

<論 文>

## 2相系 스테인리스鋼 熔接部の 疲勞크랙傳播 特性(Ⅲ)

李澤淳\* · 權鍾完\*\*

(1989년 4월 25일 접수)

### Fatigue Crack Propagation Characteristics of Duplex-Stainless Steel Weldment(Ⅲ)

Taik-Soon Lee and Jong-Wan Kwon

**Key Words :** Duplex Stainless Steel(2相 스테인리스鋼), Stress Ratio(응력비), Residual Stress(잔류응력), Effective Stress Intensity Factor(유효응력확대계수), Striation(스트라이에이션)

#### Abstract

Corrosion fatigue crack propagation behavior of duplex stainless steel weldments in substitute ocean water was investigated to evaluate effects of micro-structural change and residual stresses. Fatigue crack propagation rate was found influenced markedly  $\alpha/\gamma$  phase ratio but little by residual stresses. Fatigue crack propagation rate is higher in the corrosive environment than in room atmosphere. The crack propagation rate estimated by the measurement of striation spacing was higher than that, obtained by crack length measurement in low  $\Delta K$  region. At high  $\Delta K$  region, however, both crack propagation rates were found to be identical.

#### 1. 序 論

二相系 스테인리스鋼은 내식성, 耐熱성이 기준과 스테인리스鋼에 비해 우수하다. 二相<sup>(1,2)</sup> 스테인리스鋼은 微細混相組織으로서 熔接部에서  $\alpha/\gamma$ 相比의 變化 및 介在物의 析出, 熔接熱影響部에서 組織의 粗大化가 일어나 母材와는 전혀 다른 組織을 보인다. 母材와 熔接部에 對한 組織變化和 관련하여 機械的 特性<sup>(3~5)</sup>, 應력부식龜裂特性<sup>(6~10)</sup>에 관한 一連의 研究가 多數있다. 著者들은 前報<sup>(11,12)</sup>에서 反復荷重下에서 疲勞에 關하여 組織의 變化和 熔接殘留應力에 주목하여 第Ⅱ段階領域(Paris Region)과

下限界值( $\Delta K_{th}$ ) 근방에서  $\alpha/\gamma$ 의 相比率 및 殘留應力의 分布에 따라 크랙傳播速度가 달라짐을 밝힌 바 있다.

本 研究에서는 2相系 스테인리스鋼의 모재 및 용접부에 대하여 대기중의 피로試驗과 人工海水中の 부식피로 試驗을 母材部와 熔接部の  $\alpha$ ,  $\gamma$ 相의 相比率 變化에 따른 조직의 變化 및 熔接殘留應力의 影響이 크랙傳播에 미치는 影響을 검토하였다. 應력-스트레인의 히스테리시스곡선에서 균열단합 거동을 實測하고 이들의 결과로 부터 유효응력확대계수와 균열전파속도와 關係를 정리하여 이들의 문제를 해석하였다.

또, 잔류應력의 피로균열특성에 미치는 影響을 검토하기 위하여 용접부의 시험후 잔류應력을 측정하여 이것이 미치는 影響을 定性的으로 究明하였다.

한편, 疲勞破壞 事故解析에 유용한 스트라이에이

\* 正會員, 嶺南大學校 工科大學 精密機械工學科

\*\* 正會員, 慶北產業大學 機械工學科

선(striation)에 注目하여 스트라이에이션 간격측정으로 계산한 균열전파속도와 피로시험중 크랙길이 측정으로 얻은 거시적 피로균열전파 속도의 상관관계를 검토하였다. 특히 저  $\Delta K$  영역에서 스트라이에이션 간격으로 측정된 미시적 피로균열전파 속도가 巨視的인 균열전파 속도에 비하여 큰 원인을 組織的인 측면에서 考察하였다.

2. 試驗片과 試驗方法

2.1 試驗片

本 研究에서 사용된 시험재료는 市販의 2 상계 스테인리스鋼(SUS329J2)으로 그 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1과 같다. 이 때 용접재에 대한 용접은 전자 빔 용접(EBW)을 하였으며 용접조건을 Table 2에 나타내었다. 용접 시험편은 Fig. 1과 같이 용접부의 잔류응력의 영향을 검토하기 위한 (a) 從비이드部 시험편과 용접금속부 균열전파특성을 시험하기 위한 (b) 熔着部 시험편 2종류를 사용하였으며 이하 편의상 (a)를 從비이드部(EBW) 시험편, (b)를 熔着部(weld metal) 시험편이라 칭하기로 한다. 피로시험을 하기 위한 시험편을 중앙부 초기노치 시험편으로 그 형상과 치수는 Fig. 2와 같고 이것이 가공방법과 절차는 前補에서<sup>(11,12)</sup> 詳述한 바와 같다.

Table 1 Chemical composition of material & mechanical properties

Chemical composition(wt. %)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.020	0.47	1.64	0.027	0.001	22.61	6.06	3.00	0.108
Mechanical properties								
Y.S.(MPa)		T.S.(MPa)		E1.(%)				
549		755		28				

Table 2 EBW condition

Welding method	EBW
Voltage/V	$4.5 \times 10^3$
Current/A	0.2
Welding speed/mm/s	11.5

