

◎ 論 文

SS41鋼의 腐蝕疲勞 균열 傳播特性에 미치는 3.5% NaCl 水溶液의 影響⁺

吳世旭* · 金在喆** · 崔榮秀***

The Effects of 3.5% NaCl Solution on the Corrosion Fatigue Crack Propagation Characteristics of SS41 Steel

Sae-Wook Oh, Jae-Chul Kim and Young-Soo Choi

Key Words: Corrosion Fatigue(腐蝕疲勞), Crack Propagation(균열 傳播), Crack Closure(균열 닫힘), Effective Stress Intensity Factor Range, ΔK_{eff} (有效 應力擴大係數 幅), Base Metal(母材), Weld Metal(熔接部), Loading Frequency(荷重周波數)

Abstract

The corrosion fatigue crack propagation characteristics of SS41 steel in 3.5% NaCl solution have been evaluated for loading frequencies of 1Hz and 0.2Hz. A sine wave loading profile was used for fatigue testing. Each test was carried out at a constant stress ratio, $R(0.1)$.

The main results are summarized as follows ;

1. Fatigue crack propagation rate was higher in 3.5% NaCl solution than in air, higher in the base metal than in the weld metal, and higher at $f=0.2Hz$ than at $f=1Hz$.
2. The crack closure level of the base metal was not influenced by cyclic frequencies, but that of the weld metal was much influenced.
3. When the crack closure effect was eliminated in the evaluation of crack propagation characteristics by using ΔK_{eff} , the environmental influence was distinctly observed. At the base metal, crack propagation rate was enhanced by the hydrogen embrittlement, and the weld metal was reduced by the crack closure.
4. There was clearly observed hydrogen embrittlement and severely corroded aspect at fracture surface of lower frequency than that of higher frequency, and at that of the base metal than that of the weld metal.

1. 序 論

船舶 및 海洋構造物을 구성하는 부재 등은 外力 및 기타 荷重 등과 함께 海水雰圍氣에 의한 腐蝕疲勞作用을 받는다. 海水雰圍氣 및 荷重周波數로 인한 腐

蝕疲勞現象이 海洋構造物材의 損傷 및 破壞에 중요한 因子가 되고 있다.^{1,2,3,4)} 따라서 海水中에서 構造物鋼의 腐蝕疲勞舉動을 명확히 하는 것이 事故를 미연에 防止하는 立場에서 중요한 의미를 갖게 되었다.^{3,5,6)} 특히, 海洋環境下에서 腐蝕疲勞균열은 熔接部에서

⁺ 1986년도 한국해양공학회 추계 학술대회 발표(1986년 12월)

* 정희원, 동아대학교 기계공학과

** 정희원, 동아대학교 기계공학과

*** 정희원, 동아대학교 대학원

의 缺陷 및 熱影響部 등에서 많이 發生하여 中대한 損傷을 일으키는 原因이 되는 경우가 많다.^{7,8,9,10)} 熔接部의 疲勞壽命은 균열의 發生시간 보다 대부분 균열의 傳播에 依存하고 있다.¹¹⁾

本 研究은 船舶 및 構造物에 使用되는 壓延構造用 延性材料인 SS41鋼을 實際使用狀態인 潛弧熔接을 行하고, CT試片으로 製作하여 3.5% NaCl 水溶液에서 腐蝕疲勞 實驗을 하였다. 균열단합現象을 評價하고 compliance 變化에 따라 균열길이를 測定할 수 있는 Kikukawa-Compliance法¹²⁾을 使用하였다. 3.5% NaCl 水溶液에서의 實驗結果로 부터 母材와 熔接部의 腐蝕疲勞 균열傳播舉動과 SEM fractography를 實驗的으로 比較 考察하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

素材는 판두께 14.5mm의 一般構造用壓延鋼(SS41)이며, 試片은 T-L方向으로 採取하여 ASTM E647-83¹³⁾에 따라 製作하였다. 熔接材試片은 熔接部가 균열傳播方向에 놓이도록 하였으며, 熔接前後에 熱處理加工을 하지 않았다.

試片의 形狀과 寸수는 Fig.1과 같으며, Table 1~4에는 化學的 成分, 機械的 性質, 熔接條件과 flux의 成分 등을 각각 나타내었다.

