

# 해양환경중에서 각종 고장력강의 부식피로 수명예측

金 貴 植\*

## Corrosion Fatigue Life Prediction for High-Tensile Strength Steels in Marine Environment

Gui-Shik Kim\*

### Summary

Prediction method of long-term corrosion fatigue life for high-tensile strength steels in synthetic seawater were proposed. They were obtained from corrosion fatigue process composed of three stages, namely, corrosion pit growth, transition into crack from the corrosion pit, and corrosion fatigue crack growth.

The corrosion pit depth was found to increase with time  $t$  following the relation : corrosion pit depth  $\propto t^{0.39}$ . The condition of transition into crack from the corrosion pit was determined by stress intensity factor, by assuming the corrosion pit as a sharp crack. The crack growth rates were obtained based upon a linear summation method in terms of modified effective stress intensity factor range, which eliminates the corrosion products-induced wedge effect. The predicted results agreed well also with experimental results.

### 서 론

부식피로현상은 수명의 초기에 부식피트(corrosion pit)로 부터 발생한 균열이 서서히 진전해서 피로파괴에 도달하므로, 부식피로수명을 논하기 위해서는 균열발생과 균열진전특성의 파악이 필요하다. 특히 부식피로는 시간의존성이 큰 현상이므로 저응력, 저용력확대계수에서의 균열발생과 균열진전속도의 장수명특성이 필요하다. 통상, 부식환경중에서

사용하는 기계 및 구조물부재의 피로설계에서, 가령 해양구조물의 경우 내구연수를 20년으로 하여 해양파랑의 중심주파수를 10cpm으로 간주하면 약  $10^8$  cycles의 장시간 피로강도와 수명의 파악이 필요하다. 그러나, 부식피로의 장시간 시험이 쉽지 않고, 또 장시간사용중 어느정도의 강도를 갖는가를 정량적으로 파악하기가 어렵다 (Hoepfner; 1979, 山田와 龜井; 1990).

따라서, 본 연구는 해양구조물용 재료로 현재 보급·개발되고 있는 고장력강들의 장시간 부식피로강도 및 수명을 실험실내에서 행한 단기간 부식피로시

\* 공과대학 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

험 (Kim, et al; 1988, 金동: 1989)에 의해 추정하는 방법을 제안한다.

## 실험 방법

실험재료는 인장강도  $50\text{kgf/mm}^2$ 급의 고장력강(HT50)과 열가공재어 고장력강(HT50-TMCP), 그리고  $80\text{kgf/mm}^2$ 급의 고장력강(HT80)이다. 이들의 화학성분과 기계적성질을 Table 1과 2에 표시한다.

부식피로시험은 파단수명과 부식피트의 성장 및 균열발생을 조사한 시험(이하 균열발생시험)과 균열성장시험을 행하였다. 균열발생시험은 Fig. 1에 표시

한 회전굽힘피로시험기용의 봉시험편(Fig. 1(a))을 사용하여 용력비  $R=1$ , 하중반복속도  $f=0.17\text{Hz}$ 로 피로시험을 행하였다. 또, 균열성장시험은 Compact Tension 시험편(Fig. 1(b))을 사용하여  $R=0.1$ ,  $f=0.17\text{Hz}$ 로 하였다. 부식환경은  $25^\circ\text{C}$ 의 ASTM 규격인 공해수이다(ASTM D1141-52).

Table 2. Mechanical properties of test materials

	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	$\delta$ (%)
HT50	392	539	27
HT50-TMCP	382	510	27
HT80	813	852	32

Table 1. Chemical compositions of test materials (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
HT50	0.11	0.44	1.42	0.009	0.001	0.27	-	0.19	-
HT50-TMCP	0.13	0.28	0.96	0.018	0.005	0.03	-	0.02	-
HT80	0.11	0.19	1.01	0.003	0.002	0.77	0.68	0.24	0.44

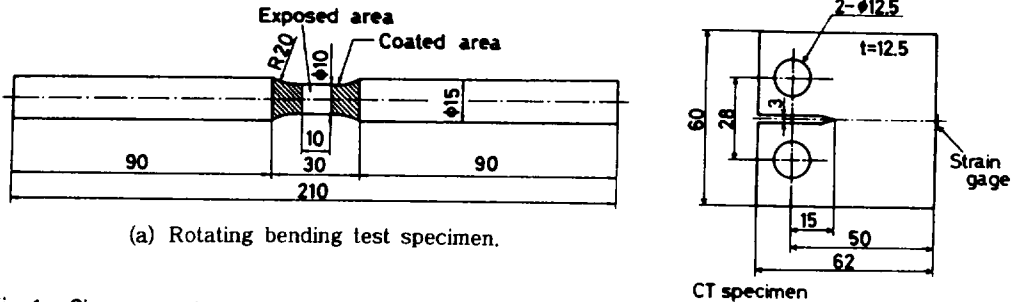


Fig. 1. Shapes and dimensions of test specimens(mm).