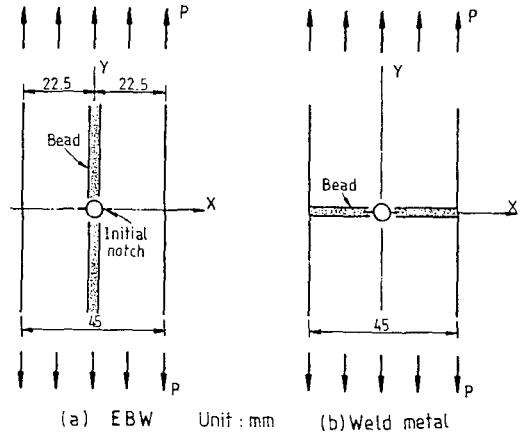


Fig. 1 Location of weld bead and initial notch

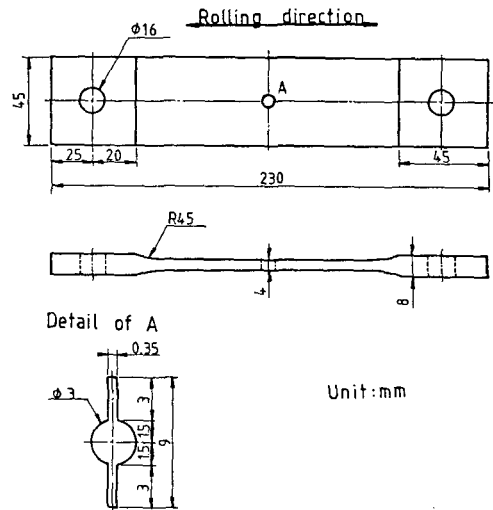


Fig. 2 Configuration of specimens for fatigue crack propagation tests

2.2 實驗方法

(1) 大氣中 實驗

本 실험에 사용된 피로시험기는 전기유압 서어보식으로 용량이 24ton이며 시험은 응력비(R) ; 0.1 하중반복주파수 ; 0.8Hz 로 片振상태에서 시험하였다. 초기  $\Delta K$ 는  $14\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 하였다. 본 실험에서 균열성장길이는 25배율의 이동식 광학 현미경을 시험편 측면에 부착하여 측정하였다.

龜裂 열림 단함을 상세히 평가하기 위하여 각 시험편에 대하여 시험편 측면에 스트레인 게이지를 부착하여 그 출력을 소형 디지털 측정기(U-CAM-5A, 日本 共和製)에 의하여 검출하였다.

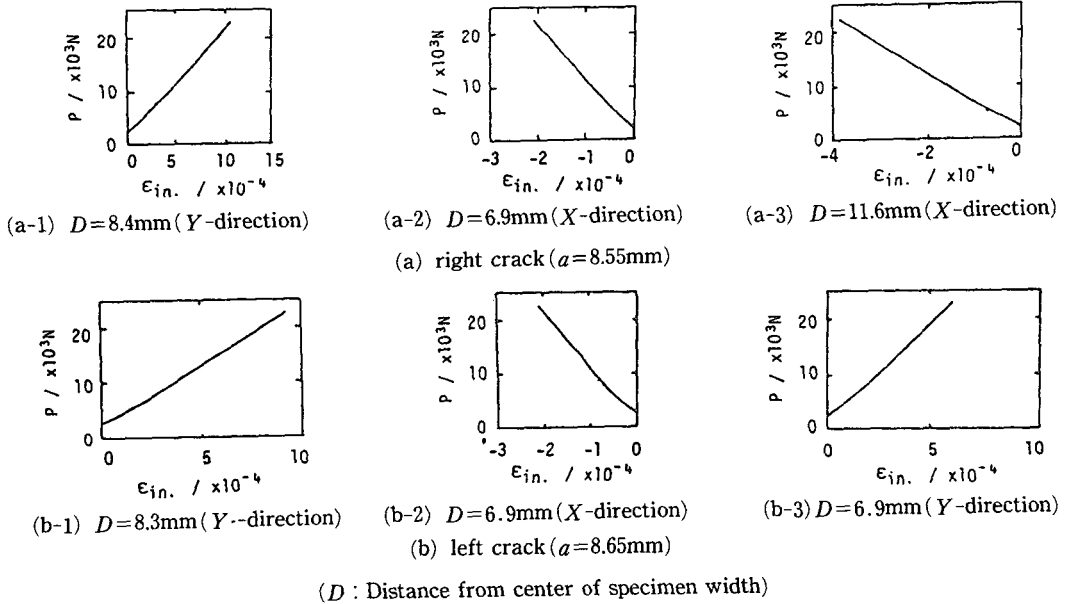


Fig. 3 Hysteresis curves of load,  $P$  and strain (Initialized),  $\epsilon_{in}$ . (EBW,  $I_{in}$  air)

이때 하중 0상태일때 스트레인을 0로 설정하고 相對 스트레인을 출력 하였다. 이 때, 얻어진 하중-스트레인 선도(hysteresis curve)에서 除荷時 高荷重에서의 선형역으로 부터 저하중의 비선형역의 遷移點<sup>(13)</sup>이 생긴다. 이 점을 균열의 완전한 열림으로 하고 균열열림시 응력확대 계수( $K_{op}$ )를 구하였다. Fig. 3은 균열 열림비,  $U$ 를 구하기 위한 하중-스트레인 선도의 한 예이다.

이 결과를 이용하여 열림 비  $U$ , 有效應力擴大係數 범위( $\Delta K_{eff}$ )를 다음 식에 의하여 구하였다.

$$U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min}) \quad (1)$$

$$\Delta K_{eff} = U \Delta K \quad (2)$$

이때  $K$ 의 산정식은 C.F. Fedderson & H. Tada의 아래의 식을 사용하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/w) \quad (3)$$

$$\text{단, } \sigma = P/W$$

$$F(a/w) = \{1 - 0.025(a/w)^2 + 0.06(a/w)^4\} \sqrt{Sec} \{ \pi(a/w)/2 \}$$

피로균열전파에 미치는 용접잔류응력의 영향을 알기 위하여 시험편 측면에 2축 스트레인 게이지를 부착하여 시험종료 후 saw cut 법에 의하여 에너지를 해방시켜 그 값을 구하였다.

