

## 고온수중에서 STS 304 스테인리스강의 응력부식균열 성장속도

김 정 기\*  
(1999년 2월 24일 접수)

### Stress Corrosion Crack Growth Rate of STS 304 Stainless Steel in High Temperature Water

Jeong-ki, KIM

**Key Words:** Corrosion Fatigue(CF ; 부식피로), Environmentally Assisted Crack(EAC ; 환경조장균열), Crack Growth Rate(CGR ; 균열성장속도), Time Based Analysis(TBA ; 시간기준 해석), Stress Corrosion Crack(SCC ; 응력부식균열)

#### Abstract

Sensitized STS 304 stainless steel crack growth rate(CGR) in high temperature water was investigated under trapezoidal wave loading test using fracture mechanics techniques. The CGR, due to stress corrosion cracking(SCC), were systematically measured as a function of the stress intensity factor and stress holding time under trapezoidal wave loading. In high temperature water, CGR was enhanced by a synergistic effects in combination with an aggressive environment and mechanical damage. The CGR,  $(da/dN)_{env}$  was basically described as a summation of the environmentally assisted crack growth rate  $(da/dN)_{SCC}$ ,  $(da/dN)_{CF}$  and fatigue crack growth rate in air  $(da/dN)_{air}$ . The CGR,  $(da/dN)_{env}$  increased linearly with increasing stress holding time. The CGR,  $(da/dt)_{SCC}$  decreased linearly with increasing stress holding time. Fracture surface mode varied from trans-granular cracking to inter-granular cracking with increasing stress holding time.

#### 1. 서론

원자력 발전설비의 운전수명은 일반적으로 40년으로 되어 있으나, 일찍이 원자력 발전설비를 도입한 미국 등에서는 20년 더 연장하려는 계획이 진행되고 있으며, 대상 기기도 선정되어 있다. 그러나 초기에 건설된 원자력 설비의 경우 파괴역학적 평가가 수행되지 않았던 관계로 안정성 또는 기술적인 근거에 기초하고 있는 것은 아니다.<sup>(1)</sup> 이를 위해서는 초기 설계수명을 경과하였어도 정도 높은 잔여수명 예측기술에 의한 검토결과 충분한 안전성을 확보하는 것이 요구되고 있다. 따라서 원자력 발전설비의 경년화 및 수명연

장의 관점에서 구조재료의 경년변화의 정량적 파악 및 수명평가 방법의 개발이 중요한 과제로 되어 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>(2~4)</sup>

원자력 발전설비의 대표적인 경년열화·손상형태에는 피로손상, 조사손상, 시효, 크리프 및 부식이 관여된 응력부식균열(stress corrosion cracking ; SCC)이나 부식피로(corrosion fatigue ; CF) 등을 들 수 있다. 미국의 상업용 원자력 발전설비에서는 1969년부터 1983년 사이에 110건의 응력부식손상, 414건의 부식손상사례가 보고되고 있다.<sup>(5)</sup>

응력부식균열이나 부식피로는 재료, 환경 및 역학적 인자가 상호 작용하여 발생하는 현상<sup>(6)</sup>으로 모든 인자의 영향을 실험적으로 규명하는 데는 어려움이 많아, 그 발생기구의 해명 및 균열성장속도의 정량적 평가방법은 아직 통일된 견해에는 도달하지 못했다.<sup>(7~9)</sup>

\* 회원, 전주공업대학 기계과

E-mail : jkkim@jtc.ac.kr

TEL : (0652)220-3814 FAX : (0652)220-3819

따라서, 실기의 기동·운전·정지를 모의한 하중 상승·유지·하강 시간 등의 부하모드를 변화시켜 응력부식균열 발생과정에서의 역학적 요인을 규명하고 균열성장속도를 정량적으로 평가하는 일도 통일된 견해에 도달할 수 있는 데이터베이스 축적 차원에서 중요하다.

