비교, 평가하였다. Faraday 법칙에 의거하여 부식전류밀도로부터 부식속도를 다음과 같이 구할 수 있다.⁷⁾

$$\text{corrosion rate}(mpy) = \frac{0.129 \times i_{cor} \times E.W}{\rho} \quad (2)$$

여기서, $E.W$ (equivalent weight) = $\sum fi Mi/ni$

fi : 원자분율, Mi : 원자량, ni : 원자가

ρ : 밀도(g/Cm³), i_{cor} : 부식전류밀도($\mu A/Cm^2$)

부식전류밀도는 두 가지 방법, 즉 Tafel 외삽법과 직선 분극법으로 측정할 수 있다. Tafel 외삽법은 전위, 전류 분극곡선에서 Tafel 관계식을 준수하는 부분을 외삽법으로 찾아서 부식전위(E)와 교차하는 점이 부식전류밀도이다.

$$E = E' \pm (\beta_a, \beta_c) \log(i_o, i_c/i_a, i_c) \quad (3)$$

여기서, E' : 평형전위, β_a : 양극 Tafel 상수,

β_c : 음극 Tafel 상수, i_o : 교환전류밀도,

i_a : 양극전류밀도, i_c : 음극전류밀도

Figs. 5,6은 3.5wt.% NaCl 수용액을 탈산과 산소포화 상태에서 각각 수행한 동전위 분극실험 결과이다.

Table 3은 Figs. 5,6의 결과를 바탕으로 Tafel외삽법에 의해 계산된 부식속도를 정리한 것이다. 상온에서 탈산인 경우가 산소포화에 비해 공식전위(E_{pit})가 낮고 부식속도도 빠르나, 비등점(boiling point)인 95℃에서는 산소포화의 경우가 큰 공식전위와 빠른 부식속도를 보였다. 그리고, 탈산과 산소포화 공히 고온에서 공식전위가 낮고 부식속도도 빠르게 나타났다.

이와 같은 결과는, 스테인레스강과 같이 안정된 부동태 산화피막을 가지는 경우, 용액중의 Cl⁻이온에 의해 산화피막이 파괴 및 불안정해지고, 용존산소는 이러한 Cl⁻이온의 활성도를 증가시킴으로써, 부식이 촉진된다.⁸⁾ 그러나, 저온에서는 3.5wt.% NaCl 수용액의 점도(viscosity)가 고온에 비해 크기 때문에, 부식에 직접적 영향을 미치는 Cl⁻이온과 O₂의 활성도가 떨어지고 부동태 산화피막의 파괴속도도 느려 부식속도가 크지 않으나, 고온에서는 수용액의 점도가 감소하여 부식인자(Cl⁻, O₂)들의 활성도가 상대적으로 증가 됨으로써, 부식전위가 감소함과 동시에 부식속도도 증가한 것으로 판단된다.

3.2 SCC 민감성

설정된 SCC 조건하에서 오스테나이트계 304 스테인레스강 용접부에 대한 인공 열화 기간(약 4개월, 3000hrs)동안 직류전위차법(DCPD method)으로 시간 경과에 따른 전위 변화량을 측정한 결과, 실험 초기의 500시간까지는 시편 표면의 금속과 부식 용액과의 전기 화학적 반응 및 보호 피막(protect film) 형성 등으로 인해 전압의 변화가 상당히 불안정한 경향을 나타내었다. 그러나, 500hrs이후부터는 장시간의 실험 기간에도 불구하고 부식전위값의 변화량은 초기