(b) Compact tension test specimen.

## 실험결과 및 고찰

### 1. 부식피트의 발생과 성장

부식피트의 발생은 부식환경에 균열발생시험편을 침지한 후 수시간내에 일어났다. 그러므로 부식피트 발생수명은 파단까지의 수명에 비해 무시할 수 있고, 부식피트의 성장수명이 문제가 된다. 균열발생시험의 중단시험 혹은 파단시험에서 조사된 부식피트 길이의 최대치와 시험시간과의 관계를 Fig. 2에 나타낸다. 여기에서, 부식피트길이는 강의 종류에 관계없

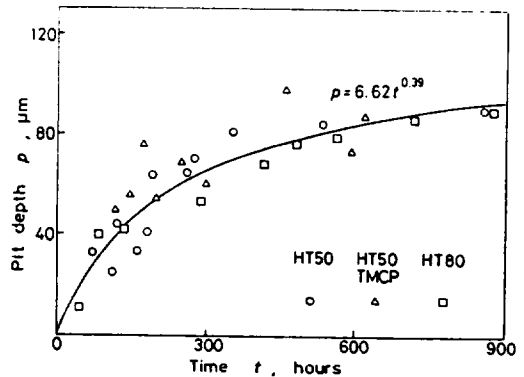


Fig. 2. Relation between pit depth and test time.

이 시험시간이 같으면 거의 비슷한 깊이를 가진다. Fig. 2중의 곡선은 총데이터의 대하여 지수칙을 가정해서 최소자승법에 의해 구한것이다. 부식피트깊이는 시험시간의 0.39승에 비례해서 성장했다.

### 2. 부식피로 균열 발생

부하용력과 부식피트깊이의 관계를 Fig. 3에 나타낸다. 그림중 中窪마크는 부식피트의 깊이를 나타내고 中實마크는 부식피트 밑바닥에 균열이 발생한 부식피트의 깊이이다. Fig. 3에 의하면 균열이 발생한 부식피트깊이는 그 깊이가 어느 일정치에 도달되어 있는것을 알 수 있다.

균열을 가진 부식피트를 날카로운 균열로 간주하여 Newman-Raju (1981)의 3차원 표면균열 용력확

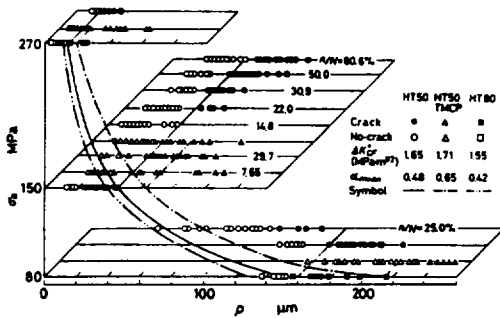


Fig. 3. Relation between stress amplitude,  $\sigma_a$ , and corrosion pit depth,  $\rho$ .

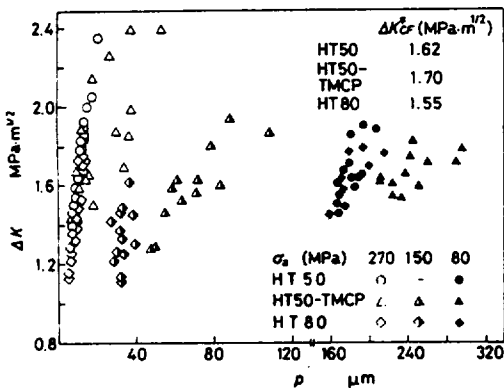


Fig. 4. Relation between stress intensity factor range,  $\Delta K$ , and corrosion pit depth,  $\rho$ .

