

# 高張力鋼의 腐蝕疲勞에 미치는 溶液溫度의 影響에 關한 研究

Study on Effect of Solution Temperature on Corrosion  
Fatigue of High Strength Steel

劉 憲 一\*  
Heonil Yoo

## ABSTRACT

A study has been made of the corrosion fatigue of high strength low alloy steel in 3.5% NaCl solution under tension stress for solution temperature being 25°C, 55°C and 85°C.

The main results obtained are as follows;

- 1) The corrosion fatigue crack growth rate curve could be divided into the First Region, the Second Region and the Third Region.
- 2) The corrosion fatigue crack growth rates in the First Region and the Second Region were Arrhenius temperature-dependent in this test range. The apparent activation energies for the corrosion fatigue crack growth rate were found to be 2000cal/mol in the First Region and 3700 cal/mol in the Second Region.
- 3) Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) as the hexahedral crystal and magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) as the octahedral crystal were observed in the corrosion products on the corrosion fatigue fracture surface at 85°C and the anode fusion seem to be generated in the crack tip region at high temperature.
- 4) The complex environment effect ratio which was defined by the ratio of fatigue crack growth rate in corrosion environment to that in air might be considered not only a criterion estimating the effect of environment quantitatively but also an important parameter in the selection of the design stress for the fail safe design. The complex environment effect was not greater than ten in this test.

## 1. 序 論

기계와 구조물의 파괴사고의 원인은 대부분

이 疲勞에 의한 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 석유탱크, 화학플랜트, 파이프라인, 압력용기 등 기계, 구조물의 대형화, 고성능화에 따라 개발된

\* 正會員, 國民大 工大 機械工學科

여러가지 高強度鋼 및 超高強度鋼이 사용하게 되었으나 이들 강도가 큰 재료는 환경감수성이 높고 부식환경중에서 반복응력을 받는 경우 즉 腐蝕疲勞에서는 불활성환경중에서의 疲勞에 비한다면 疲勞強度가 현저하게 떨어지는 특성을 갖는다.<sup>(2)</sup>

최근 원자로플랜트, 조임계압보일러, 지열 발전플랜트 및 해양구조물 등에서는 고강도재료의 사용환경의 가속화와 다양화가 진행됨에 따라 기계, 구조물의 강도설계와 보전면에서 환경강도문제가 절실해지고 있으며 환경중에서 疲勞에 관한 정확한 자료가 필요하고 그 기구에 대한 해명이 요구되고 있다.<sup>(3)</sup>

본 연구에서는 현재 많은 기계, 구조물에 널리 사용되고 있는 熔接用高張力鋼에 대한 腐蝕疲勞舉動을 검토하여 설계응력선정의 기준을 명확히 하고자 한다. 강도가 약 80 kgf/mm<sup>2</sup> 인 高張力鋼을 이용하여 3.5% 식염수용액속

에서 시험온도를 25℃, 55℃ 및 85℃로 유지하면서 용존산소량을 다르게 한 환경에서 균열성장속도가 얼마만큼 가속되는지 또 기본적인 기구가 무엇인지 규명하려고 한다. 腐蝕疲勞龜裂成長이 환경에 어떤 영향을 받는지 파괴역학적으로 정리하고 아울러 走査型電子顯微鏡에 의한 파괴면관찰로 균열성장거동과 그 기구를 검토하여 균열속도의 가속특성을 명확히 하여 그 결과를 설계응력의 선정이나 부재의 수명추정의 기초로 응용하려고 한다.

## 2. 材料 및 實驗方法

### 2-1 材料 및 試驗片

실험에 사용된 재료는 두께 30 mm로 압연된 高張力鋼으로 그 화학성분과 상온에서의 기계적성질은 Table 1과 2에 나타나 있다.

시험편의 모양과 치수는 Fig. 1에 나타나 있

Table 1. Chemical composition (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	B
0.11	0.28	0.94	0.011	0.005	0.23	0.74	0.42	0.001

다. 균열진행방향이 LT 방향이 되도록 가공하였고 노치의 끝에 깊이 1.5 mm의 예균열을 Table 3에 표시한 조건으로 상온에서 넣었다.

Table 2. Mechanical properties

Yield stress kgf/mm <sup>2</sup>	U. T. S kgf/mm <sup>2</sup>	Elongation %
81	86	21

Table 3. Condition of fatigue precrack

crack length mm	P <sub>max</sub> kgf	P <sub>min</sub> kgf	R = $\frac{P_{min}}{P_{max}}$	environment
0 - 0.5	2600	800	0.30	Air
0.5 - 1.0	2200	800	0.36	Air
1.0 - 1.5	1800	800	0.22	Air

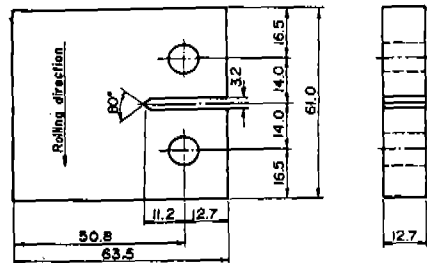


Fig. 1. Dimension of WOL-CT specimen

### 2-2 實驗裝置

실험에 사용한 시험기는 레버식저속반복인 장시험기로 최대용량 3 ton 이며 Photo. 1에 나타나 있다. 시험편은 아르퀼수지계의 환경조속속에 있고 그 속을 소정의 부식용액이 순환

하도록 되어있다. 하중은 윗접시에 최소하중  $P_{min}$  을 아래접시에 변동하중  $\Delta P$  를 가하도록 되어있고 疲勞荷重發生裝置는 이미 소개한 논문에서<sup>(4)</sup> 자세히 설명되어 있다. 유압잭에 의해 얻어지는 疲勞荷重波形은 사다리꼴로 주파수, 최대하중보유시간 및 최소하중보유시간은 조압기로 임의로 설정한다. 본 실험에서는 주파수는 12 cpm, 최대 및 최소하중 보유시간은 1.7~2.0 sec 가 되도록 조정하였다.