균열의 길이는 腐蝕液을 一時 제거시켜 試片 表面의 腐蝕生成物을 가볍게 닦아낸 후, 望遠顯微鏡(x 25)으로 試片의 兩側面에서 表面上的 균열길이를

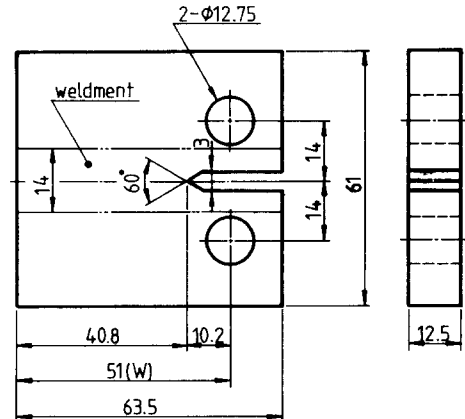


Fig. 1 Configuration and dimension of compact tension specimen (units in mm)

Table 1. Chemical compositions of base metal and welding rod (wt. %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu
Base metal	0.14	0.25	0.55	0.014	0.007	0.10
welding rod (φ4.8 wire)	0.08	0.02	0.50	—	—	—

Table 2 Mechanical properties of base metal and weld metal

Properties	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Hardness Hv (200g)
Base metal	420.8	35	269.206	189.63	145
weld metal	444.8	30	298.116	122.06	—

Table 3 Welding condition

Section type	Welding rod condition	Voltage (V)	Current (A)	Speed (mm/min)	Layers	Pass temperature (°C)	Plate thickness (mm)
	300°C 1hr dry	1st:36 2nd:37	600 650	45 40	2 pass	100	14.5

Table 4 Composition of flux

Composition	Al ₂ O ₃ + MnO	CaF ₂	CaO + MgO	SiO ₂ + TiO ₂
Wt. (%)	40	20	30	5

測定하였다.

Fig.2는 균열길이 및 균열닫힘을 測定하기 위한 시스템의 概略圖이다. 연속적인 균열길이 變化의 測定은 試片의 背面에 스트레인 게이지를 附着하여 Fig.2의 回路를 거쳐 나온 出力을 利用하였다. 이 calibration curve는 表面에서 測定한 균열길이를 補正하였다.

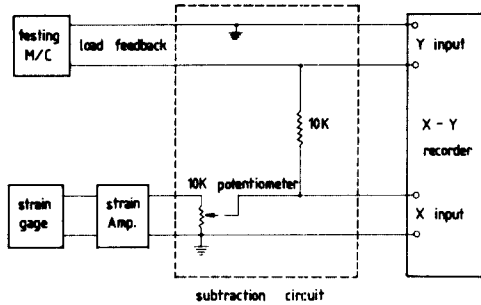


Fig.2 Block diagram for monitoring crack closure

試片의 豫균열은 大氣中에서 균열길이 2mm 先端으로부터 약 8mm가 되도록 하였으며, 3.5% NaCl 水溶液에서의 腐蝕疲勞試驗은 最大荷重 7.8kN, 應力比 0.1, 正弦波, 周波數 1Hz 및 0.2 Hz로 하였다. 水溶液의 溫度는 室溫으로 하였고, pH는 6~7의 範圍로 하였다. 腐蝕液의 流量은 200cc/min가 되도록 하였으며, 化學的 性質이 일정하게 유지되도록 週期的으로 전체 水溶液을 교환하였다.

균열 傳播速度는 ASTM E647-83의 appendix에 있는 seven point incremental polynomial method를 利用하였다. 균열닫힘은 荷重과 脂面스트레인 出力을 Fig.2의 減算回路를 거쳐서 하여 얻은 Fig.3의 (b), (c)로부터 구하였다. 여기서 C점이 균열열림점이다.

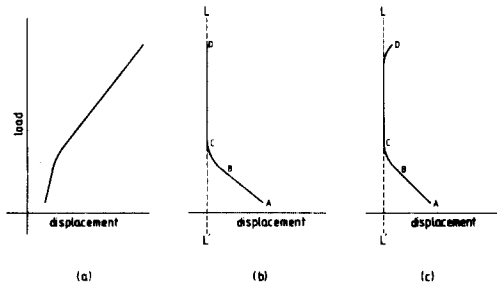


Fig.3 Load-displacement curves

(a)는 Fig.2의 減算回路를 거치지 않았을 때의 形態이고, (b)와 (c)는 回路의 potentiometer를 調節하여 CD부분이 L-L'축에 平行하게 한 形態이다.