본 연구에서는 비등수형 원자로(boiling water reactor ; BWR) 수환경을 모의한 고온고압수환경 중에서 예민화열처리를 실시한 STS 304 스테인리스강의 응력부식균열 성장속도에 미치는 하중 유지시간과 용존산소농도 즉, 환경의 영향을 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편

실험에 사용된 재료는 원자로 구조물 및 배관에 사용되고 있는 STS 304 스테인리스강으로 화학성분 및 기계적 성질을 각각 Table 1, 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.06	0.41	0.88	0.03	0.005	18.29	8.25

Table 2 Mechanical properties(R.T)

Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Hardness [HB]
269	610	61	159

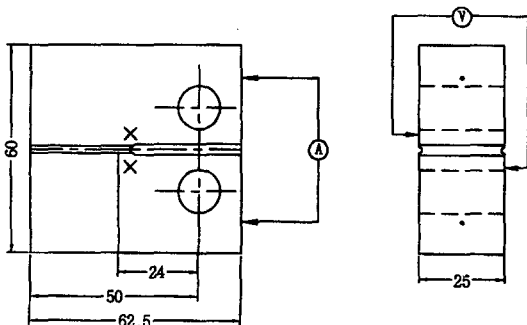


Fig. 1 Dimensions of 1T-CT specimen

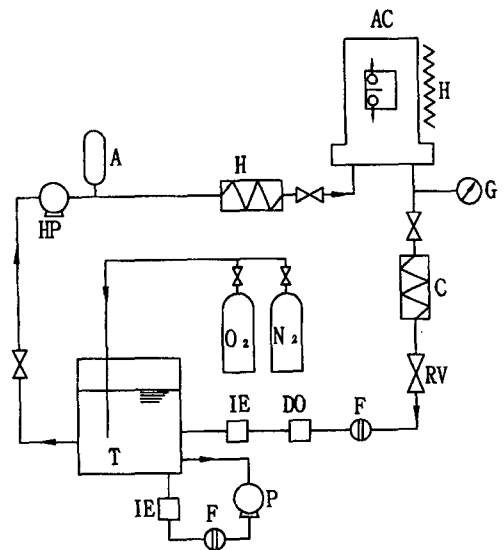
용접열영향부를 모의하기 위해 621℃에서 24시간 유지시킨 후, 공냉시키는 예민화열처리를 실시한 후, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 ASTM E-399 규격<sup>(10)</sup>에 준하여 1T-CT 시험편으로 가공하였고, 균열 전파방향은 압연방향과 일치시켜 예비균열을 도입한 후, 하중유지시간을 변화시킨 응력부식균열 실험에 제공되었다.

### 2.2 실험장치

#### 2.2.1 고온고압수 순환루프

Fig. 2에 실험에 사용한 모의 BWR 고온고압수 순환루프의 개략을 나타내었다.

시험온도는 288℃, 압력 8.3MPa(84.6kgf/cm<sup>2</sup>)의 비비등 조건에서 실시하였다. 저수조는 대기 개방형이고, 용존산소농도는 순수한 산소가스와 질소가스를 저수조에 폭기시켜 조절하였다. 물의 도전율은 오토크래브 입구에서 0.2μ S/cm 이하의 고순도를 유지시켰다.



- A : accumulator
- AC : autoclave
- RV : regulator valve
- T : reservoir tank
- IE : ion exchanger
- HP : high pressure pump
- H : heater
- G : pressure gage
- C : cooler
- F : filter
- P : pump
- DO : D.O meter

Fig. 2 Diagram of the recirculating autoclave

**Table 3** Water chemistries of simulated BWR

Pressure	8.3MPa
Temperature	288℃
pH(at R.T)	5.9
Conductivity	inlet<0.2 μ S/cm outlet<4 μ S/cm
D.O	inlet>20ppm outlet<2ppm
Flow rate	0.2 Volume exchange/hr

한편 시험편의 고정은 시험편과 시험편 체결용 지그 사이에 지르코니아로 만든 슬리브를 삽입시켜, 시험편과 오토크래브를 전기적으로 절연시켰다.

Table 3에 본 실험에 사용한 모의 BWR 수화학 조건을 나타내었다.