균열길이의 측정은 25~50 배의 현미경으로 광학적으로 하였으며 應力擴大係數의 계산은 다음식으로 하였다.<sup>(5)</sup>

$$K = \frac{P}{BW^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{2 + \frac{C}{W}}{(1 - \frac{C}{W})^{\frac{3}{2}}} \left\{ 0.886 + 4.64 \left( \frac{C}{W} \right) - 13.32 \left( \frac{C}{W} \right)^2 + 14.72 \left( \frac{C}{W} \right)^3 - 5.6 \left( \frac{C}{W} \right)^4 \right\} \quad (0.2 \leq \frac{C}{W} \leq 1) \dots\dots\dots (1)$$

여기서

$P$  = 하중 (kgf)

$B$  = 시험편두께 (mm)

$W$  = 하중중심으로부터 측정한 시험편나비 (mm)

$C$  = 하중중심으로부터 측정한 균열길이 (mm)

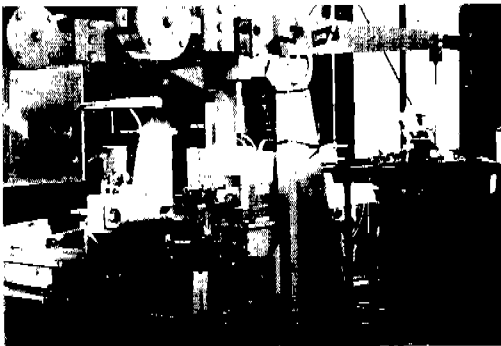


Photo. 1 Testing machine

2-3 温度制御裝置

공기중에서의 疲勞舉動에 대한 온도의존성을 조사하기 위해 소형의 恒溫槽를 사용하였다.

시험편에 납땜하여 붙인 熱電對로 온도를 측정했으며 恒溫槽내의 가열은 니크롬선에 흐르는 전류를 조정함으로써 제어하였다. 이 장치로 시험온도를 얻을 수 있었고 온도변동은 최대  $\pm 2^{\circ}C$  이하로 만들 수 있었다.

2-4 腐蝕環境制御裝置

본 실험의 부식환경으로 3.5% 식염수용액을 사용했으며 腐蝕疲勞試驗의 부식환경을 일정하게 하기위해 Fig.2에 나타난 것과 같이 제어장치를 만들어 용액의 농도, 온도, pH를 일정하게 하고 환경조에는 일정유속으로 용액이 순환될 수 있도록 했다. 환경조안에는 시험편외에 pin, chunk 및 rod의 일부가 들어가므로 이런 부품들의 표면에 epoxy-enamel를 도포하여 전기화학적반응이 일어나지 않도록 배려하고 환경조와 rod 사이에는 O-ring을 삽입하여 용액이 새지 않도록 하였다. 용액과 시험편이 소정의 온도를 유지하도록 온도측정 sensor를 시험편 균열진전부 가까이에 장착했다. 또 용액중의 溶存酸素量을 일정하게 하기 위해 공기 또는 질소를 환경조내에 계속 첨가하였고 배기는 Liebig's condenser를 통하여 용액의 증발을 막도록 하였다.

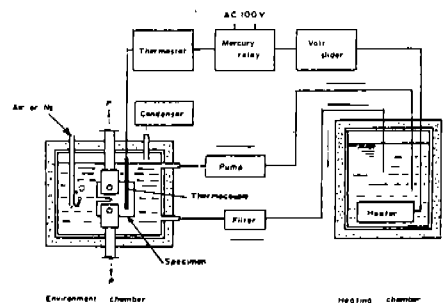


Fig. 2. Schematic diagram of environmental control system

加熱槽로부터 환경조로 용액을 순환시키는 데 microbellows pump와 siphon을 이용하여 순환유량이 250 cc/min가 되도록 조정하였다. 용액의 가열은 유리제 heater 2개로 한

게는 보온용으로 항상 통전되고 다른 하나는 thermostat을 통해 volt slider로 자동제어하여 소정의 온도를 유지하고 온도변동은 이 경우  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내였다. 가열조와 환경조는 10 mm 두께의 발포 polystyrol로 단열하였고 시험 중에 발생하는 부식생성물을 제거하기 위하여 glass wool filter을 가열조와 환경조사이에 설치하였다. 첨가기체의 bubbling을 실험개시 약 2시간전부터 하고 용액이 소정온도가 되고 난 후 약 30분 경과하여 모든 계가 거의 정상상태로 들어간 다음 실험을 하였다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3-1 空氣中 및 腐蝕環境中の 疲勞龜裂의 傳播

공기중 및 3.5% 식염수용액중에서 시험은 도를  $25^\circ\text{C}$ ,  $55^\circ\text{C}$  및  $85^\circ\text{C}$ 로 택하고 용액중에 공기를 첨가하는 경우와 질소를 첨가하는 경우로 나누어 피로시험을 했다.

부식피로시험에서는 피로균열발생동안에 노치밑에서의 금속의 선택적인 부식용해를 막기 위해 깊이 1.5 mm의 피로균열을 실온에서 도입하였다. 공기중의 피로시험에서도 본 실험의 초기조건과 같게 하기 위하여 예균열을 도입한 시험편을 사용하였다. 따라서 본 실험은 균열의 발생이나 피로수명의 평가를 위한 것이 아니고 피로균열성장률에 대한 평가가 된다.