이 때 잔류응력의 산정식<sup>(15)</sup>은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) / (1 - \nu^2) \\ \sigma_y &= E_y + \nu\epsilon_x / (1 - \nu^2) \end{aligned} \quad (4)$$

중탄성계수  $E = 1.975 \times 10^5 \text{MPa}$ ,

프와송비  $\nu = 0.3$

(2) 腐蝕疲勞實驗

腐蝕疲勞實驗의 荷重反復周波數, 應力比( $R$ ) 및 초기  $\Delta K$ 는 대기중의 실험조건과 동일하다. 균열 성장길이 측정방법, 균열열림 거동을 측정하기 위한 방법도 동일하다. 부식 실험시 모든 스트레인 게이지는 실리콘 고무로 코팅을 하여 인공해수중의 손상을 방지하였다. 부식환경은 ASTM D-1141<sup>(16)</sup>에서 정한 조성의 인공해수를 사용하였다. 이 때,

Table 3 Chemical composition of substitute ocean water (ASTM, D1141-75)

Compound	Concentration, g/liter
NaCl	24.53
MgCl <sub>2</sub>	5.20
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.09
CaCl <sub>2</sub>	1.16
KCl	0.695
NaHCO <sub>3</sub>	0.201
KBr	0.101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.027
SrCl <sub>2</sub>	0.025
NaF	0.003

pH 값은 8.2이었으며 그것의 화학조성은 Table 3과 같다. 이때 인공해수의 pH값을 일정하게 유지하기 위하여 시험중 인공해수를 강제 순환하였다.

(3) 破面觀察

實驗後 疲勞破面을 走査電子 顯微鏡에 의하여 스트라이에이션에 重點을 두어 그 특징을 관찰하였다.

3. 實驗結果 및 考察

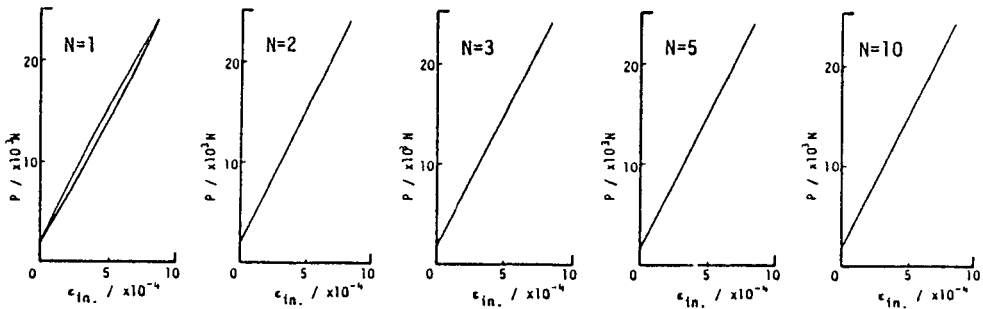
3.1 熔接이음부에 있어서 腐蝕疲勞龜裂傳播特性和 熔接殘留應力의 效果

Fig. 4의(a)는 從비이트部(EBW) 시편에, 피로하중을 부하한 경우의 최초 1사이클에서 10사이클 사이의 히스테리시스(hysteresis) 및 최대 스트레인을 나타낸 것이다. 이때, 스트레인 게이지의 부착 위치는 Fig. 5와 같다.

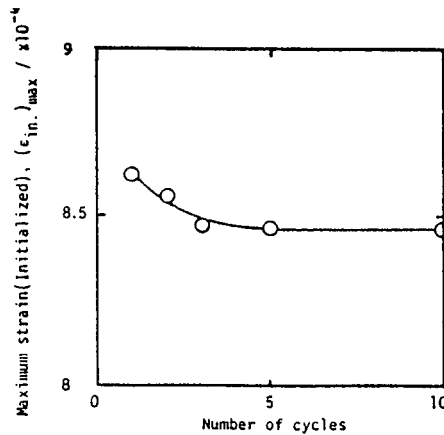
그림에서 보인 바와 같이 제1 사이클에서 소성변형을 일으키고 이후는 탄성변형의 반복임을 알수

있다. 피로시험중 하중반복응력의 최대치가 127 MPa이고 본 실험대상의 2相系 스테인리스鋼(SUS320J2)의 항복응력이 549MPa에 비교하여 이 값은 비교적 작은 값이다. 따라서 시험 중 반복하중에 의하여 잔류응력의 再分布는 전혀 없을 것으로 판단된다. 시험 종료후 구한 최종 잔류응력의 분포가 균열진전중 잔류응력과 시중 같다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 중비이드부(EBW)시편의 시험후 잔류응력의 분포를 측정한 결과이다. Fig. 7은 모재 및 중비이드부(EBW) 시편의 균열전파속도( $da/dN$ )과 응력 확대계수 범위( $\Delta K$ )의 관계를 나타낸 것이다. 공기중의 피로시험 결과에 대하여 모재, 중비이드부(EBW) 시편을 비교하면  $\Delta K$ 가 낮은 범위에서는 모재보다 중비이드(EBW)시편이 균열전파속도가 빠르다. 이것은 Fig. 6에 나타난 용접잔류응력 분포와 관련 시켜 보면 중앙의 인장잔류응력의 의한 加速化의 영향이라 판단된다. 또, 균열



(a) Variation of hysteresis curves in initial cyclic stage



(b) Transition of maximum strain(Initialized) in initial cyclic stage

Fig. 4 Variation of initial cyclic stage in residual stress field(EBW, in air)