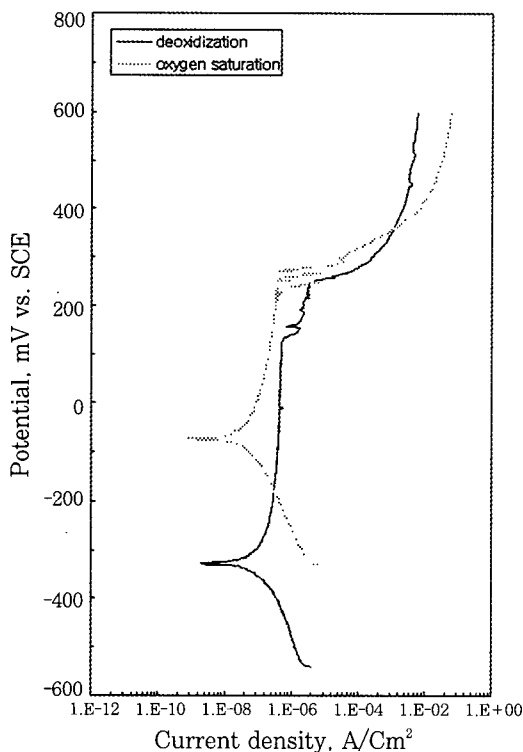


Fig. 5 Potentiodynamic polarization curves of 304 stainless steel in 3.5 wt.% NaCl at 25°C

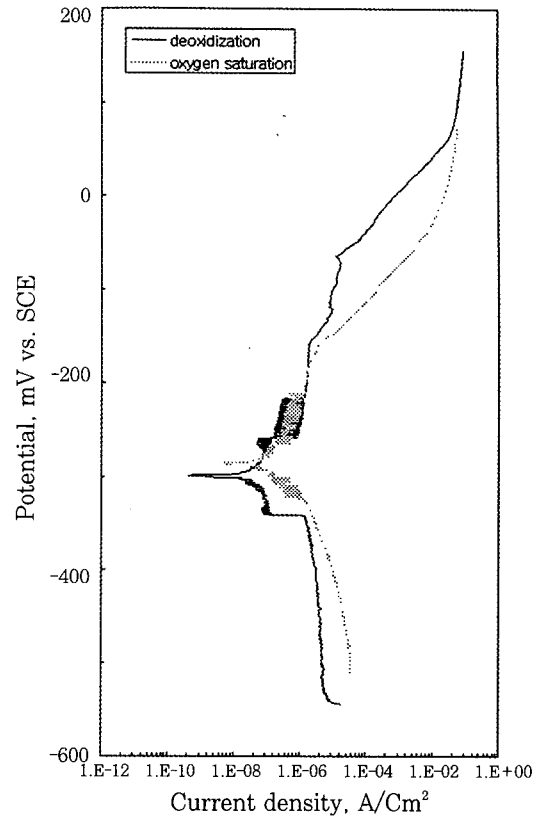


Fig. 6 Potentiodynamic polarization curves of 304 stainless steel in 3.5 wt.% NaCl at 95°C

Table 3. Electro-chemical corrosion characteristics in 3.5wt% NaCl solution by potentiodynamic test

| | deoxidization | | O ₂ saturation | |
|------|------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | Corrosion Rate (mpy) | Epit (mV vs. SCE) | Corrosion Rate (mpy) | Epit (mV vs. SCE) |
| 25°C | 64.45×10 ⁻³ | 130 | 24.78×10 ⁻³ | 270 |
| 95°C | 678.2×10 ⁻³ | -181 | 1006×10 ⁻³ | -64 |

전압에 비해 균열의 성장을 판단할 만큼 크지 않았다.

이를 확인하기 위해서 3000hrs이 경과한 후, 시편을 부식조로부터 탈거하고 시편 표면을 초음파 세척하여 노치(Notch)로부터 생성시킨 예비균열단(pre-crack tip)을 광학현미경으로 면밀히 관찰한 결과, Photo.1과 같이 주어진 환경 조건하에서 SCC에 의한 균열 성장을 확인할 수 없었고, 단지 소성역(plastic zone)부근만이 전기 화학적 반응에 의해 국부적으로 부식되었음을 관찰할 수 있었다.