일정한 반복회수마다 시험편표면을 측정하여 얻어진 龜裂成長曲線은 공기중에서는 온도  $25^\circ\text{C}$ ,  $55^\circ\text{C}$  및  $85^\circ\text{C}$ 에 거의 차이가 나타나지 않았고 3.5% 식염수용액에서는 공기중의 피로에 비해서 균열성장률이 현저히 가속되고 온도의 영향도 아주 크며 최종파단까지의 반복회수는 온도가 높아질수록 작아진다. 최종파단시의 피로균열길이는 공기중이거나 3.5% 식염수용액중이거나 또 시험온도, 첨가기체에는 상관없이 대체로 같게 나타난다.

#### 3-2 空氣中の 疲勞龜裂成長速度

균열성장곡선으로부터 균열성장속도  $dc/dN$

을 구하고 應力擴大係數幅  $\Delta K$ 의 함수로 정리한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 실험결과  $25^\circ\text{C}$ ,  $55^\circ\text{C}$  및  $85^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 균열 성장에 온도의 영향은 거의 없고 다음식이 성립한다.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_a = C_a (\Delta K)^{\delta_a} \dots\dots\dots (2)$$

최소자승법에 의해 식(2)의 상수를 구하면  $C_a = 3.77 \times 10^{-6}$ ,  $\delta_a = 2.35$  이고 단위는  $\Delta K$ 가  $\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$ ,  $dc/dN$ 는  $\mu/\text{cycle}$ 이다. 공기중의 피로균열성장속도에 대한 응력비와 평균응력의 영향에 관한 실험은 하지 않았으나 부식피로시험과 거의 같은 정도의 하중조건에서는 그 영향은 아주 작은 것으로 생각되므로<sup>(6)</sup> 이후 부식피로결과와 비교하기 위하여 공기중의 피로균열성장속도를 이용한다.

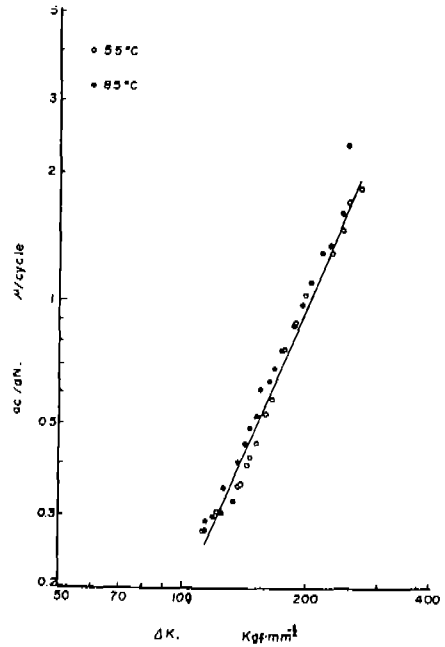


Fig. 3. Fatigue crack growth rate vs cyclic stress intensity in air ( $P_{max} = 260 \text{ kgf}$ ,  $P_{min} = 800 \text{ kgf}$ )

#### 3-3 腐蝕疲勞 龜裂成長速度

##### 3-3-1 應力比의 영향

부식피로에서 피로하중의 응력비에 의한 영

함을 조사하기 위하여 몇가지 다른 하중조건에서 실험한 결과가 Fig. 4에 표시되었다. Fig. 4는 온도가 55°C이고 공기를 첨가한 경우이며 거의 하나의 곡선상에 있으므로 응력비의 영향은 거의 없다고 볼 수 있다. 다른 온도와 다른 첨가기체의 경우에도 같은 결과를 얻었다.

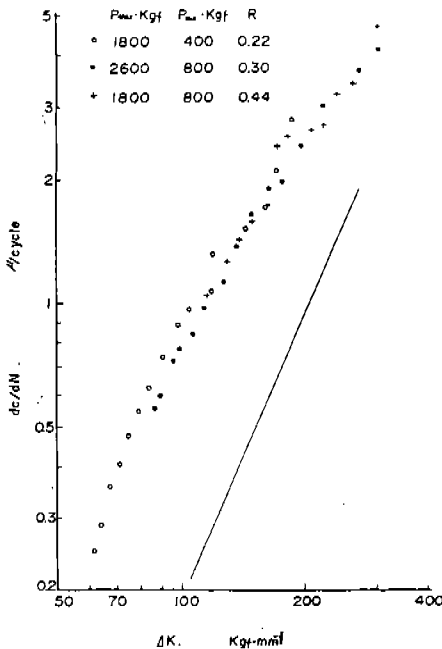


Fig. 4. Relation between corrosion fatigue crack growth rate and stress ratio (containing air at 55°C)

3-3-2 添加氣體의 영향

3.5% 식염수용액중에서 부식피로에 의한 용액중의 용존산소량의 영향을 조사하기 위해 부식피로시험중 계속해서 공기 또는 질소를 첨가하였다. 용존산소량을 측정하지는 않았으나 25°C에서 공기를 첨가한 경우 용존산소량이 8ppm 정도, 질소를 첨가하는 경우 0.1ppm 정도로 알려져 있다.<sup>(7)</sup> 용존산소량이 다르고 55°C의 경우가 Fig. 5에 나타나 있으며 다른 온도의 경우에도 균열성장거동은 첨가 기체에 별다른 차이가 없다.