應力擴大係數幅(ΔK)는 위 標準試驗法에 明示되어 있는 式을 使用하였고, 有效應力擴大係數幅比(effective stress intensity factor range ratio) U 는 다음과 같이 정의된다.

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}}$$

여기서, ΔK_{eff} : 有效應力擴大係數幅

K_{op} : 균열열림점에서의 應力擴大係數

3. 實驗結果 및 考察

3.1 腐蝕疲勞 균열 傳播速度

構造用鋼은 대부분 海水霧圍氣에서의 균열 傳播速度가 大氣中에서의 경우보다 빠름을 나타내고 있다. (3, 8, 14, 15, 16, 17)

Fig.4는 母材의 da/dN 과 ΔK 의 關係를 나타낸 것이다. 荷重周波數 0.2Hz의 경우, 腐蝕疲勞 균열 傳播速度가 大氣中의 경우보다 $\Delta K = 20 MPa \cdot m^{1/2}$ 에서 2.5배, $\Delta K = 30 MPa \cdot m^{1/2}$ 에서 3.2배 정도로 빠름을 나타내고 있다. 1Hz의 경우는 $\Delta K = 20 MPa \cdot m^{1/2}$ 에서 1.2배, $\Delta K = 30 MPa \cdot m^{1/2}$ 에서 1.5배 정도 빠르다. 腐蝕生成物에 의한 균열닫힘의 影響이 大氣中과 比較하여 거의 差異가 없었기 때문에 (Fig.8참고), 위의

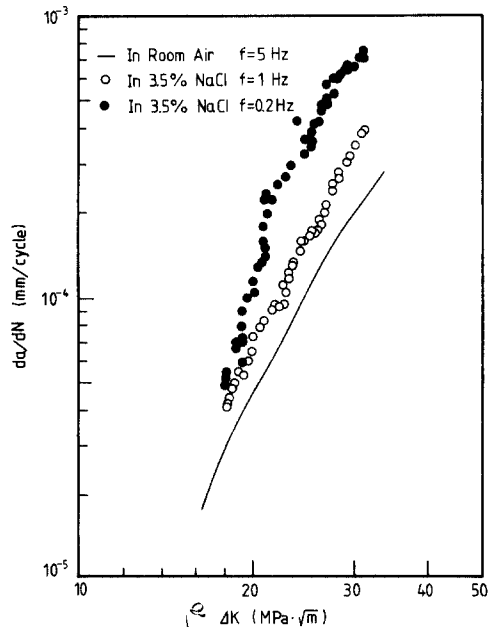


Fig.4 Fatigue crack propagation in terms of ΔK (base metal, 3.5% NaCl solution)

差異는 水素脆性^{3,8,15,18,19,20}과 應力腐蝕^{16,21,22}에 의한 效果가 주로 作用했기 때문에 생각된다.

Fig.5에는 熔接部의 da/dN 과 ΔK 의 關係를 나타내었다. 0.2Hz의 경우, $\Delta K=20MPa\cdot m^{1/2}$ 에서 1.7배, $\Delta K=30MPa\cdot m^{1/2}$ 에서는 3.0배 정도로 腐蝕疲勞 균열 傳播速度가 大氣中의 경우보다 빠름을 나타내지만, 1Hz의 경우는 ΔK 가 $28MPa\cdot m^{1/2}$ 보다 작은 範圍에서는 大氣中에서 보다 오히려 느린 경향을 보여, 腐蝕 生成物에 의한 많은 균열단힘이 균열 傳播速度의 감소를 초래하고 이것이 水素脆性에 의한 가속보다 크게 作用한 것을 나타내고 있다.^{17,23,24}

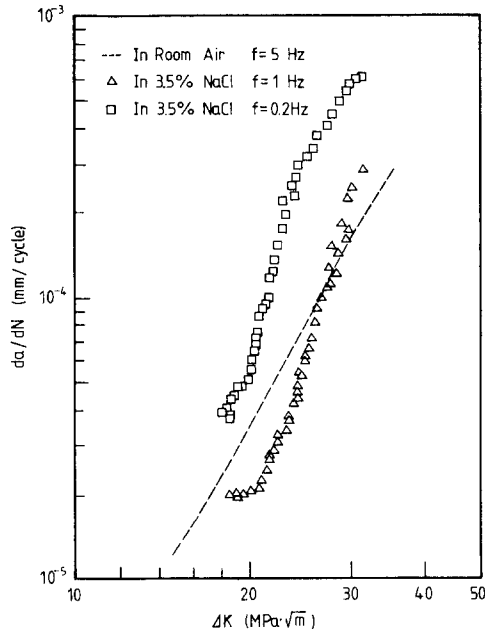


Fig.5 Fatigue crack propagation in terms of ΔK (weld metal, 3.5% NaCl solution)