이상과 같이, 본 실험에서 설정한 SCC 분위기 하에서 304 스테인레스강 용접부에 나타나는 내환경 특성의 원인을 여러 가지로 생각해 볼 수 있겠으나, 본 연

구에서는 다음 몇 가지 사항을 바탕으로 하여 고찰하고자 하였다. 즉, 용접시 발생하는 용접 입열량으로 인해 입계부식균열에 예민화된 스테인리스강 용접부는 염화물(chloride)과 황화물(sulfide)등과 같은 부식성 환경 중에서 활성경로 부식기구(mechanism of active path corrosion)에 의하여 SCC를 야기시킬 수 있으나, 전면 부식이 생긴다거나, 치밀한 부동태 피막이 형성되는 경우에는 발생이 어렵다는 것이고, 금속학적으로는 오스테나이트계 스테인리스강 중에 존재하는 Ni은 C의 활성(activity)을 높여 용접 입열량에 의해 재료가 쉽게 예민화되게 하는 반면, 염화물 중에서 부식 전위를 상승시키는 부식 방지 효과와 표면에 안정된 부동태 피막을 형성하여 SCC에 대한 저항성을 향상시키는 성질이 있다. 또한, Cr성분은 내식성을 증대시키는 역할을 하며, 특히 Mn은 안정화제(stabilizer)로서 부식환경하에서 SCC 발생을 억제하는 작용을 하는 것으로 확인되고 있다.^{9,10)} 따라서 A. J. Sedriks는 부식환경중의 염화물 농도와 용존산소를 고려한 연구결과¹¹⁾를 통해 오스테나이트계 스테인리스강에 있어서 SCC가 발생되는 환경의 임계치가 존재함을 밝히고, 용존산소와 염화물의 농도를 제어함으로써 SCC의 발생을 억제할 수 있음을 확인하였다. 이 밖에도, SCC의 진행과정에서 잠복기(duration period)가 전체의 90%를 차지하는 특성¹²⁾을 고려할 수도 있고, 특히, 용액중에 용존산소농도와 염소이온(Cl⁻)농도가 0.1ppm이하에서는 SCC가 발생되지 않음도 고려할 수 있다.¹³⁾

이상과 같은 사항들로부터, 본 실험에서 설정한 SCC 환경 조건하에서 균열의 재성장은 관찰되지 않았으며, 이로부터 장시간 열화된 오스테나이트 스테인리스강 용접부에 대한 파괴인성(J_{IC}) 특성을 평가하고자 하였다.

3.3 열화된 304 스테인리스강 용접부의 파괴인성(J_{IC}) 평가

3.2절의 결과와 같이 응력부식 조건하에서 3000여 시간의 장시간에 걸친 인공열화에도 불구하고 SCC에 의한 균열의 발생과 진전이 관찰되지 않은 경우는 파괴역학적 균열 진전 특성을 평가할 수 없다. 그러나, 균열이 진전하지 않았다고 해서 재료가 가지고 있는 기계적 물성을 그대로 유지하는 것은 아니다. 환경인자(environmental factor)와 금속학적 인자(metallurgical factor), 역학적 인자(mechanical factor)의 상호 작용으로 인해 재료 자체의 열화는 필연적으로 발생할 수밖에 없고, 특히 균열의 선단(tip)

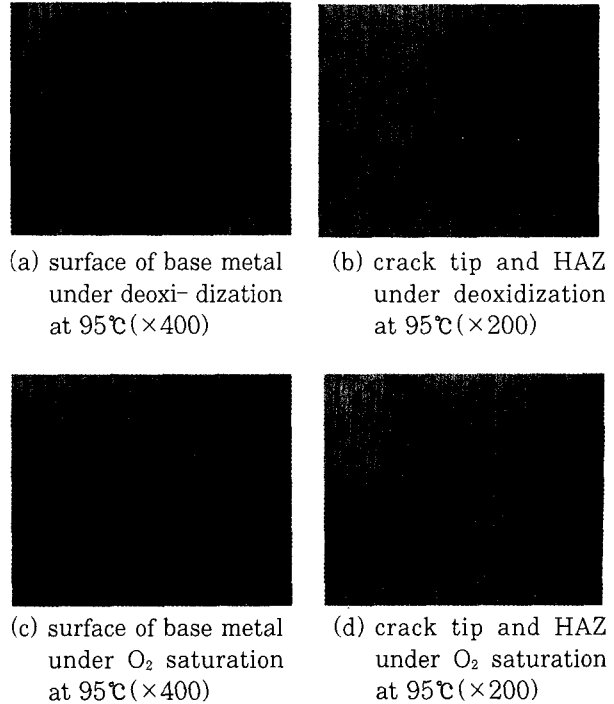


Photo 1. Surface conditions of 304 stainless steel weldments after 3000hrs in 3.5% NaCl soluting