2.2.2 환경부식전위(ECP)의 측정

환경부식전위(environmental corrosion potential)의 측정에는 고온고압수용 압력평형형 Ag/Ag Cl 외부조합전극을 사용하였다. 전극 본체는 지르코니아로 만들었고, 표면전체에 산화피막을 형성시켜서 시험용액, 전극용기, 전극액 등과 전기적으로 절연시켰으며, 냉각수를 통과시켜 Ag/Ag Cl 전극부를 상온으로 유지시켜 전극의 열화를 방지함과 동시에 재현성이 좋은 측정을 실현하였다. 또 작용전극은 스테인리스 강선을 스폿 용접하여 접속시켰다. 부식전위의 계측기로는 일렉트로 미터(北斗電工製 HA501)를 사용하였다.

이 전극에서 얻어지는 실측전위  $E_{OBS}[mV]$ 는 식 (1)을 사용하여 표준수소전극전위  $E_{SHE}[mV]$ 로 환산할 수 있다.<sup>(11)</sup>

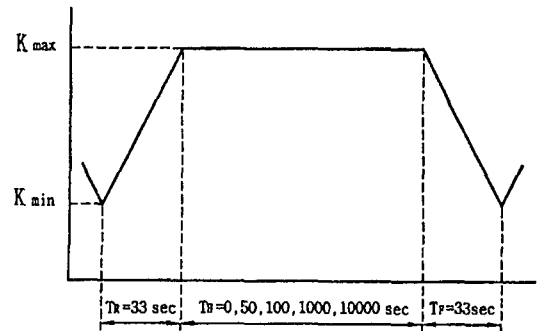
$$E_{SHE} = E_{OBS} + 0.2866 - 0.001(T - 25) + 1.745 \times 10^{-7}(T - 25)^2 - 3.03 \times 10^{-9}(T - 25)^3 \quad (1)$$

여기에서  $T$ 는 시험온도 [℃]이다.

이하 본 논문에서 환경부식전위는 식 (1)로 환산한 표준수소전극전위를 사용한다.

2.2.3 교류전위차법

실험중의 균열진전량은 CGR-5R 교류전위차(A CPD) 측정기(Matelect社製)를 이용하여 온라인 계측하였다. 전류의 공급 및 전압의 계측에는 시험편에 스폿 용접한  $\phi 0.55mm$ 의 스테인리스 강선



**Fig. 3** Trapezoidal wave form

을 리드선으로 사용하였다. 스테인리스 강선의 용접위치는 Fig. 1에 나타내었다. 또한 스테인리스 강선은 열수축 튜브로 피복하여 시험기 및 다른 리드선과 전기적으로 절연시켰다. 데이터의 종류, 단위, 수집시간 등의 데이터는 데이터 로거를 개재시켜 컴퓨터 화면상에 지시하게 하였고, 하드디스크에 저장하였다.

2.2.4 응력부식균열시험

응력부식균열실험은 용량 20kN의 치차구동형 시험기(眞壁社製)를 사용하였고, 부하조건은 최대 응력확대계수  $K_{max}=31MPa \sqrt{m}$ , 응력비  $R=0.2$ 로 하였다. 응력확대계수는 ASTM E399에 제시된 Srawley의 식을 이용하여 계산하였다. 균열성장속도에 미치는 하중유지시간의 영향을 조사하기 위하여 태형파(trapezoidal wave form)의 하중상승시간( $T_R$ ) 및 하중하강시간( $T_F$ )은 모두 33초로 일정하게 하였고, 하중유지시간( $T_H$ )은 0, 50, 100, 1000, 10000초의 5종류였으며 Fig. 3에 그 개략을 나타내었다. 실험 종료 후, 시험편을 대기중에서 피로 파단시켜 균열길이를 측정하였고, 균열진전량은 파면상의 시험편 두께를 8등분하여 양측표면을 제외한 7점의 평균값을 균열진전량으로 하였다. 그 후 주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 파면관찰을 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 응력부식균열 성장속도