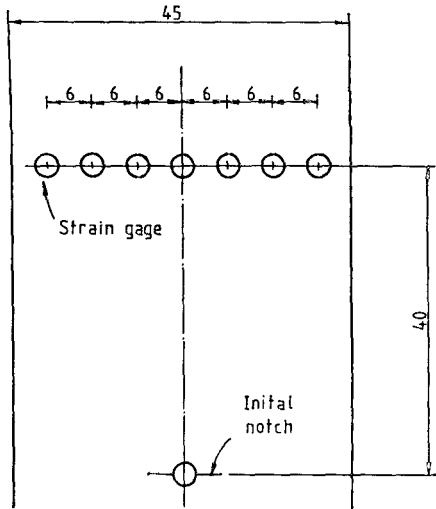


Fig. 5 Location of gage set point for measurement of weld residual stress field

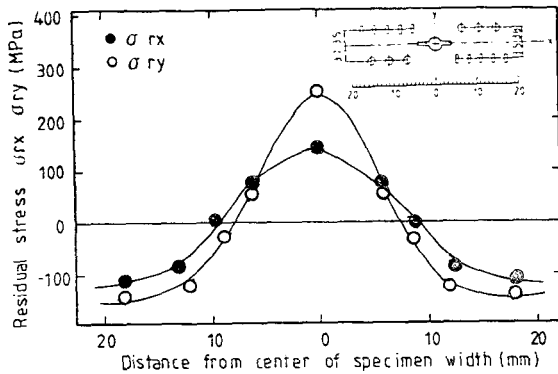


Fig. 6 Residual stress field induced by electron beam welding (in air)

이 진전함에 따라 모재부에 漸近하고 있다. 이것은 피로균열이 진전함에 따라 잔류응력장의 영향이 없어지기 때문인 것으로 판단된다.

한편 人工海水中の 결과를 비교하여 보면 대기중의 경우와 동일한 경향을 보인다. 그러나 균열전파 속도의 절대치는 人工海水中の 것이 공기중의 결과보다 전반적으로 빠르게 나타나고 있다. Fig. 8은 실험중 표면에 부착한 스트레인 게이지로부터 히스테리시스를 구하여 그 결과로 열림비  $U$ 를 산정하고 균열성장길이  $a$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 모재의 결과는 대기중, 인공해수중 다같이 균열의 진전에 따라 열림비  $U$ 값이 증가한다. 이 결과는 균열진전 속도가 본 실험의 경우 비교적 빠른 조건

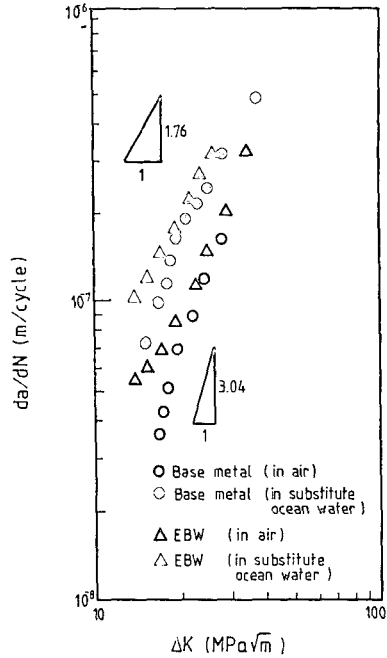


Fig. 7 Crack propagation rate stress intensity range in base metal & EBW in air, in ocean water

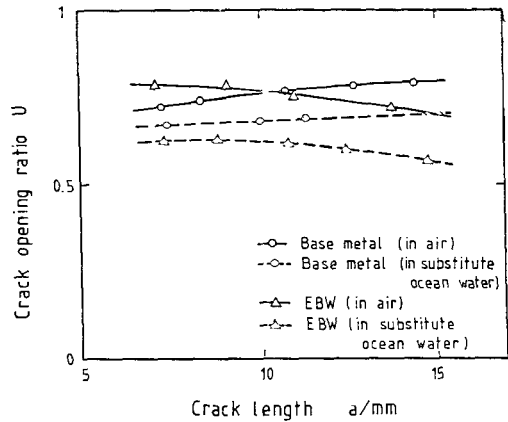


Fig. 8 Relation between crack opening ratio,  $U$  and crack length,  $a$

으로 1사이클당 균열 진전량이 소성역의 크기보다 큰 원인으로 분석된다.

한편 從비이드部(EBW)시편은 균열발생 초기에 열림비  $U$ 값이 크게 나타났으나 균열진전에 따라 열림비가 낮아진다.

이 결과는 균열진전 초기에 인장잔류응력의 영향으로 균열열림이 촉진되고 반대로 균열이 성장함에 따라 압축잔류응력의 영향으로 균열열림이 저지되

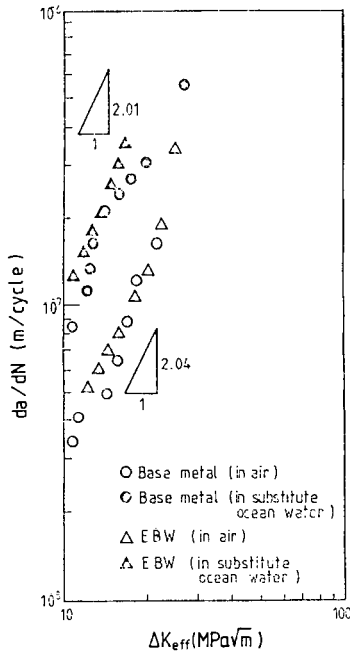


Fig. 9 Crack propagation rate vs. effective stress intensity range in base metal & EBW in air, in ocean water

어 열림비( $U$ )가 저하한다.