부와 내부가 다른 표면에 비해 더욱 더 열악한 부식 환경을 형성함과 동시에 활성(activity)이 크다는 점을 감안한다면, 균열이 존재하는 응력 부재에 있어서 균열 진전이 개시되지 않거나 정제된 경우에도 재료 열화에 의해서 예기치 않은 균열의 불안정 성장이 야기될 수 있음을 고려하여, 균열재가 장시간 부식환경 하에서 열화된 경우에 대한 파괴 인성을 평가할 필요가 있다고 사료된다. 따라서, 304 스테인리스강의 용접부가 산소 포화상태, 탈산 상태의 3.5wt% NaCl수용액 및 $K_I=21MPa\sqrt{m}$ 의 정하중 조건하에서 3000시간 동안 열화된 경우와 열화되지 않은 경우에 대하여 J_{IC} 값을 측정하여 비교함으로써 열화 정도에 따른 신뢰성을 파괴 역학적으로 평가하였다. Fig. 7은 SCC 환경 조건에서 장시간 열화된 304 스테인리스강의 파괴인성(J_{IC}) 평가 결과이다. 상온에서 산소 포화상태와 탈산 상태의 결과는 차이가 없지만 비열화재에 비해서 35%가 감소하고, 고온의 경우에는 용존산소량에 따라 43~45%의 J_{IC} 값의 감소를 나타내나, 특히 산소포화의 경우에서 가장 큰 감소를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 균열 선단부에 균열 진전은 없었지만 장시간의 부식으로 인하여 단면적 감소는 물론 열화가 잠재적으로 진행된 결과로 간주되며, 이러한 J_{IC} 값의 감소는 재료의 열화도에 따라 균열이 불안정 성장을 일으킬 수 있음과 동시에, 그 시점이 점차 빨라질 수

있음을 의미한다. 이상의 결과는 항복강도의 65%의 응력하에서 2000시간동안 600℃에서 경년열화된 304 스테인레스강과 유사한 화학조성을 갖는 WN 1.4948의 J_{IC} 값이 40% 감소하고, 이러한 인성의 감소는 입계 탄화물의 침적과 응력에 의한 전위의 증가와 관련된다고 하는 G.T.M.Janssen¹⁴⁾의 연구결과와 장기간 고온환경 하에서 열화된 용접재의 파괴인성의 변화는 304 스테인레스강과 같은 고인성의 용접재일수록 크게 감소한다는 I.J.O'Donnell(15)의 연구결과와도 일치된다. 즉, 본 연구결과에서도 Fig. 7에서와 같이 열화되지 않은 시편에서 600Nmm/mm²의 J_{IC} 값을 나타내는 304 스테인레스강 용접부의 경우, 인공열화 후 35~45%의 감소를 나타내었다. 그리고, 이와 같은 파괴인성 감소의 결과는 동전위 분극실험의 결과와 비교, 평가될 수 있는데, 부식속도의 증가에 따라 열화재의 파괴인성 감소율은 점차 증가하며, 부식속도가 가장 큰 고온 및 산소포화의 조건에서 감소율이 가장 큼을 확인할 수 있다. 따라서, 부식속도와 재료의 환경에 의한 열화도는 비례적인 관계에 있다고 할 수 있다. 스테인레스와 같은 부동태 금속의 부식에 있어서 주된 지배과정으로 파악되고 있는 양극용해과정 중에서 부식속도의 증가는 다량의 산화물 생성과 수소발생을 초래하게 되어 재료의 열화를 더욱 촉진시키는 것으로 생각되지만, 이를 정확히 규명하기 위해서는 향후 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