Fig. 4는 시험시간의 경과에 따른 균열진전거동을 나타내는 교류전위차(ACPD)와 용존산소 농도(D.O)의 변화에 따른 환경부식전위(ECP)의 변화

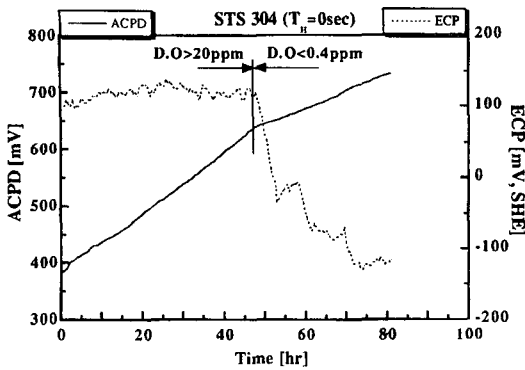


Fig. 4 The variation of ACPD & ECP

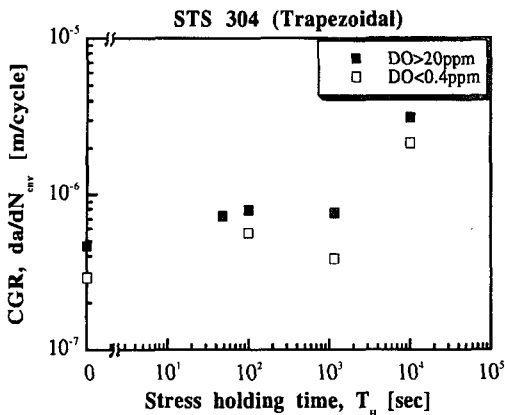


Fig. 5 The effect of DO & stress holding time on crack growth rate  $(da/dN)_{env}$

거동을 나타낸 예이다.

먼저 부식전위의 변화거동을 살펴보면 순수한 산소를 폭기시킨 20ppm 이상의 용존산소 농도의 부식전위는 약 120mV<sub>SHE</sub>로 높고, 순수한 질소를 폭기시킨 0.4ppm 이하의 용존산소 농도의 부식전위는 점차 감소하여 대략 -120mV<sub>SHE</sub>에서 포화되고 있다. 이러한 부식전위의 변화거동에서 용존산소 농도가 자연부식전위에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

또한 균열 진전량에 해당하는 교류전위차 거동을 살펴보면 용존산소 농도 20ppm 이상에서는 곡선의 기울기가 커서 균열진전이 빠르고 0.4ppm 이하에서는 곡선의 기울기가 감소하여 균열진전이 느림을 알 수 있다.

Fig. 5는 고온고압수환경중에서 얻어진 응력부식균열성장속도  $(da/dN)_{env}$ 의 변화거동을 하중유지

시간( $T_H$ )별로 정리한 것이다. 하중유지시간의 증가와 함께 균열성장속도는 증가하고 있다. 또한 균열성장속도에 미치는 용존산소농도의 영향을 살펴보면 같은 하중유지시간에서 용존산소 농도 20ppm(기호 ■)의 수환경에서의 균열성장속도가 용존산소 농도 0.4ppm(기호 □)의 수환경에서의 균열성장속도 보다 전반적으로 빠름을 알 수 있다. 따라서 균열성장속도는 환경중의 용존산소 농도 즉, 자연부식전위에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이때 하중유지시간  $T_H=1000$ 초의 경우 균열성장속도가 저하된 이유는 3.2의 파괴기구에서 고찰한다.

고온 고압 수환경 중에서의 전체균열성장속도  $(da/dN)_{env}$ 는 ANL보고서<sup>(12)</sup>의 선형가산법칙을 적용하면 환경에 의해 증진되는 균열(environmentally assisted cracking ; EAC)성분인 일정하중하에서의 응력부식균열 성장속도  $(da/dN)_{SCC}$ 와 부식피로 균열성장속도  $(da/dN)_{CF}$  그리고 대기중에서의 피로균열성장속도  $(da/dN)_{air}$ 의 합인 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dN}\right)_{env} &= \left(\frac{da}{dN}\right)_{EAC} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{air} \\ &= \left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{CF} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{air} \quad (2) \end{aligned}$$