Fig.4와 Fig.5에서 볼 때, 1Hz보다는 0.2Hz의 경우가 더 큰 腐蝕疲勞 균열 傳播速度를 보여 腐蝕環境의 效果가 크게 作用하고 있음을 알 수 있다. 이것은 應力腐蝕의 效果나 水素脆性的 效果 등으로 인하여 균열 傳播가 加速된 것으로 생각된다. 그리고, 母材가 熔接部보다 균열 傳播速度가 빠른 것은 균열 단힘에 의한 減速效果보다는 水素脆性 및 應力腐蝕에 의한 傳播速度의 加速效果를 더 크게 받기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.6은 母材의 da/dN 과 ΔK_{eff} 의 關係를 나타낸 것으로, ΔK_{eff} 로 표시할 경우 腐蝕環境의 影響이

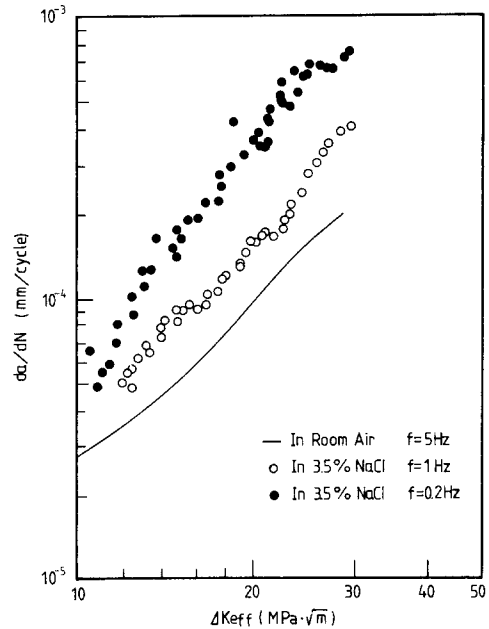


Fig.6 Fatigue crack propagation in terms of ΔK_{eff} (base metal, 3.5% NaCl solution)

명백히 나타난다. 여기서, 3.5% NaCl 水溶液이 誘發하는 腐蝕效果로서 腐蝕副産物에 의한 균열 단힘량은 大氣中의 경우와 비교하여 거의 差異가 없으므로(Fig.8 참고), 이 경우는 水素脆性 및 應力腐蝕 등으로 인한 균열 傳播의 加速效果가 주로 作用함을 알 수 있다.

Fig.7은 熔接部의 경우를 表示한 것이다. 1Hz의 경우, ΔK 로 나타내었을 때 腐蝕으로 인한 傳播速度의 增加가 나타나지 않았지만, 균열 단힘량을 제외한 ΔK_{eff} 로 표시할 경우에는 腐蝕環境의 影響이 뚜렷이 나타나 균열 傳播速度의 增加를 명백히 觀察할 수 있다. 또, 낮은 ΔK_{eff} 범위에서 荷重周波數의 影響이 나타나지 않는 것은 熔接金屬의 不均質性 등의 特性으로 인한 낮은 腐蝕率로 水素의 集積과 擴散이 충분이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 반면에, 높은 ΔK_{eff} 범위에서는 荷重周波數의 影響이 나타나는 데, 이것은 1 cycle 동안 균열先端이 腐蝕環境에 露出되는 시간이 1Hz 보다는 0.2Hz에서 길어지기 때문에 낮은 荷重周波數에서 水素脆性이 增進되어 균열 傳播速度가 커지게 된다.^{23,25}

이상에서와 같이 大氣中에서의 균열 傳播速度보다는 3.5% NaCl 水溶液에서의 傳播速度가 빠르며, 熔

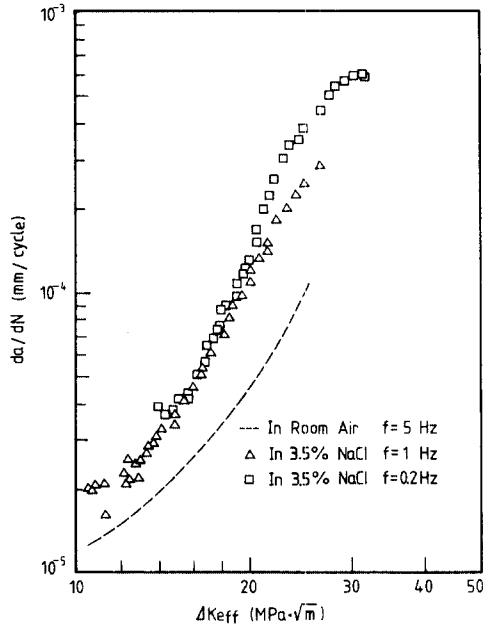


Fig. 7 Fatigue crack propagation in terms of ΔK_{eff} (weld metal, 3.5% NaCl solution)