소성변형에 의한 殘留應力의 再分布가 있을 경우 균열면상의 잔류소성스트레인의 변화<sup>(16)</sup>를 고려하지 않으면 안되나 본 실험의 경우 전술한 바와 같이 잔류응력의 재분포는 전혀 생기지 않는 것으로 판단된다. 한편, 人工海水中の 균열 열림비,  $U$ 는 대기중에 비해 낮은 결과가 나타났으며, 이것은 부식환경중에서는 균열단힘이 더 잘 일어난다는 것을 의미한다. 그 원인으로서는 부식생성물의 존재등이 예상되나 그 상세에 대해서는 더욱 연구가 필요하다고 생각된다.

Fig. 9는 앞서 구한  $da/dN-\Delta K$ 의 관계 및 열림비( $U$ )의 측정결과로부터 유효응력확대계수범위( $\Delta K_{eff}$ )를 산정하고 피로균열진전속도( $da/dN$ )과 유효응력 확대계수범위( $\Delta K_{eff}$ )의 관계를 나타낸 것이다.

앞의 Fig. 7과 Fig. 9의 결과를 비교하면 大氣中の 母材, 從비이드部(EBW) 시편의 결과는  $\Delta K_{eff}$ 로 잘 정리되며 저  $\Delta K$ 영역에서 거의 일직선으로 나타낼 수가 있다.  $\Delta K_{eff}$ 로 잘 정리되며 저  $\Delta K$ 영역에서 거의 일직선으로 나타낼 수가 있다. 그러나, 人工海水中の 경우는 兩者의 결과가  $\Delta K_{eff}$ 에

관해 일치하지 않으며 이 결과는 균열 열림비( $U$ )만으로는 정확한 평가를 할수 없음을 나타내 준다. 유효응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 는 균열선단에 塑性誘起단힘<sup>(17)</sup> 및 파면거칠기에 의한 단힘<sup>(18)</sup>으로 인한 열림비( $U$ )를 고려한 것인바 부식피로에 대하여  $\Delta K_{eff}$ 를 적용할 경우 다음과 같은 두가지 문제점이 있다.

(1) 有效應力 사이클 이외에 化學的인 부식에 의하여 균열진전속도가 가속화 하는 경우의 잔류응력의 영향.

(2) 부식환경 및 부식생성물에 의한 균열단힘 현상이 거시적인 측정에서는 검출되지 않을 가능성.

위와 같은 복합적인 원인에 의하여 부식중의 균열진전속도가  $\Delta K_{eff}$ 에 의해 잘 정리 되지 않는 것으로 판단된다.

위의 因子中 특히 (2)의 부식생성물은 시간적인 인자이므로 간단히 결정할 수 없는 不確定 因子이다.

### 3.2 熔接部에 있어서 組織變化에 따른 腐蝕 疲勞龜裂傳播 特性

Fig. 10은 熔接金屬部에 있어서 최종잔류응력의 분포를 나타낸다. 前述의 從비이드部(EBW) 시편의 분포와 마찬가지로 잔류응력의 피크치는 SUS329J2의 항복응력(549MPa)과 비교하여 충분히 작은 것으로 나타났고 피로시험중 잔류응력의 再分布는 없는 것으로 판단된다.

Fig. 11 및 Fig. 12는 각각  $\Delta K-da/dN$  관계 및  $\Delta K_{eff}-da/dN$  관계를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 시험중 표면에 부착한 스트레인 게이지로부터 히스테리시스를 구하고 그 결과로부터

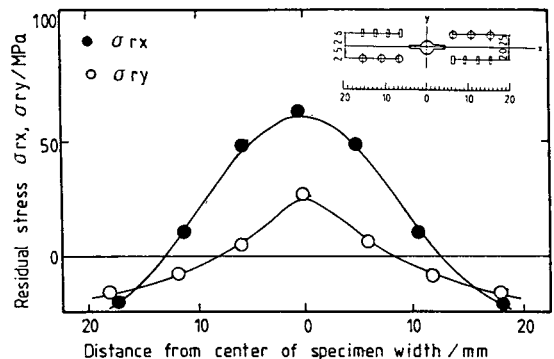


Fig. 10 Residual stress field by weld(Weld metal in air)

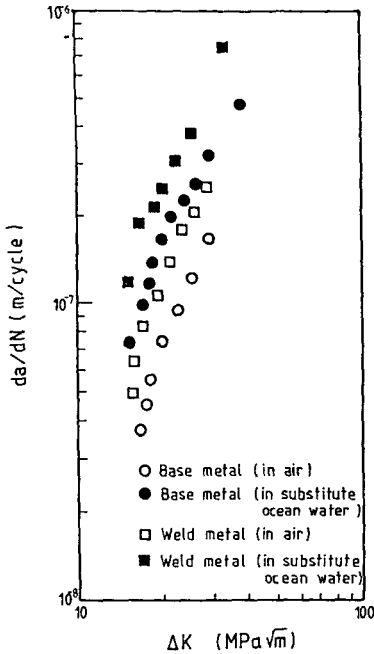


Fig. 11 Crack propagation rate vs. stress intensity range in base metal & weld metal in air, in substitute ocean water

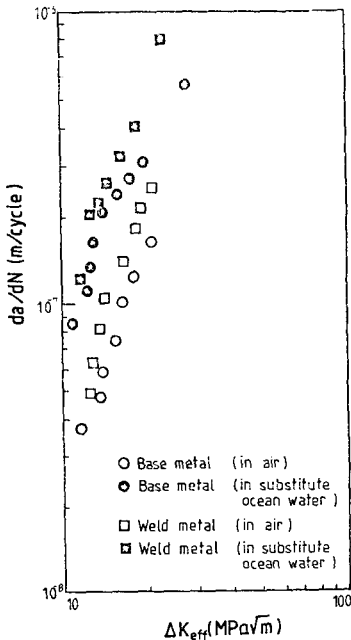


Fig. 12 Crack propagation rate vs. effective stress intensity range in base metal & weld metal in air, in substitute ocean water