대계수 계산식에 의해 용력확대계수폭( $\Delta K$ )을 계산하여 부식피트깊이와의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 부하용력에 관계없이  $\Delta K$ 치의 평균치는 일정함을 보인다. 이  $\Delta K$ 치의 평균치를  $\Delta K^*_{CF}$ 로하여 Table 3에 나타낸다.  $\Delta K^*_{CF}$ 는 鋼의 종류에 따라 다소 차이를 보인다. 또 Table 3에는 부식피트형상비의 평균치( $\alpha_{mean}$ )도 나타낸다.

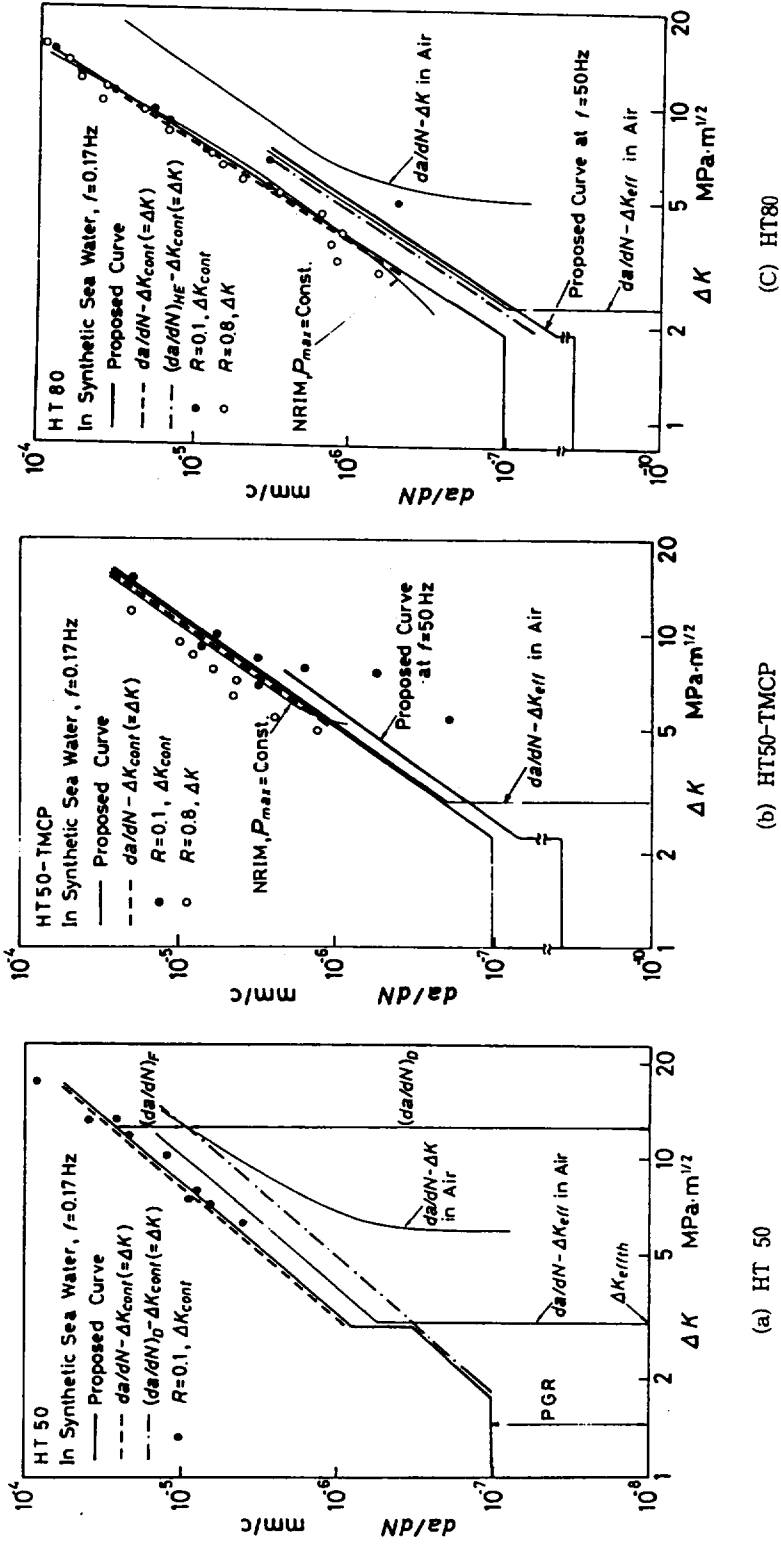
Table 3. Aspect ratios and average stress intensity factor ranges.