그러나 부식피로시험중 3.5% 식염수용액

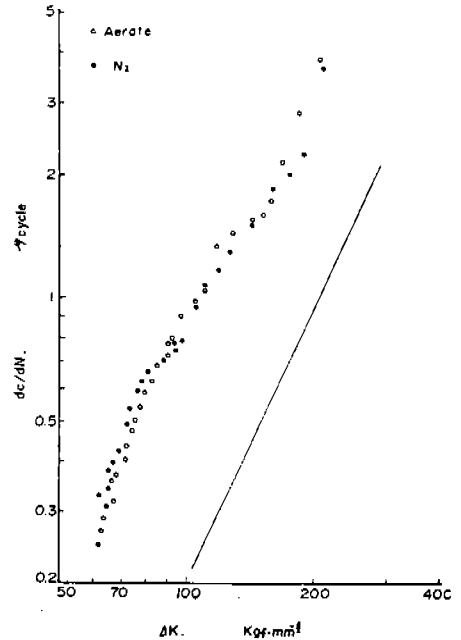


Fig. 5. Corrosion fatigue crack growth rate ( $P_{max}=1800 \text{ kgf}$ ,  $P_{min}=800 \text{ kgf}$ ,  $55^\circ\text{C}$ )

중에 공기를 첨가하는 경우 시험편 표면은 시간이 흐름에 따라 부식이 진행하여 부식생성물이 표면에 형성되어 시험이 끝날 무렵에는 표면은 완전히 금속광택이 없어졌다. 질소를 첨가하는 경우 시험편 표면은 거의 부식이 일어나지 않고 시험이 끝날 무렵에도 거의 완전하게 금속광택을 가지고 있었다. 이와같이 용존산소량이 부식에 큰 영향을 갖는 데도 불구하고 부식피로 균열성장속도에 대한 영향은 거의 없다.

3-3-3 溶液溫度的 영향

龜裂成長曲線으로부터 龜裂成長速度  $dc/dN$ 를 구하여 應力擴大係數幅  $\Delta K$ 로 정리하면 Fig. 6(a)와 (b)이며 공기중의 피로와는 달리 응력확대계수폭  $\Delta K$ 에 따라 다른 경향을 보이고 있다.  $\Delta K$ 가 작은 영역에서는 균열성장속도에 대한 영향이 아주 커서 이 영역을 第 I 領域이라 한다. 이 영역에서는 어떤 온도에서도  $\log dc/dN$ 와  $\log \Delta K$ 사이에는 직선관계가 성립하고 각 온도에 대한 직선은 서로가

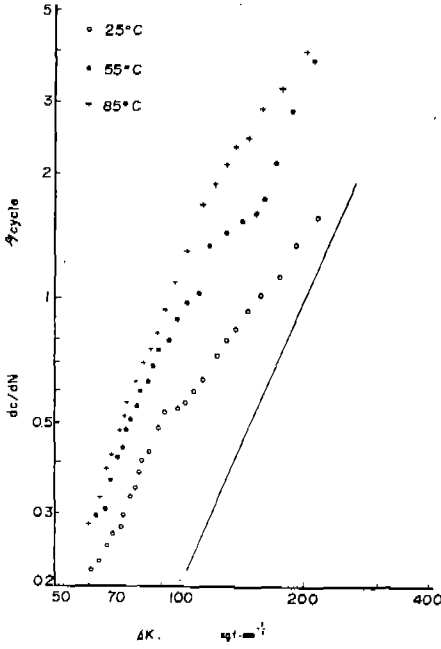


Fig. 6.(a) Relation between corrosion fatigue crack growth rate and temperature ( $P_{max} = 1800 \text{ kgf}$ ,  $P_{min} = 800 \text{ kgf}$ , containing air)

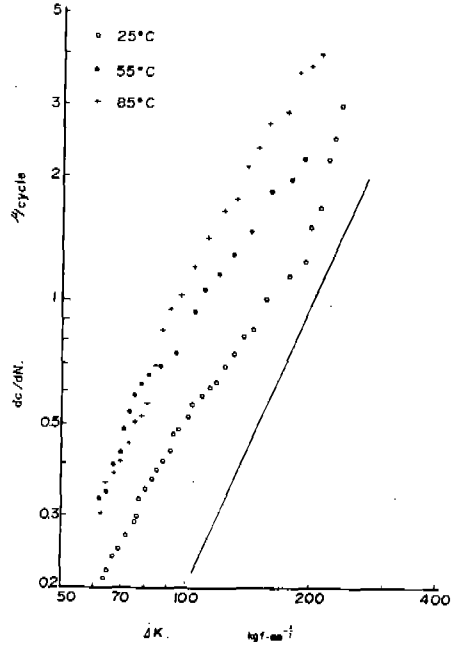


Fig. 6.(b) Relation between corrosion fatigue crack growth rate and temperature ( $P_{max} = 1800 \text{ kgf}$ ,  $P_{min} = 800 \text{ kgf}$ , containing  $N_2$ )

거의 평행한 기울기를 가지며 공기중 피로에 대한 균열성장속도의 직선 기울기와 아주 가깝다.  $\Delta K$ 가 약  $90 \text{ kgf} / \text{mm}^{3/2}$  이상의 영역에서는 환경에 의한 균열성장속도의 가속이 작아지고 또한 온도에 의한 차도 명확하다. 이 영역이 第II領域이며  $\log dc/dN$ 와  $\log \Delta K$  사이의 직선관계는 성립하나 第I領域에 비해 직선의 기울기는 작다.