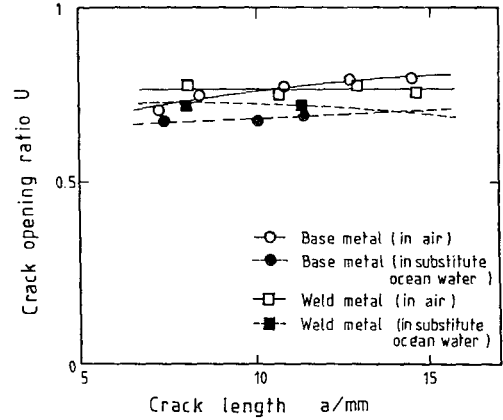


Fig. 13 Relation between crack opening ratio,  $U$  and crack length,  $a$

열림비( $U$ )와 균열성장길이  $a$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서도 前節과 마찬가지로 인장잔류응력의 효과가 나타났으며 반면에 압축잔류응력의 효과는 볼 수 없었다.

한편 Fig. 11 및 Fig. 12에서 피로균열전파속도의 경향은 용접부가 모재부에 비하여 대기중, 인공해수중 모두 빠르게 나타났다. 이와같은 균열전파속도의 차이는 조직적인 차이와 파면의 기하학적인 차이에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 따라서 다음 節에서 모재부 및 용접부의 組織的인 차이에 注目하여 微視的인 견지에 피로 및 부식피로 특성을 비교하여 상세히 검토하기로 한다.

용접부의 피로균열전파속도 특성은 前節의 동일한 모재부의 경우와는 다르게 잔류응력의 영향, 환경의 영향, 조직적인 차이 등 諸因子가 복합되어 있어 균열 열림비( $U$ )를 고려한  $\Delta K_{eff}$ 에 대하여 간단 명료하게 잘 정리되지 않았다.

### 3.3 破面觀察

#### (1) 母材部

Fig. 14는 母材部の 大氣中 피로파면사진(5.0 K)과 그것의 EDX 해석결과이다. 파면사진에서 나타난 결과와 같이 스트라이에이션은 주로  $\alpha$ 상에서 형성되었고  $\gamma$ 상에서는 보이지 않는다. EDX의 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이  $Cr/Fe$ 의 값이 큰부분(A부)가  $\alpha$ 상이고 작은부분(B부)가  $\alpha^{(19)}$ 상이다. 그러나,  $\Delta K$ 가 어느정도 커지면 조직에 관계없이 전체파면에 스트라이에이션이 형성되었다.

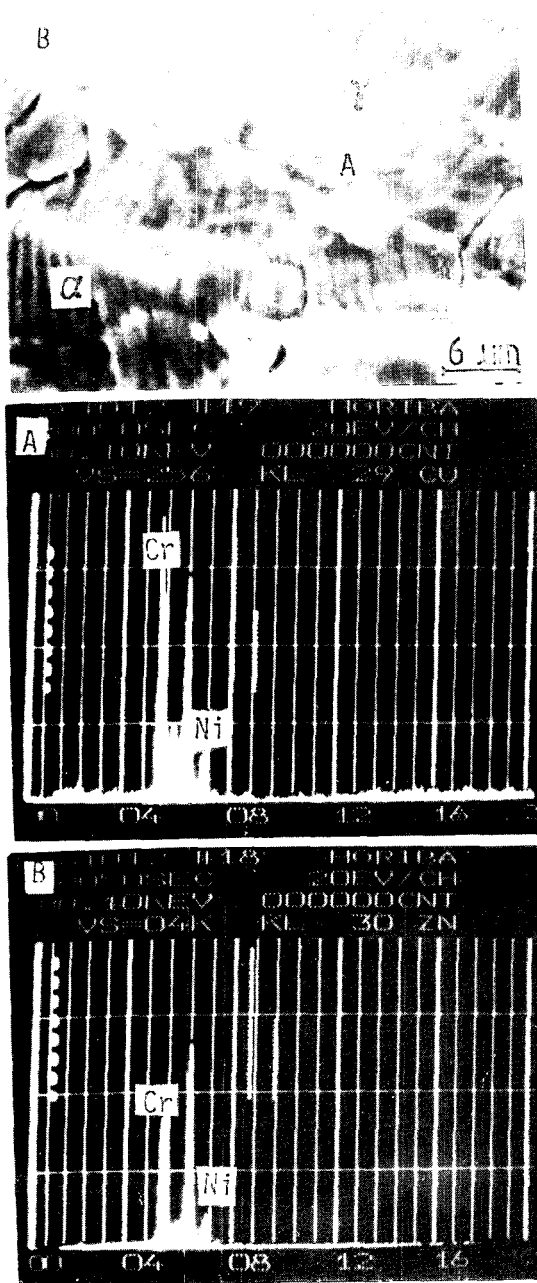
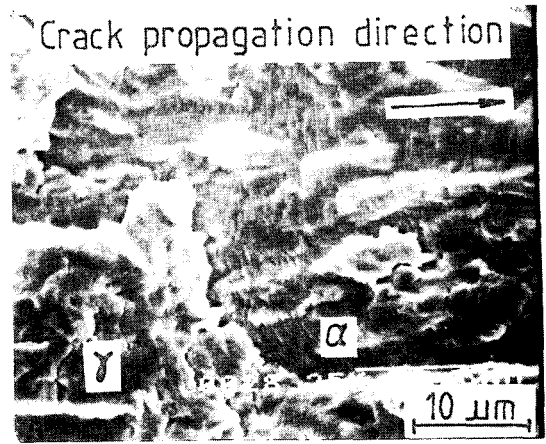
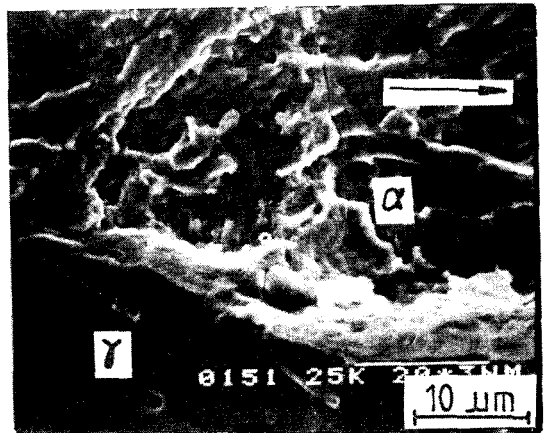