接部보다는 母材가 빠르고, 낮은 荷重周波數에서 傳播速度가 빠름을 觀察할 수 있다.

Fig. 8은 有効應力擴大係數幅比 U 와 最大應力擴大係數 K_{max} 의 關係를 나타낸 것이다. 熔接部의 경우, 大氣中에 비하여 작은 값의 U 를 나타내어 均열달림량이 큰 것을 알 수 있다. 또, 0.2Hz의 경우는 $K_{max} \approx 24 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 까지 조금 급하게 上昇하고 그 후는 완만하게 變化하며, 1Hz의 경우는 거의 直線的으로 완만한 上昇을 보여 均열달림량에 腐蝕條件과

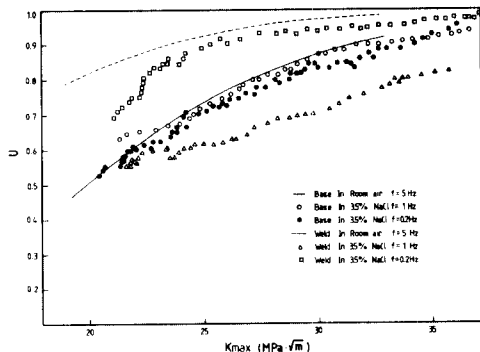


Fig. 8. Effective stress intensity factor range ratio vs K_{max}

荷重周波數의 影響이 큰 것을 나타내고 있다.

母材의 경우, 均열달림량은 大氣中에서와 거의 같으며, 모두 同一線에 集結되어 있으므로 腐蝕條件과 荷重周波數가 U 의 變化에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 4와 Fig. 6에서의 均열傳播速度의 上昇要因은 水素脆性和 應力腐蝕 단의 效果라 생각된다.

3.2 破面觀察

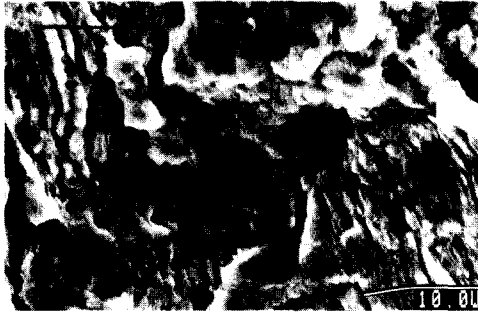
Photo. 1은 母材를 大氣中에서 疲勞實驗한 結果 얻어진 破面의 $\Delta K = 33 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 부근을 走査式 電子顯微鏡으로 觀察한 것이다. 破面은 靛탄하며, 延性스트라이에이션으로 構成되어 있다.



Photo. 1 SEM fractograph of the fatigued surface of a base metal (in room-temperature air, $\Delta K = 33 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, arrow indicates the direction of crack propagation)

Photo. 2와 Photo. 3은 母材를 3.5% NaCl 水溶液에서 腐蝕疲勞實驗한 結果 얻어진 $\Delta K = 33 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 부근의 破面으로, 각각의 (a)는 腐蝕疲勞 均열先端部에 해당한다. (b)는 각각의 ligament 部分을 大氣中에서 疲勞破斷시킨 結果 얻어진 破面이고, 腐蝕疲勞 均열先端으로부터 約 $100\mu\text{m}$ 의 위치이다. (a)는 腐蝕作用이 進行되어 스트라이에이션과 같은 疲勞破面의 특징은 靛찰할 수 없었다. 腐蝕疲勞破面に 미치는 荷重周波數의 影響에 있어서는, 周波數 1Hz의 경우인 Photo. 2(a)보다 0.2Hz의 경우인 Photo. 3(a)가 腐蝕이 많이 發生하였음을 알 수 있다.