시간기준해석(time based analysis)에 의한 일정 하중 하에서의 단위시간 당의 응력부식균열 성장속도  $(da/dt)_{SCC}$ 는 식 (2)에서 우변의 2, 3번째 항을 이항시키고, 하중유지시간  $T_H$ 를 1주기로 생각하면 단위시간 당의 하중반복속도  $(dN/dt)$ 는 주파수  $f(=1/T_H)$ 가 되므로 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{da}{dt}\right)_{SCC} &= \left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC} \times \left(\frac{dN}{dt}\right) \\ &= \left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC} \times f = \frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{SCC}}{T_H} \\ &= \frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{env} - \left(\frac{da}{dN}\right)_{CF} - \left(\frac{da}{dN}\right)_{air}}{T_H} \quad (3) \end{aligned}$$

여기에서  $T_H$ 는 하중유지시간(sec),  $f$ 는 하중반복속도(주파수)이다.

Fig. 6에 응력확대계수  $K_{max}$ 과 시간기준 응력부식균열 성장속도  $(da/dt)_{SCC}$ 의 관계를 나타내었다. 그림에서 응력확대계수  $K_{max}=31\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서 응력부식균열 진전속도  $(da/dt)_{SCC}$ 는 하중유지시간에

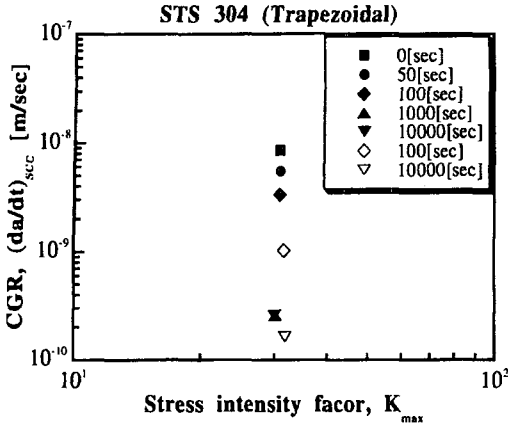


Fig. 6 Crack growth rate as a function of  $K_{max}$

따라 변화하고 있어서, 고온고압수환경에서 응력부식균열 성장속도의 평가 파라미터로 응력확대계수  $K_{max}$ 이 반드시 적당한 것은 아님을 알 수 있다. 시간기준해석에 의한 환경조장균열 성장속도는 응력확대계수  $K$ , 응력확대계수 진폭  $\Delta K$ , 반복속도  $f$  또는 응력비  $R$  등에 의존하지 않고 표현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나, 현 상태에서는 부식피로의 경우에 대기 중에서의 균열성장속도  $(da/dt)_{air}$ 를 알면 고온고압수환경에서의 균열성장속도  $(da/dt)_{env}$ 를 정량적으로 예측할 수 있으나,<sup>(12)</sup> 일정하중 하에서 발생하는 응력부식균열의 성장속도  $(da/dt)_{scc}$ 를 포함시킨 통일된 균열성장속도 예측방법은 아직 도출되지 않았다.<sup>(7~9,12,13)</sup>

Fig. 7에 하중유지시간  $T_H$ 의 함수로 시간기준 응력부식균열 성장속도  $(da/dt)_{scc}$ 를 나타내었다. 응력부식균열 성장속도는 하중유지시간 1000초까지는 선형으로 감소하고 있으나, 하중유지시간 1000초 이상에서는 포화되고 있음을 알 수 있다. 이러한 균열선단의 역학적 인자와 수화학 환경의 조합에 의해 증진되는 균열성장속도에 미치는 인자는 주로 하중상승시간 중의 역학적 인자의 기여가 제일 크고, 하중유지시간 중의 역학적 인자의 기여는 작으며, 하중하강시간의 영향은 없는 것으로 해석되고 있다.<sup>(14)</sup> 따라서 응력부식균열 성장속도는 하중반복속도  $f$ 에 크게 의존하므로 시간기준해석에 의한 표현이 일반적이다.<sup>(7~9,12~15)</sup>