Fig. 14 Appearance of fatigue fracture surface and EDX analysis  
(Base metal in air,  $a=10.85\text{mm}$ ,  $\Delta K=37.14 \text{ MPa}\sqrt{m}$ )

Fig. 15는 같은  $\Delta K$ 의 위치에서 모재부에 대한 대기중과 인공해수중의 피로시험후의 파면을 비교한 것이다. 대기중의 것은 스트라이에이션이 명확하게 나타났고 주로  $\alpha$ 상에 분포하고 있으며 반면에 인공해수중의 것은 스트라이에이션이 부식생성



(a) air



(b) substitute ocean water

Fig. 15 SEM of fatigue surfaces  
( $a=9\text{mm}$   $\Delta K : 30\text{MPa}\sqrt{m}$ )

물로 인하여 불분명하고 파면의 요철이 대기중의 것에 비해서 심한 것이 특징이다.

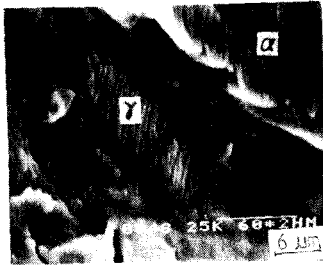
(2) 熔接部

Fig. 16은 용접부의 피로파면사진(5.0 K)이다. 용접부 역시 스트라이에이션은 저  $\Delta K$ 영역에서 주로  $\alpha$ 상에 형성되었다. 그러나 고  $\Delta K$ 영역에서는 역시 전파면에 걸쳐서 스트라이에이션이 형성되었다.

前報에서 설명한 바와 같이 용접부는 용접입열에 의하여 모재부와는 다르게  $\alpha$ 상이 크게 증가함으로 따라서 스트라이에이션이 발생하기 쉬운 면적이 상대적으로 확대된다. 이와같이  $\alpha$ 상이 크게 증가하는 것이 용접부가 모재부에 비해 피로균열전파속도가 빠른 하나의 요인이다.

Fig. 16은 스트라이에이션의 발생이 용이한  $\alpha$ 상





Appearance of fatigue fracture surface (Weld metal, in air,  $a=10.25\text{mm}$ ,  $\Delta K=33.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

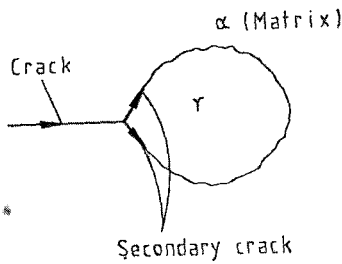


Fig. 16 Illustration of fatigue crack growth

과 스트라이에이션 발생이 어려운  $\gamma$ 상을 포함한 疲勞龜裂傳播 機構의 模式圖이다.

피로균열전파중 스트라이에이션이 발생한  $\alpha$ 상에서는 균열전파속도가 빠르고 반면  $\gamma$ 상에서는 그 속도가 느리다. 미시적인 견지에서  $\alpha$ 상과  $\gamma$ 상의 경계에서는 균열이 일시 정지되고 2차 균열이 발생한다.

(3) 巨視的인 龜裂傳播速度와 微視的인 龜裂傳播速度

피로파면의 스트라이에이션의 간격을 피로파면으로부터 직접 측정한 미시적인 균열전파속도와 실험으로부터 구한 거시적인 균열전파속도와 상호관계를 고찰하였다. Fig. 17은 스트라이에이션 간격과 거시적인 균열 전파 속도와의 관계이다. 그림에서 나타난 결과와 같이 피로균열전파속도;  $10^{-7}\text{m/cycle}$ 를 기점으로 저  $\Delta K$ 영역에서는 스트라이에이션 간격이 거시적인 균열전파 속도보다 크게 나타났다.

한편, 고  $\Delta K$ 영역에서는 스트라이에이션 간격과 巨視的인 균열전파속도와 1:1로 잘 대응한다. 이와 같은 결과는 前述한 바와 같이 저 $\Delta K$ 영역에서

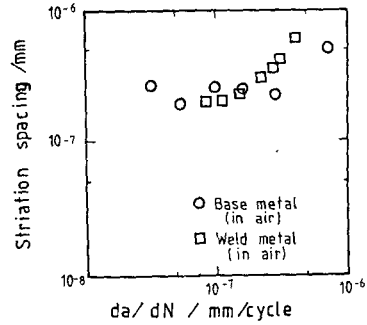


Fig. 17 Comparison of  $da/dN$  and striation spacing

는 스트라이에이션이  $\alpha$ 상과  $\gamma$ 상에 선택적으로 발생하고  $\alpha$ 상과  $\gamma$ 상의 경계에서 龜裂阻止 效果에 그 원인이 있다. 즉, 저  $\Delta K$ 영역에서는 미시적인 균열전파속도가 거시적인 균열전파속도보다 빠른 원인으로 판단된다. 또, 전면적인 스트라이에이션이 발생한 고  $\Delta K$ 영역에서는 微視的인 균열전파속도와 巨視的인 균열전파속도가 잘 일치하여 組織的인 영향을 그다지 받지 않는다.