$\Delta K$ 가 증가함에 따라 腐蝕疲勞는 점점 공기중 피로에 접근하고  $\Delta K$ 가 어떤값 이상이 되면  $dc/dN$ 는 공기중의  $(dc/dN)_0$ 와 거의 일치하게 되는데 이 영역이 第III領域이다.

腐蝕疲勞의 균열성장특성에는 어떤 온도에서도 3개의 영역을 추정할 수 있고 각 영역에서는 다음 관계가 성립한다.

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_i = C_i (\Delta K)^{\delta_i} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $i$ 는 각 영역을 나타내고  $C_i$ 는 온

도와 영역에 따라 정해지는 상수이고  $\delta_i$ 는 영역에 따라 달라지는 변수로 이들 상수를 Table 4에 표시하였다.

### 3-3-4 腐蝕疲勞龜裂成長에서의 결보기活性化 에너지

腐蝕疲勞에서 용액온도의 영향을 조사하기 위해 25°C, 55°C 및 85°C의 시험온도를 설정하여 일정한  $\Delta K$ 에 대한  $dc/dN$ 의 관계를 구하고 절대온도의 역수  $1/T$ 를 정리하면 Fig. 7이 얻어지고 직선관계로부터 이 온도범위에서는  $dc/dN$ 가 Arrhenius 형의 온도의존성을 갖는다. 第I, II領域에서 직선은 서로 평행하고 영역 특유의 기울기를 가지며  $dc/dN$ 와  $1/T$  사이에는 다음 관계가 성립한다.<sup>(8)</sup>

$$\left(\frac{dc}{dN}\right)_i = A_i \exp(-Q_i/RT) \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $i$ 는 영역을,  $A_i$ 는 영역에 의해 정해지는 상수,  $Q_i$ 는 결보기活性化에너지,  $R$ 은

Table 4. Constants from corrosion fatigue crack growth rate curves

(a) 3.5% salt water containing air

region \ temp.		25 °C	55 °C	85 °C	ave.
I	C	$2.45 \times 10^{-5}$	$3.60 \times 10^{-5}$	$5.04 \times 10^{-5}$	—
	$\delta$	2.20	2.17	2.17	2.18
II	C	$1.84 \times 10^{-3}$	$2.95 \times 10^{-3}$	$4.72 \times 10^{-3}$	—
	$\delta$	1.23	1.27	1.25	1.25
fatigue in air		$C_{air} = 3.77 \times 10^{-6}, \delta_{air} = 2.35$			

(b) 3.5% salt water containing N<sub>2</sub>

region \ temp.		25 °C	55 °C	85 °C	ave.
I	C	$4.16 \times 10^{-5}$	$5.55 \times 10^{-5}$	$3.15 \times 10^{-5}$	—
	$\delta$	2.05	2.12	2.24	2.14
II	C	$9.36 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-3}$	$5.59 \times 10^{-4}$	—
	$\delta$	1.36	1.35	1.66	1.46
fatigue in air		$C_{air} = 3.77 \times 10^{-6}, \delta_{air} = 2.35$			

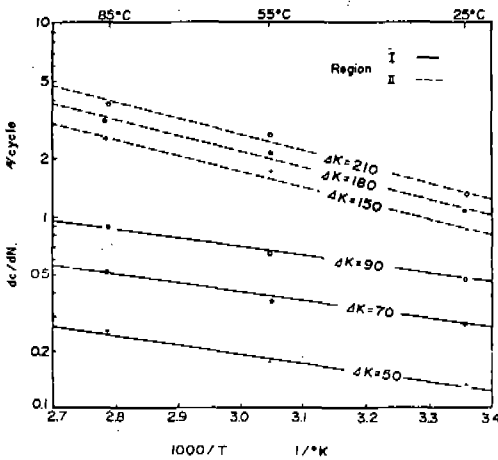


Fig. 7. Relation between fatigue growth rate and temperature (containing air)

가스상수이다.

第Ⅰ領域과 第Ⅱ領域에 대한 결보기 활성화 에너지  $Q_i$  를 구하여 Table 5 (a)와 (b)에 나타냈다. 본 실험범위내에서는  $Q_i$  는  $\Delta K$ 에 따라 크게 변하지 않으며 용존산소량에도 별다

른 차이가 없다. 영역별로 계산된 평균 결보기 활성화에너지는 第Ⅰ領域에서 2000 cal/mol 이고 第Ⅱ領域에서는 3700 cal/mol 였다.

3-3-5 腐蝕疲勞 龜裂加速係數

본 실험에서 재료-환경계의  $K_{Isc}$  는 높은 값을 가지고 있으며 반복하중의 최대응력 확대 계수  $K_{I max}$  는 대체로  $K_{Isc}$  이하이므로 공기 중에서 피로균열성장속도가 환경에 의해 가속 되었을때 腐蝕疲勞 龜裂加速係數를 다음과 같이 정의한다.<sup>(9)</sup>

$$m = \left(\frac{dc}{dN}\right)_i / \left(\frac{dc}{dN}\right)_a \dots\dots\dots (5)$$

Table 4로부터  $m$ 을 계산하여 Table 6에 표시하였다. 식(2), (3) 및 (4)를 식(5)에 대입하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 m_i &= \left(\frac{dc}{dN}\right)_i / \left(\frac{dc}{dN}\right)_a = C_i (\Delta K)^{\delta_i} / \\
 &C_a (\Delta K)^{\delta_a} = C_{oi} (\Delta K)^{\delta_i - \delta_a} \\
 &= C_{1i} (\Delta K)^{\delta_i - \delta_a} \exp(-Q_i / RT) \dots (6)
 \end{aligned}$$