	$\alpha_{mean}$	$\Delta K^*_{CF}$	$\Delta K_{CF}$
HT50	0.48	1.65	1.62
HT50-TMCP	0.65	1.71	2.16
HT80	0.42	1.55	1.81

### 3. 장시간 부식피로 균열성장속도

저자 등(1989)은 저용력, 장시간의 부식피로 균열 성장속도에 대한 예측을 행하여 일본기계학회에 발표한 바 있다. 따라서 여기에서는 개략적인 설명과 결과만을 나타낸다. 저용력, 장시간 부식피로에 있어서는 균열성장속도가 극히 늦기 때문에 부식용해에 의해 균열선단이 둔화되고 균열의 폭이 넓어진다. 그러므로 실험실내의 고용력의 단기간 실험에서 관찰되는 소성유기에 의한 균열폐구와 부식생성물에 의한 균열폐구가 생기지 않을 가능성이 크다. 따라서 실험실내의 단기간의 데이터로부터 장시간의 균열성장속도를 추정하는데 있어서는 균열개구비율  $U(= \Delta K_{eff}/\Delta K)$ 가 저하하지 않으므로  $\Delta K = \Delta K_{eff}$ 로 간주할 수 있다.

한편, 駒井 등(1984)과 駒井와 長野(1986)은 부식피로 균열성장시에 있어서 균열선단에서 부식생성물이 가지는 점탄성의 성질에 의해 유효용력확대계수폭( $\Delta K_{eff}$ )이 과소평가되므로, 그 과소평가분을 고려한 수정유효용력확대계수폭( $\Delta K_{cont}$ )을 제안하였다. 여기서는  $\Delta K_{cont}$ 에 의한 균열성장속도( $da/dN$ )를 정리하여 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에는 균열폐구가 생기지 않는  $R=0.8$ 의 고용력비와 일본금속재료기술연구소(NRIM)의 牙田과 松岡(1989)가 실시한 최대하중  $P_{max}=cont$ 의 실험결과도 나타내었다.  $\Delta K_{cont}$ 에 의한 성장속도는 고용력비와 NRIM의 성장속도와 잘 일치하고 있다.



(C) HT80

(b) HT50-TMCP

(a) HT 50

Fig. 5. The estimation procedures of the long-term crack growth rates.

따라서, 실험실의 결과로부터  $\Delta K_{cont} = \Delta K$ 로 간주하여 추정한 장시간 균열성장속도를 실선으로 나타내었다. Fig. 5의 장시간성장속도는  $\Delta K$ 의 감소와 더불어 부식피트의 성장속도(PGR)인 수평선과 교차하게 되는데 이 교차점을 장시간 균열성장에 있어서 용력확대계수의 하한계치로 하여, 부식피트에서 균열이 발생하는 한계치와 비교하여 Table 3에 나타내었다. 3종의 고장력강의 실측치와 예측치는 거의 같다.

#### 4. 장시간 부식피로 수명예측

부식피트로 부터 균열이 발생하여 피로파괴가 발생하는 경우, 부식피로수명은 부식피트의 성장치, 부식피트로부터 균열로 천이하는 한계조건 즉, 균열성장의 하한계치 및 균열성장곡선을 이용하면 구할 수 있다. 전술한 것처럼 부식피트로 부터 균열이 발생하는 한계조건  $\Delta K_{CF}^*$ 은 장시간 균열성장속도의 하한계치  $\Delta K_{CF}$ 와 거의 같으므로, 표면균열의 용력확대계수 산출식인 Newman-Raju식(1981)을 이용하면 (1)식으로 표시되며 이로 부터 부식피트에서 균열이 발생하는 한계길이  $a_f$ 를 구하면 (2)식으로 된다.

$$\Delta K_{CF}^* = H \cdot \sigma_a \cdot (\pi \cdot a_f)^{1/2} / Q \cdot F \quad (1)$$

$$a_f = (\Delta K_{CF}^* / H \cdot \sigma_a \cdot F)^2 \cdot Q / \pi \quad (2)$$

Q: 형상계수, H: 수정계수, F: 시험편치수에 대한 함수

여기에서  $\Delta K_{CF}^*$ 와 부식피트형상비를 Table 2의 수치로 대입했다.