그림에서 기호  $\blacklozenge$ 로 나타낸 하중유지시간  $T_H =$

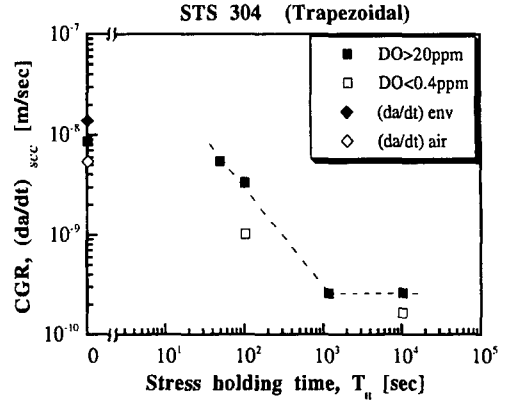


Fig. 7 Crack growth rate during stress holding time

0초일 때는 삼각파의 부식피로에 해당하며 식 (2)의 환경중에서의 균열성장속도  $(da/dN)_{env}$ 에서 일정하중 하에서 발생하는 응력부식균열 성장속도  $(da/dN)_{scc}$ 를 제외한 환경조장 균열성장속도  $(da/dN)_{CF}$ 와 대기중의 피로균열성장속도  $(da/dN)_{air}$ 의 합으로 표현되며, 대기 중에서의 피로균열성장속도  $(da/dt)_{air}$ 는 ASME Sec.XI<sup>(12)</sup>에서 제시하고 있는 다음 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{air} = 3.43 \times 10^{12} (1 + 1.8R) \frac{\Delta K^3.2}{T_R} \quad (4)$$

여기에서  $R$ 은 응력비,  $\Delta K$ 는 응력확대계수 진폭,  $T_R$ 은 하중상승시간이다.

Fig. 6과 7에서 하중유지시간 1000초의 용존산소 농도가 0.4ppm인 경우의 데이터가 없는 이유는 환경중에서의 균열진전속도는  $(da/dN)_{env}$ 가 대기중에서의 균열성장속도  $(da/dN)_{air}$ 보다 느리기 때문에 식 (2)에서 시간기준 균열성장속도를 구할 수 없었다. 그 이유는 3.2의 파괴기구에서 고찰한다.

### 3.2 파괴기구

Fig. 8은 각각의 하중유지시간에 따른 SEM 관찰 사진으로 하중유지시간 100초까지는 전형적인 부채꼴 모양의 입내취성파면(TG)을 보여주고 있으며, 하중유지시간 1000초에서는 입내취성파면(TG)과 입계취성파면(IG)이 혼재하고 있으며, 10000초에서는 입계취성파면(IG)만이 나타나고 있다. 이러한 입계취성파면(IGSCC)은 용접입열에 의해 입계에  $M_{23}C_6$ 형의 탄화물이 석출됨으로써