Table 5. Apparent activation energy in corrosin fatigue

(a) Containing air

region	cyclic stress intensity $kgf \cdot mm^{-\frac{3}{2}}$						$Q_{mean}$ cal/mol
	50	70	90	150	180	210	
I	2.120	2.090	2.060	—	—	—	2.090
II	—	—	—	3.710	3.720	3.720	3.720

(b) Containing  $N_2$

region	cyclic stress intensity $kgf \cdot mm^{-\frac{3}{2}}$						$Q_{mean}$ cal/mol
	50	70	90	140	170	200	
I	1.720	1.940	2.100	—	—	—	1.920
II	—	—	—	3.430	3.630	3.790	3.620

여기서  $i$ 는 영역 I과 II를 나타낸다. 온도가 일정한 경우의  $m_i$ 를  $(m_i)_T$ 라고 하면 각 영역에서의  $(m_i)_T$ 는  $\Delta K$ 만의 함수가 되어 다음식이 얻어진다.

$$(m_i)_T = C_{Ti} (\Delta K)^{\delta'_i} \dots\dots\dots(7)$$

여기서  $C_{Ti}$ 와  $\delta'_i$ 는 영역과 온도에 의해 정해진다.

Table 6에 나타난  $m$ 을 온도를 변수로  $\Delta K$

의 함수로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 실선은 부식환경에 공기를 첨가한 경우 식(7)로 표시한 계산곡선이다. 계산에는 Table 4(a)의  $\delta_I=2.18$ ,  $\delta_{II}=1.25$  및 공기중 피로의  $\delta_a=2.35$ 을 사용하고 Table 5(a)에 나타난  $Q_I=2,090$  cal/mol과  $Q_{II}=3,720$  cal/mol도 사용하였다. 그림에서 실측점과 계산곡선이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

공기첨가인 경우 식(7)에  $(m_i)_T=10$ 을 대

Table 6. Complex environment effect m

environment	region	$\frac{\Delta K}{mm^{\frac{3}{2}}}$ $\frac{kgf}{mm^2}$	dc / dN $mm/cycle$				$m = \frac{dc}{dN} / \left( \frac{dc}{dN} \right)_{air}$		
			25 °C	55 °C	85 °C	air	25 °C	55 °C	85 °C
			3.5 % salt water containing air	I	50	$1.34 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-4}$	$2.45 \times 10^{-4}$	$3.71 \times 10^{-5}$
70	$2.81 \times 10^{-4}$	$3.63 \times 10^{-4}$			$5.09 \times 10^{-4}$	$8.17 \times 10^{-5}$	3.44	4.44	6.23
90	$4.88 \times 10^{-4}$	$6.27 \times 10^{-4}$			$8.77 \times 10^{-4}$	$1.48 \times 10^{-4}$	3.30	4.24	5.93
II	150	$8.74 \times 10^{-4}$		$1.71 \times 10^{-3}$	$2.48 \times 10^{-3}$	$4.90 \times 10^{-4}$	1.78	3.49	5.06
	180	$1.09 \times 10^{-3}$		$2.16 \times 10^{-3}$	$3.11 \times 10^{-3}$	$7.52 \times 10^{-4}$	1.45	2.89	4.14
	210	$1.32 \times 10^{-3}$		$2.62 \times 10^{-3}$	$3.77 \times 10^{-3}$	$1.08 \times 10^{-3}$	1.22	2.43	3.49
3.5 % salt water containing air	I	50	$1.26 \times 10^{-4}$	$2.22 \times 10^{-4}$	$2.01 \times 10^{-4}$	$3.71 \times 10^{-5}$	3.40	5.98	5.42
		70	$2.52 \times 10^{-4}$	$4.53 \times 10^{-4}$	$4.28 \times 10^{-4}$	$8.17 \times 10^{-5}$	3.08	5.54	5.24
		190	$4.22 \times 10^{-4}$	$7.71 \times 10^{-4}$	$7.51 \times 10^{-4}$	$1.48 \times 10^{-4}$	2.85	5.21	5.07
	II	140	$7.75 \times 10^{-4}$	$1.37 \times 10^{-3}$	$2.04 \times 10^{-3}$	$4.17 \times 10^{-4}$	1.86	3.29	4.89
		270	$1.01 \times 10^{-3}$	$1.77 \times 10^{-3}$	$2.82 \times 10^{-3}$	$6.58 \times 10^{-4}$	1.53	2.69	4.29
		200	$1.26 \times 10^{-3}$	$2.21 \times 10^{-3}$	$3.69 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-4}$	1.31	2.29	3.83