Photo. 4~6은 熔接部의 경우를 나타낸 것으로, Photo. 4에서와 같이 大氣中 疲勞實驗 結果의 破面은 靛탄하며, 延性스트라이에이션으로 構成되어 있으나, 母材의 경우에 비하여 약간 凹凸이 크며 熔着비드의 硬化層의 특징인 2차均열이 많은 것을 볼 수 있다. Photo. 5와 Photo. 6의 (a)에 있어서, 스트라이에이션

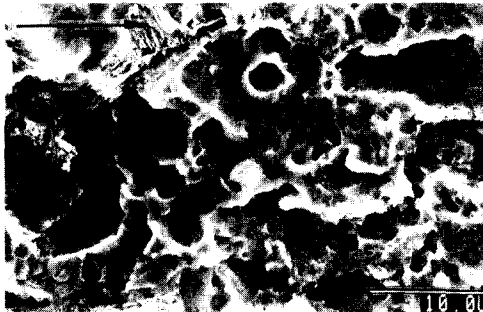


(a) Portion of the corrosion fatigue crack tip ($f=1Hz$)

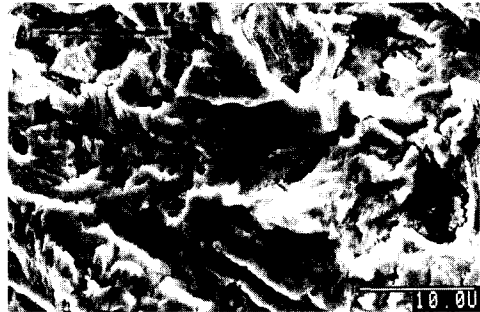


(b) Ahead of the corrosion fatigue crack tip (fatigue fractured in room-temperature air)

Photo.2 SEM fractographs of the corrosion fatigue test of a base metal conducted in 3.5% NaCl solution ($\Delta K=33MPa \cdot m^{1/2}$, arrows indicate the direction of crack propagation)



(a) Portion of the corrosion fatigue crack tip ($f=0.2Hz$)



(b) Ahead of the corrosion fatigue crack tip (fatigue fractured in room-temperature air)

Photo.3 SEM fractographs of the corrosion fatigue test of a base metal conducted in 3.5% NaCl solution ($\Delta K=3.3MPa \cdot m^{1/2}$, arrows indicate the direction of crack propagation)

은 볼 수 없고, 0.2Hz의 경우가 1Hz의 경우 보다 腐蝕狀態가 심한 것을 볼 수 있다.

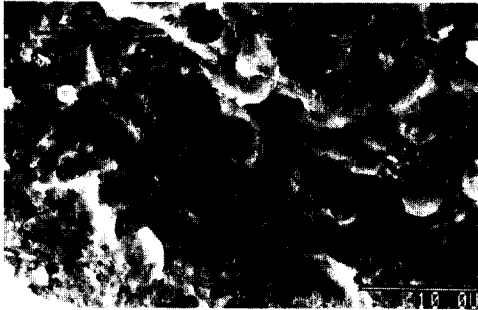
Photo.2, 3, 5, 6의 각 (b)는 $\Delta K=33MPa \cdot m^{1/2}$ 근방에서 腐蝕疲勞實驗을 마친 직후에 大氣中에서 疲勞破斷한 ligament의 初期部分이다. 이것은 腐蝕疲勞균열先端으로부터 約 $100\mu m$ 前方이고, 3.5% NaCl 水溶液에서의 腐蝕의 영향으로 材質의 變化가 일어났음을 알 수 있다. Photo.1과 Photo.4의 破面이 延性的인 스트라이에이션으로 구성되어 있는 반면, 위의 각각의 (b)는 Photo.1과 Photo.4의 경우보다 상대적으로 凹凸이 심하며 脆性的인 형상을 나타내어 水素浸透에 의해 材質이 水素脆性を 나타낸 것으로 생각된다.

이상과 같이, 熔接部보다는 母材가, 1Hz 보다는 0.2Hz의 경우가 더 많은 腐蝕을 받는다. 水素脆性的의 영향도 熔接部보다는 母材가, 1Hz 보다는 0.2Hz의 경

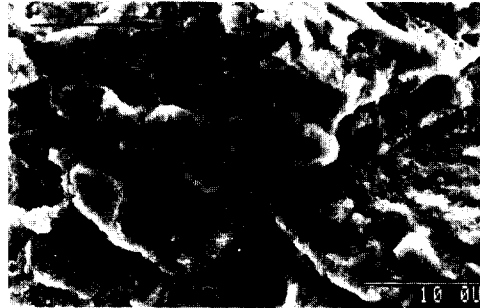


Photo.4 SEM fractograph of the fatigued surface of a weld metal (in room-temperature air, $\Delta K=33MPa \cdot m^{1/2}$, arrow indicates the direction of crack propagation)

우가 많이 나타남을 觀察할 수 있다.