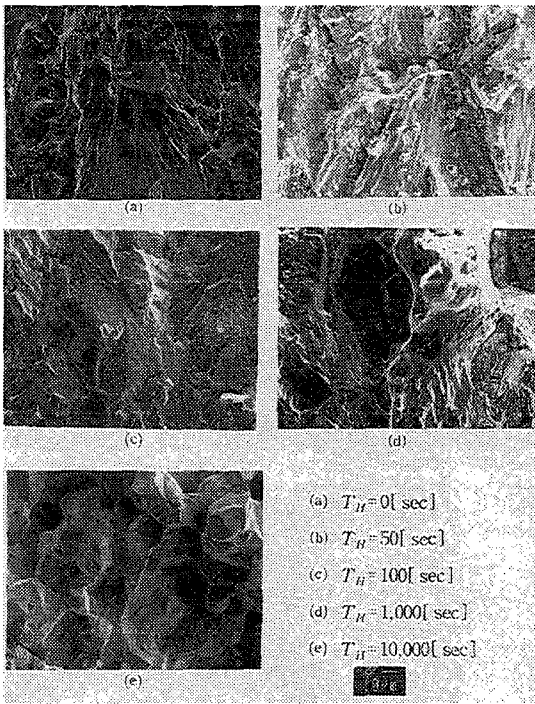


Fig. 8 Fracture surfaces variation under trapezoidal wave loading

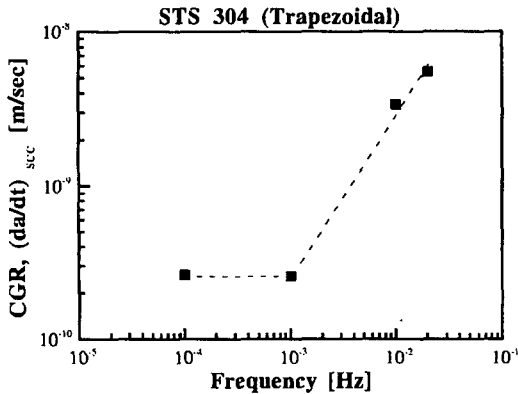


Fig. 9 Relation between  $(da/dt)_{SCC}$  and frequency  $f$

의해 입계에  $M_{23}C_6$ 형의 탄화물이 석출됨으로써 입계 근방에 형성된 Cr 결핍층이 선택적으로 부식되어 발생하는 것으로 잘 알려져 있다.<sup>(14)</sup>

橫堀 등은 금속의 피로균열전파속도는 응력반복속도  $f$ 가 큰 영역에서는 응력반복수  $N$ 만으로 결정할 수 있고,  $f$ 가 작은 영역에서는 시간만으로

결정할 수 있으며, 중간영역의  $f$ 에서는 응력반복수  $N$ 과 시간이 서로 독립적으로 작용하고 천이과정으로 피로균열전파속도가 저하한다고 실험을 통하여 제안하고 있다.<sup>(15)</sup>

Fig. 9는 시간기준 균열성장속도  $(da/dt)_{SCC}$ 와 응력반복속도  $f(=1/T_H)$  사이의 관계를 나타낸 것이다.  $f=0.001$  이하(하중유지시간 1000초 이상)에서 균열성장속도는 주파수 축과 평행하여 시간의존성을 나타내고 있고,  $f=0.001$  이상(하중유지시간 1000초 이하)에서 균열성장속도는 직선적으로 증가하고 있어 하중 반복속도에 의존하고 있음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 5~7에서 하중유지시간 1000초는 중간영역의 응력반복속도에 해당되어 균열전파속도가 저하하였다고 생각되며,<sup>(15)</sup> 용존산소 농도 0.4ppm 이하에서는 대기중의 균열성장속도보다 느려졌다고 생각할 수 있으며, BWR수화학의 조절로 환경부식전위를 저하시키면 이미 균열이 존재하는 구조부재의 균열진전속도를 감소시킬 수 있는 한 방법임을 제시하는 것이다.

Fig. 8의 파면관찰 결과와 Fig. 9의 관계를 살펴보면 하중유지시간이 1000초 이하일 때는 입내취성파면(TG)만이 보이고 있어 하중상승시간 중의 역학적 인자인 동적 부식피로와 환경인자의 상호작용에 의해 균열성장속도가 현저하게 증대됨을 알 수 있다. 그러나, 하중유지시간이 10000초에서는 동적 부식피로의 역학적 인자의 영향은 아주 감소되고, 균열성장속도에 미치는 기여도가 작은 일정하중에 의한 역학적 인자와 균열선단의 환경인자의 조합에 의해 균열이 진전되어 입계응력부식균열(IGSCC)이 발생되고, 균열성장속도는 일정하게 된다.<sup>(14,15)</sup> 따라서 하중유지시간의 증가와 함께 파괴형태의 지배인자가 동적 부식피로의 역학적 인자에서 일정하중의 역학적 인자와 균열선단의 환경인자로 바뀌는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

에민화 열처리를 실시한 STS 304 스테인리스강을 대상으로 모의 BWR 수환경에서 하중유지시간과 용존산소농도를 변화시킨 응력부식균열실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 환경중의 균열성장속도는 용존산소농도에 큰 영향을 받고 있으며, 재료손상/환경의 영향으로 증진되었다.