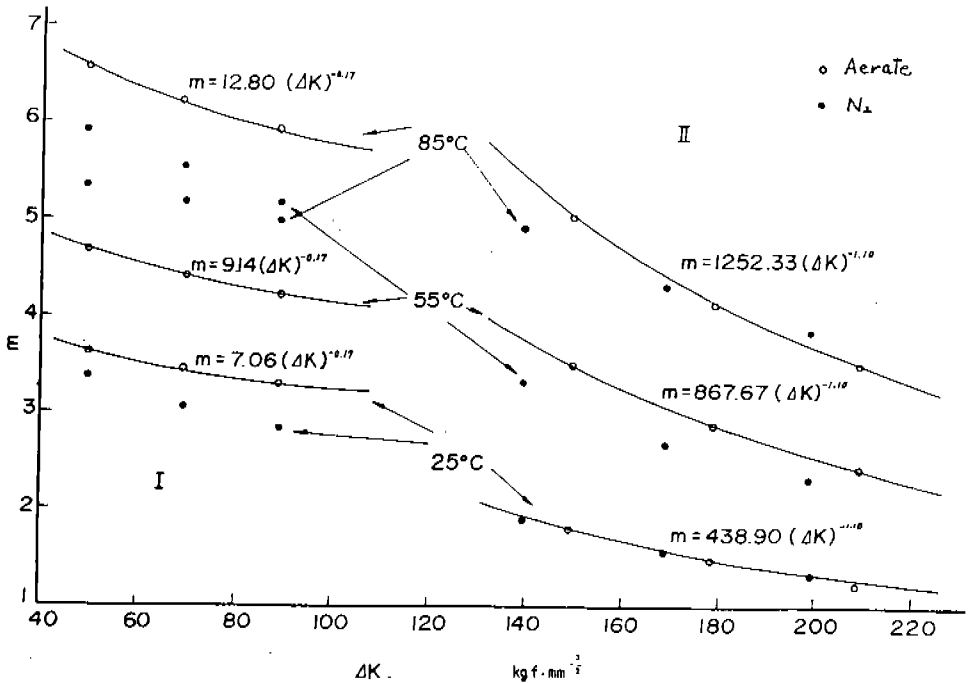


Fig. 8. Relation between  $m$  and  $\Delta K$  (3.5% salt water containing air  $N_2$ )

입하여 계산곡선을 외삽하면  $(\Delta K)m_{IT} = 10$ 의 값은 85°C의 경우  $4.3 \text{ kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$ , 55°C의 경우  $0.6 \text{ kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$  및 25°C의 경우  $0.13 \text{ kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$ 이 되고 본 실험에 사용된 교장력강의  $\Delta K_{It}$ 는 불명하나  $4.3 \text{ kgf/mm}^{\frac{3}{2}}$ 보다 큰 것으로 판단되므로 이 재료가 3.5% 식염수용액 중의 腐蝕疲勞龜裂成長速度는 공기중의 것보다 10배이상 가속될 수 없음을 추정할 수 있다.

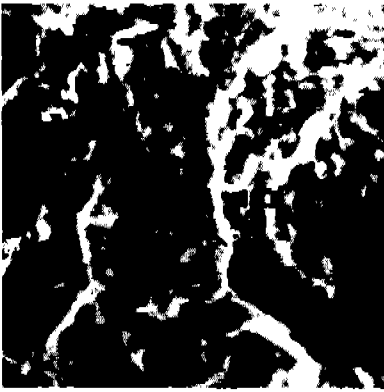
이와같이 腐蝕疲勞龜裂加速係數  $m$ 는 환경의 영향을 정량적으로 평가하는 척도로서 fail-safe 설계의 설계응력선정의 기본으로서 실용면에서 중요한 인자로 생각할 수 있다.

3-3-6 破壞面觀察

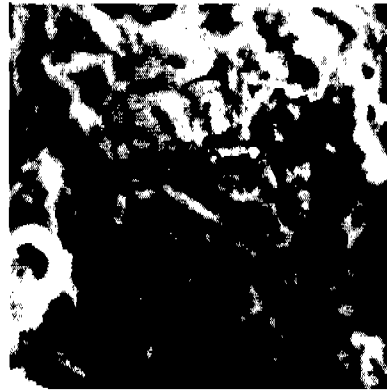
走査型電子顯微鏡을 사용하여 촬영한 파괴면의 사진을 관찰해보면 온도 또는 환경중의 첨가기체가 다르더라도 파괴면에서 큰 차를 볼 수 없었다. 第I領域에서는 파괴면에 꽤 많은 腐蝕生成物을 관찰하였으나 그 외는 第I領域과 第II領域의 파괴면에는 명확한 차이가 없었다. 兩領域에서의 전반적인 特徵은 龜裂進展方向에 거의 직각으로 평행한 2次龜裂

(화살표A)<sup>(10)</sup>이 photo. 2에서 볼 수 있는 것처럼 파괴면에 混在하고 있다. 그 간격을 측정 한즉 1~10 μ정도로 龜裂成長速度  $dc/dN$ 의 3~8배에 해당되었다. 또한 2次 龜裂은 파괴면의 한 쪽으로만 형성되고 있음을 볼 수 있었다.

photo. 3은 부식생성물의 확대사진으로 사진에서 六面體(화살표C) 혹은 八面體(화살표D)의 아주 선명한 결정을 볼 수 있는데 그 모양으로 보아  $Fe_2O_3$ (hematite) 또는  $Fe_3O_4$ (magnetite)로 판단된다. 이같은 철산화물의 선명한 결정은 비교적 고온의 용액환경 중에 철이 파과화로 용해된 상태에서 급속히 석출되는 경우에 생기는 것으로 알려져 있다.<sup>(11)</sup> 따라서 85°C의 부식피로에서는 龜裂尖端領域이 심한 陽極溶解가 일어나고 있음을 판단할 수 있다. 第III領域에서는 공기중 피로와 같이 striation모양이 파괴면 전체에 걸쳐 관찰되었고 측정된 striation 간격은 불명한 곳도 있었으나 龜裂成長速度와 거의 일치하고 있다.



(a) containing air, II region



(b) containing N<sub>2</sub>, I region

Photo. 2. Corrosion fatigue fracture surface at 85°C



(a) containing air, II region



(b) containing N<sub>2</sub>, II region

Photo. 3. Magnifying corrosion fatigue fracture surface at 85°C

### 3-3-7 腐蝕疲勞機構의 考察

부식피로는 금속의 역학적 현상과 부식반응인 전기화학적현상의 상호작용의 결과로서 이것에 영향을 주는 인자가 많기 때문에 부식피로기구를 명확히 파악한다는 것은 결코 쉬운 일은 아니지만 본 실험에서 부식피로기구에 관해서 第Ⅰ領域, 第Ⅱ領域 및 第Ⅲ領域으로 나누어 다음과 같이 고찰하였다.