오스테나이트계인 304 스테인레스강의 용접부를 대상으로 하여, 동전위 분극실험과 정적 하중 조건하에

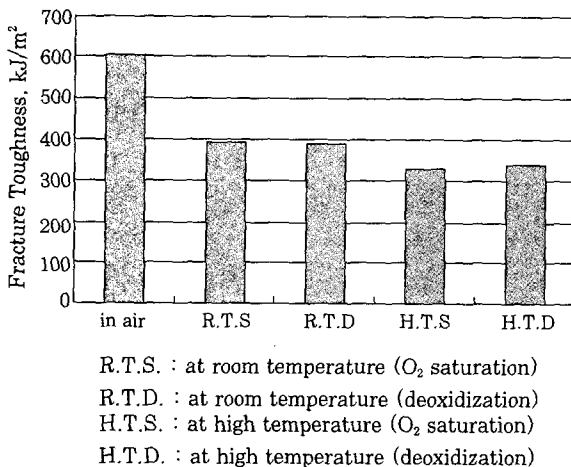


Fig. 7 Fracture toughness of 304 stainless steel weldment in various corrosion environments

서 자체 개발한 소형 자세가변형 SCC 전용시험기에 의하여 SCC에 대한 민감성을 장기적으로 관찰한 후, 열화도의 평가 측면에서 파괴 인성(J_{IC})시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전기화학적 분극시험결과, 3.5wt.% NaCl 수용액 중의 산소농도와 온도가 증가하면, 부식속도가 상온에 비해서 상당히 증가한다.
- 2) 3.5wt.% NaCl 수용액을 탈산한 경우에도 온도가 증가하면 부식속도가 증가하여 재료는 열화될 수 있다.
- 3) SCC 조건하에서 장기간 열화된 304 스테인레스강 용접재의 파괴인성 감소는 비 열화재에 비해 상온 열화재는 35%, 고온 열화재는 43~45%로 나타내었다.
- 4) SCC 조건하에서 장기간 열화된 용접재에 대한 파괴인성 평가는 설비의 안전성과 열화도 예측을 위해 유용함을 알 수 있었다

후 기

본 논문은 기초전력공학공동연구소와 성균관대학교 산업설비 안전성 평가센터(SAFE)의 지원 하에 이루어진 것으로, 관계자 여러분에게 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. "腐食と破壊", 日本機械學會, 日本工業出版社, (1984).
2. ASTM E399-90, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Material", Annual Book of ASTM Standards, (1994), pp. 421-423.
3. ASTM E647-93, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standards, (1994), pp. 683-685.
4. J.E.Srawley : "Wide Range Stress Intensity Factor Expression for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens", International Journal of Fracture Mechanics, Vol, 12, (1976), pp. 475-476.
5. ASTM E813-89, "Standard Test Method for JIC, A Measurement of Fracture Toughness", Annual Book of ASTM Standards, (1994), pp. 628-635.

6. ASTM G5-94, "Standard Reference Test Method for Making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement", Annual Book of ASTM Standards, (1997), pp. 54-58.
7. S.W. Dean, John Wiley : Handbook on Corrosion Testing and Evaluation, (1971), p.171.
8. Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie : Corrosion and Corrosion Control, (1985), pp.50-53.
9. 이학렬 : 금속부식공학, (1990), pp. 54-56.
10. Denny A. Jones : Principle and Prevention of Corrosion, (1997), p. 239.
11. A. J. Sedriks : Corrosion of Stainless Steels, John Wiley & Sons, New York, (1979), p.158
12. C. D. Kim and B. E. Wilde : "A Review of the Constant Strain-Rate Stress Corrosion Cracking Test", ASTM STP 665, (1979), pp.97-112.
13. 伊藤義康 : "發電機器における溶接部の破壊と溶接残留應力解析システム", 溶接技術, 日本 溶接協會, (1995), 9.
14. G.T.M.Janssen, J.V.D.Eikhoff, and H.J.M.van Rongen : "Prediction of Ductile Crack Growth in the Austenitic Steel WN 1.4948 at Ambient and Elevated Temperature" , Commission of the European Communities, vol. L, Paper L5/2, (1981).
15. I.J.O'Donnell, H.Huthmann and A. A. Tavassoli : International J. Pressure Vessel Piping, Vol. 65, (1996), pp. 209-220.