#### 4. 結 論

모재 및 용접부에 대하여 組織의 變化, 熔接殘留 應力의 效果에 注目하여 大氣中, 人工海水中 腐蝕 疲勞實驗을 통하여 균열전파 특성에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모재부 및 용접부 다 같이 대기중의 균열전파 속도에 비하여 人工海水中 부식피로균열 전파속도가 빠르게 나타났다. 이는 균열전파중 파면에 化學的인 腐蝕作用으로 균열 성장이 촉진 되었기 때문이다.

(2) 용접잔류응력의 영향으로 인장잔류응력인 경우 균열전파속도가 가속화 현상을 보였으며 압축잔류응력이 작용하는 경우 그 반대의 현상이 나타났다. 한편, 피로시험중 잔류응력의 再分布의 영향은 없는 것으로 판단된다.

(3) 龜裂열립比의 측정 결과를 이용하여 有效應力擴大 係數범위( $\Delta K_{eff}$ )의 정리로 대기중 피로특성과 인공해수중 피로특성 상호관계를 잘 정리 할 수 있다.

(4) 2상 스테인리스강중  $\alpha/\gamma$ 相比率에 의한 균열 전파속도와 상관관계가 있음을 알았으며  $\gamma$ 상은 균

열진전에 대하여 沮止效果가 있으므로  $\alpha$ 상비율이 큰 용접부가 균열전파속도의 빠른 원인의 하나이다.

(5) 破面으로부터 측정된 스트라이에이션(striation) 간격과 거시적인 균열전파속도의 相關關係는 저 $\Delta K$ 영역에서 스트라이에이션 간격이 컸으며 고 $\Delta K$ 영역에서는 상호 잘 일치하였다.

## 後 記

本 研究는 88년 大學教授 國費海外派遣 研究計劃에 의하여 이루어졌으며, 研究機會를 준 文教部와 관계 당국에 感謝를 드리며 本 研究遂行에 物心兩面으로 도움을 주신 大阪大學 工學部 向井喜彦 教授와 研究室 여러분께 深深的 謝意를 表합니다.

## 參 考 文 獻

- (1) Tedmon, C.S., Vermilyea, JR. & K.A., 1970, "Some Observation on Carbide Precipitation and Grain Boundary Migration in Duplex Stainless Steel", Met. Trans, Vol. 1, July, pp. 2043~2046.
- (2) Sutala, N., 1979, "The Relationship Between Solidification and Micro Structure in Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steel Welds", Met. Trans., 10A, pp. 512~514.
- (3) 長繩裕, 1985, "2相ステンレス鋼熔接部の機械的特性", 日本鐵鋼協會, 第110回 講概集, 71, 13, S1411.
- (4) 中西睦夫, 1986, "2相ステンレス講熔接部の機械的性質と耐食性", 鐵と鋼, 72, S601.
- (5) 三浦實, 1986, "2相ステンレス鋼の溶着金屬の組織に及ぼす化學成分の影響", 鐵と鋼, 72, S
- (6) 長野博夫, 1980, "2相ステンレス鋼熔接部の耐食性", 鐵と鋼 66, pp. 1150~1159.
- (7) 粟木良郎, 1985, "2相ステンレス鋼TIG熔接部の耐孔食性", 日本鐵鋼協會, 第110回 鋼概集, 71, 13, S1322.
- (8) 橋孤修司, 1985, "2相ステンレス鋼の低炭素化と耐粒界腐食性", 日本鐵鋼協會, 第110回 鋼概集, 71, 13, S1320.
- (9) Osozawa, K., 1978, "Corrosion Resistance of Stainless Steels as a Guide for Material Selection", Boshoku Gijutsu, Vol. 27, No. 5, pp. 256~266.
- (10) 玉置克臣, 1986, "2相ステンレス鋼熔接繼手部の耐食性", 鐵と鋼, 72, S1438.
- (11) 權鍾完, 金相台, 李澤淳 1989, "二相스테인리스鋼熔接部の 疲勞크랙傳播 特性(II)", 大韓機械學會論文集, 第13卷, 第1号, pp. 115~124.
- (12) Kikukawa, M., 1980, "Use of Mini-Computer for Accurate Automatic-Measurement in Fatigue Test", Journal of Material & Science, Japan, Vol. 29, No. 327, pp. 86~92.
- (13) 渡邊正紀, 1965, "熔接力學とその應用", 朝倉書店, pp. 306~331.
- (14) 渡邊正紀, 1965, "熔接力學とその應用", 朝倉書店, pp. 333~365
- (15) 福田, 渡秀, 1981, "疲勞き裂傳播におよぼす熔接殘留應力の影響", 日本機械學會論文集(A), Vol. 47, No. 416, pp. 384~390.
- (16) Elber, E., 1971, "The Siginificance of Fatigue Crack Cloure." ASTM, STP, 486, p. 280.
- (17) Richie, R.O. and Surrresh, S., 1981. "Oxide Induced Crack Clousre; An Explanation for Near-threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behaviro", Met. Trans, pp. 1435~1443.
- (18) 増田勝弘, 1985, "二相ステソレス鋼とその熔接部における應力腐食割れ特性に關する研究", 大阪大學 修士學位 論文.
- (19) 剛寸弘之, 1976, "線形破壊力學入門", 培風館.