#### (1) 第Ⅰ領域

다른 영역에 비해  $\Delta K$ 가 작은 범위에 해당되는 第Ⅰ領域에서는  $dc/dN$ 은 공기중피로의 것보다 가속되고  $\Delta K$ 의 함수로 표시할 수 있다. 식(3)에서  $C$ 와  $\delta$ 의 값이 다르나 공기중

피로에서는  $\delta_0 = 2.35$  이고 부식피로의 경우는 첨가기체에 따라  $\delta = 2.14 \sim 2.18$  로 거의 같은 값을 나타내고 있다. 따라서 공기중疲勞龜裂成長速度에 작용하는 공기의 반응속도와 거의 같은 속도로 第Ⅰ領域에서 발생하는新生活性面의 부식반응이 진행되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 부식피로반응에 충분한 반응물질이 존재하여 응력에 따라 발생하는活性表面은 부식이 이루어지므로 第Ⅰ領域에서는新生活性面의 형성속도가 부식피로를 지배하게 된다. 活性表面의 형성속도는 응력에 비례하고 결국 형성속도는 공기중 피로균열성장속도에 비례하게 된다.

## (2) 第Ⅱ領域

이 영역에서는 환경에 의한 균열성장속도가 第Ⅰ領域보다 가속이 작고  $\Delta K$ 가 커짐에 따라 腐蝕疲勞加速係數  $m$ 은 Table 6과 같이 점점 작아져서 환경의 영향이 무시되게 된다.

第Ⅱ領域에서는 균열성장속도에 대한 결보기활성화에너지가 3,700 cal/mol로서 第Ⅰ領域의 2,000 cal/mol에 비해 크므로 균열성장속도가 낮은것을 추정할 수 있다. 활성화에너지가 커진다는 것은 반응물질의 반응속도가 第Ⅰ領域보다 늦어지는 것을 의미하고 活性表面의 형성속도가 반응속도보다 커져서 응력과 부식의 협동작용이 불완전하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 따라서  $\Delta K$ 가 더욱 커지면 환경에 의한 영향은 점차로 작아져서 역학적 인자에 의해서 균열성장속도가 지배됨을 알게 된다.

## (3) 第Ⅲ領域

$\Delta K$ 가 커져 第Ⅲ領域으로 들어가면 환경에 의한 균열성장속도의 가속은 거의 무시할 수 있는 정도가 되고 이 영역에서는 공기중 피로의 균열성장속도와 같은 거동을 나타낸다. 파괴면을 관찰하면 공기중 피로와 같은 모양의 striation이 관찰되므로 第Ⅲ領域의 부식피로 거동은 공기중 피로와 같은 기구에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다.

## 4. 結 論

80 kgf/mm<sup>2</sup>級 高張力鋼을 3.5% 식염수용액속에서 시험온도를 25°C, 55°C 및 85°C로 부식피로시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부식피로의 균열성장속도는 응력확대계수쪽  $\Delta K$ 가 작은 쪽으로부터 第Ⅰ領域, 第Ⅱ領域 및 第Ⅲ領域으로 구분된다.
2. 第Ⅰ 및 第Ⅱ領域에서 부식피로 균열성장속도는 본 실험범위내에서는 Arrhenius형 온도의존성을 나타내고 균열성장속도에 대한 결보기 活性化에너지는 第Ⅰ領域에서 2,000 cal/mol, 第Ⅱ領域에서 3,700 cal /

mol 였다.

3. 85°C의 부식피로 파괴면상의 부식생성물에는 6面體結晶인 hematite(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)와 8面體結晶인 magnetite(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)가 관찰되어 균열첨단영역에서 금속의 陽極溶解가 일어나고 있음을 추측할 수 있다.
4. 부식피로 균열가속계수  $m$ 은 환경의 영향을 정량적으로 평가하는 하나의 척도로 fail-safe 설계에서 설계응력선정의 기준으로 실용적인면에서 중요한 인자이다. 본 실험의 환경-재료계에서 균열가속계수  $m$ 가 10을 넘지 않음을 알 수 있다.

## 後 記

本 研究는 1983年度 後半期 韓國科學財團 研究費에 의해 이루어졌으며 이에 감사를 드린다.

## 參 考 文 獻

- (1) H. O. Fuchs and R. I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons (1980)
- (2) S. W. Deans and H. R. Copson, Corrosion, Vol. 21(1965), 95.
- (3) S. T. Rolfs and J. M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice-Hall (1977)
- (4) 劉憲一外 2, 自動車工學會誌, Vol. 5, No. 1, (1983), 38 - 44.
- (5) J. E. Srawley, International Journal of Fracture 12(1976), 475.
- (6) 橫堀武夫外 3, 日本機械學會論文集, No. 760-2, 165 - 168.
- (7) 下平三郎, 鐵鋼腐蝕科學, 朝倉書店 (1972) 254.
- (8) 村上裕則, 大南正英, 破壞力學入門, オーム社 (1979) 121.
- (9) J. T. Ryder and J. P. Gallagher Jr., Univ. of Illinois, T. and AM Report, No. 355

(1972)

(10) B. Tomkins, Inter. Conf. on Corrosion  
Fatigue NACE (1971) 303 - 311.

(11) T. Kondo and T. Kikuyama, Inter. Conf.  
on Corrosion Fatigue NACE (1971)  
539 - 556.