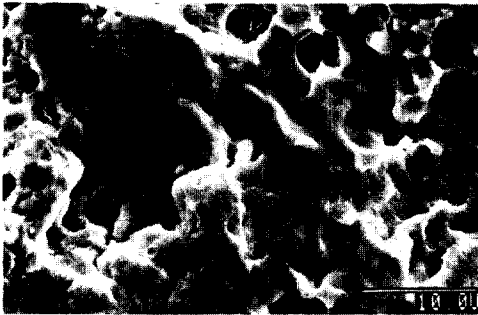


(a) Portion of the corrosion fatigue crack tip ($f=1\text{Hz}$)



(b) Ahead of the corrosion fatigue crack tip (fatigue fractured in room-temperature air)

Photo.5 SEM fractographs of the corrosion fatigue test of a weld metal conducted in 3.5% NaCl solution ($\Delta K=33\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, arrows indicate the direction of crack propagation)



(a) Portion of the corrosion fatigue crack tip ($f=0.2\text{Hz}$)



(b) Ahead of the corrosion fatigue crack tip (fatigue fractured in room-temperature air)

Photo.6 SEM fractographs of the corrosion fatigue test of a weld metal conducted in 3.5% NaCl solution ($\Delta K=33\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, arrows indicate the direction of crack propagation)

4. 結 論

一般構造用鋼(SS41)을 溶弧熔接한 후 CT試片을 製作하여 3.5% NaCl 水溶液에서 腐蝕疲勞實驗을 하였다. 母材와 熔接部를 荷重周波數 1Hz, 0.2Hz 및 應力比 0.1의 正弦波로 하여, 그 腐蝕疲勞 균열傳播特性과 破斷面을 實驗적으로 考察한 結果는 다음과 같다.

1) 疲勞균열 傳播速度 da/dN 은 大氣中에서 보다 3.5% NaCl 水溶液에서 빠르며, 熔接部보다는 母材의 경우가, 낮은 荷重周波數일 수록 傳播速度가 빠르다.

2) 母材는 3.5% NaCl 水溶液에 의한 균열단립량이 荷重周波數에 따라 거의 差異가 나지 않으나, 熔接部의 경우에는 顯著的한 差異가 나타나고, 1Hz의 경

우가 균열단립량이 크게 나타난다.

3) 균열傳播速度를 균열단립의 影響을 제외한 有効應力擴大係數幅 ΔK_{eff} 로 나타낼 때, 3.5% NaCl 水溶液에서 균열傳播의 加速을 명백히 觀察할 수가 있다. 腐蝕疲勞 균열傳播速度는, 母材의 경우는 水素脆性에 의한 加速에 의존하며, 熔接部의 경우에는 균열단립에 의한 減速에 의존한다.

4) 破斷面の SEM 觀察結果는, 熔接部보다는 母材에서, 낮은 周波數일 수록 水素脆性과 腐蝕의 影響이 크다.

參 考 文 獻

- 1) Booth, G.S. and I.G. Wylde, "Fatigue Consideration in Offshore Steel Structures in the