(2) 응력부식균열성장속도는 시간만으로 결정할 수 있어 기존의 단위사이클당의 균열성장속도 ( $da/dN$ )보다 시간기준 균열성장속도 ( $da/dt$ )로 나타내는 것이 좋다.

(3) 파면관찰결과 하중유지시간의 증가와 함께 입내취성파면(TG)에서 입계취성파면(IG)으로 파괴모드가 변화되고 있다.

(4) 응력부식균열 성장속도에 미치는 역학적 인자와 환경인자의 영향은 하중유지시간이 1000초 이상이 되면 하중상승시간 중의 역학적 인자의 영향이 감소되고, 하중유지시간 중의 역학적 인자와 균열선단의 수화학 인자의 영향을 받게 된다.

### 참고문헌

- (1) 小林 英男, 1992, "經年損傷の非破壊評價と壽命予測," 安全工學, 제31권, 제2호, p. 76.
- (2) 김 영진 외, 1996, "원자력배관 건전성평가 전문가 시스템 개발(1)-평가법 제시 및 재료물성치 추론-," 대한기계학회논문집(A), 제20권 제2호, pp. 575~584.
- (3) 이 강용 외, 1997, "원자력발전소 가압기 밀림관 노즐의 잔존 피로수명평가," 대한기계학회 논문집(A), 제21권, 제8호, pp. 1259~1269.
- (4) 정 순억, 1997, "국산 원자로용기 재료의 피로 및 파괴특성 연구," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제10호, pp. 1626~1635.
- (5) ASME, 1991, ASME PVRC Program on Code Criteria for Cyclic Life and Environmental Effects (draft 3).
- (6) 庄子 哲雄 外, 1994, 火力·原子力および化學プラント機器·構造部材の經年劣化と壽命予測, リアライズ社, 東京都, p. 29.
- (7) Ford, F. P. and Emigh, P. W., 1995, "The Prediction of The Maximum Corrosion Fatigue Crack Propagation Rate in The Low Alloy Steel de-Oxygenated Water System at 288°C," *Corrosion Science*, Vol. 25, No. 8/9, pp. 673~692.
- (8) Gabetta, G and Torronen, K., 1985, "Prediction of Cyclic Crack Growth Rate in LWR Environments," *Proc. of 2nd IAEA Specialists' Meeting on Subcritical Crack Growth*, Vol.2, Sendai, May 13~15, pp. 131~154.
- (9) 森谷 信一, 1995, "輕水爐壓力壁部材の應力腐食割れ舉動の定量予測に關する研究", 日本 東北大學校 博士學位論文, 仙台市, p. 2~25.
- (10) ASTM E 399, 1991, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials."
- (11) Andresen, P. L., 1981, "Innovations in Experimental Techniques for Testing in High Temperature Aqueous Environments," *Technical Infomation Series*, 81CRD088, General Electric, N.Y., p. 4.
- (12) Shack, W. J., Kassner, T. F., 1994, "Review of Environmental Effects on Fatigue Crack Growth of Austenitic Stainless Steels," *NUREG /CR-6176*, ANL-94/1, p. 7.
- (13) Ford, F. P, Taylor, D. F. and Andresen, P. L., 1987, "Corrosion Assisted Crackin of Stainless and Low Alloy Steels in LWR Environments," *EPRI NP-5046M*, Project 2006-6, Final Report, pp. 2~10.
- (14) Kawakubo, T., Hisida, M., Amano, K., and Katsuta, M., 1980, "Crack Growth Behavior of Type 304 Stainless Steel in Oxygenated 290°C Pure Water Under Low Frequency Cyclic Loading," *Corrosion*, Vol. 369, No. 11, pp. 638~647.
- (15) 横堀 武夫, 1989, "先端材料強度と破壊における疑問点とその解決へのアプローチ," 일본금속학회회보, 제23권, 제9호, pp. 703~704.