- North Sea”, The Welding Institute Research Bulletin, Vol. 19, No. 3, pp.69—72, 1978
- 2) Jaske, C.E., J.H. Payer, and V.S. Balint, “Corrosion Fatigue of Metals in Marine Environments”, 1st ed., Springer-Verlag, Heidelberg, 1981
 - 3) Jaske, C.E., D. Broek, J.E. Stater, and W.E. Anderson, “Corrosion Fatigue of Structural Steels in Seawater and for Offshore Applications”, ASTM STP 642, pp.19—47, 1978
 - 4) Scott, P.M., “Effects of Environment in Crack Propagation”, Development in Fracture Mechanics-1, Applied Science Publisher LTD., London, pp. 222—253, 1979
 - 5) Hicks, J.G., “Material and Structural Problems in Offshore Installation”, Proceedings, Conference on Welding in Offshore Constructions, 1974
 - 6) Marshall, P.W., “Problems in Long-Life Fatigue Assessment for Fixed Offshore Structures”, Preprint 2638, ASCE National Water Resources and Ocean Engineering Conference, 1976
 - 7) Tomkins, B. and P.M. Scott, “Environment-Sensitive Fracture: Design Considerations”, Metals Technology, Vol.9, pp.240—248, 1982
 - 8) Johnson, R., I. Bretherton, B. Tomkins, P.M. Scott and D.R.U. Silvester, “The Effect of Seawater Corrosion in Fatigue Crack Propagation in Structural Steels”, in European Offshore Steel Research, Vol. 1, 1978
 - 9) Oh, S.W., K.J. Ahn and T.J. Lee, “ J_{Ic} Evaluation of Smooth and Side-grooved CT Specimens in Submerged Arc-welded SB41”, J. of KWS, Vol.4, No.1, pp.47—57, 1986
 - 10) Oh, S.W., J.C. Kim and S.W. Lee, “Fatigue Crack Propagation Characteristics in Smooth and Side-Grooved Specimens of Submerged-Arc Welded SB41 Steel (at Room Temperature in Air)”, The Institute of Korean Resources Development, College of Engineering Dong-A Univ., Vol.10, No.2, pp.17—23, 1986
 - 11) Maddox, S.J., “A Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack in Fillet Welded Joints”, Int. J. Fracture, Vol.11, No.2, pp.221-243, 1975
 - 12) Kikukawa, M., M. Jono K. Tanaka, and M. Takatani, “Measurement of Fatigue Crack Propagation and Crack Closure at Low Stress Intensity Level by Unloading Elastic Compliance Method”, J. of S.M.S., Vol. 25, No. 276, pp. 899—903, 1976
 - 13) ASTM E647-83, “Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle”, ASTM Annual Standards, Vol.03.01, pp.710—730, 1983
 - 14) Paris, P.C., R.J. Bucci and C.D. Little, “Fatigue Crack Propagation of D6AC Steel in Air and Distilled Water”, ASTM STP 513, pp.196—217, 1972
 - 15) Wei, R.P., “On Unloading Environment-Enhanced Fatigue Crack Growth-A Fundamental Approach”, ASTM STP 675 pp. 816—840, 1976
 - 16) McEvily, A.J. and R.P. Wei, “Fracture Mechanics and Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure”, National Association of Corrosion Engineers, Houston, pp. 381—395, 1973
 - 17) Komai, K., S. Kita and K. Endo, “Corrosion Fatigue Crack Growth of a High Tension Steel in NaCl Solution”, Bulletin of JSME, Vol. 27, No. 227, pp. 847—853, 1984
 - 18) Vosikovsky, O., “Fatigue-Crack Growth in an X-65 Line Pipe Steel at Low Cyclic Frequencies in Aqueous Environments”, Jour. of Engrg. Mat. and Tech., pp.298—304, 1975
 - 19) Hinton, B.R.W. and R.P.M. Procter, “The Effect of Cathodic Protection and Over Protection on the Tensile Ductility and Corrosion Fatigue Behavior of X-65 Pipe Line Steel”, Hydrogen Effects in Metals, The Metallurgical Society of AIME, pp.1005—1015, 1981
 - 20) Marcus, H.L., “Environment Effect II: Fatigue-Crack Growth in Metals and Alloys”, Fatigue and Microstructure, ASM, pp.365—383, 1979

- 21) Wei, R.P. and J.E. Landes, "Correlation Between Sustained-Load and Fatigue Crack Growth in High Strength Steels", Material Research and Standards, MTRSA, 9, No. 7, 1969
- 22) Wei, R.P. and G. Shim, "Fracture Mechanics and Corrosion Fatigue", ASTM STP 801, pp. 5—25, 1984
- 23) Komai, K., "Corrosion-Fatigue Crack Growth Retardation and Enhancement in Structural Steels", JSMS, MRS 1, pp. 235—253, 1985
- 24) Wilson, A.D., "Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of a C-Mn-Cb Steel", Jour. of Engrg. Mat. and Tech., Vol. 106, pp. 233—241, 1984
- 25) Elber, W., "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp. 230—242, 1971



● 會員入會 案内 ●

本學會 入會를 원하시는 분은 卷末에 첨부된 學會樣式의 入學願과 所定의 年會費를 學會 事務局으로 送付하시면 理事會의 議決을 거쳐 正式入會를 通告해 드립니다.

詳細한 것은 電話로 問議하여 주십시오.

韓國海洋工學會

釜山市 沙下區 下端洞 840

東亞大學校 工科大學內

電話：(051) 205-2325