또, 부식피트의 성장길이 p는 (3)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = A \cdot t^B \quad (3)$$

p: 부식피트길이, t: 시험시간, A=6.62, B=0.39

균열은 부식피트길이 p가 균열발생한계길이  $a_f$ 로 되면 발생한다고 가정하면 균열발생수명  $N_f$ 는 (4)식으로부터 구할 수 있다.

$$N_f = f(a_f/A)^{1/B} \quad (4)$$

f: 하중반복속도 (cycle/hour)

한편, 균열성장수명  $N_G$ 는 Fig. 5의 장시간 부식피로 균열성장속도를 Paris칙(5식)을 가정하여 (6)식처럼 구해질 수 있다.

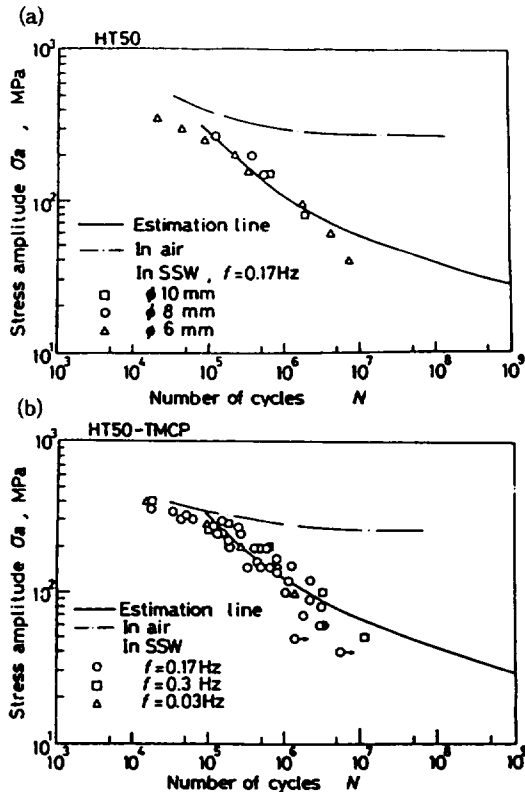
$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

$$N_G = 1/C \cdot \int_{a_f}^{a_1} (\Delta K)^{-m} da \quad (6)$$

$a_1$ : 균열발생 한계길이,  $a_f$ : 파단시의 균열길이  
 $a_f$ 는 피로파괴인성치를 50 MPa·m<sup>1/2</sup>로하여 계산하고,  $\Delta K$ 식은 Newman-Reju식(1981)을, 균열형상은 반구형상으로 가정했다. 따라서 부식피로수명 N은 (7)식으로 된다.

$$N = N_f + N_G \quad (7)$$

(7)식으로 부터 계산한 부식피로수명의 예측치를 실선으로 하여 실험데이터와 함께 Fig. 6에 나타낸다. 이 결과 수명예측선은 실험데이터의 경향을 잘 나타내었다.



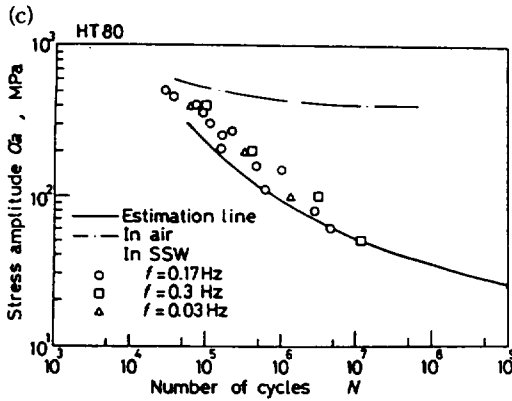


Fig. 6. Relation between estimation results and experimental data.

## 적 요

해양기계 및 구조물용으로 보급 개발되고 있는 각종 고장력강(HT50, HT50-TMCP, HT80)의 실험실 내 해수중 부식피로시험으로 부터 구해지는 부식피트의 성장치, 부식피트로부터 균열이 발생하는 한계 조건  $\Delta K^*_{CF}$ , 부식피로균열 성장속도 (da/dN) 와 수정유효용력확대계수족 ( $\Delta K_{cont}$ )의 관계로 부터 장시간 부식피로 수명예측방법을 제안하고 본 방법에 의하여 구해진 예측수명은 실험결과와 잘 일치하였다.

## 참 고 문 헌

- Hoepfner, D. W., 1979, Model for Prediction of Fatigue Lives Based upon a Pitting Corrosion Fatigue Process, ASTM STP 675, 841-870.
- 駒井謙次郎, 數田卓祐, 遠藤吉郎, 1984, 腐食疲労龜裂進展における腐食生成物のくさび効果に関する研究, 日本機械學論文集(A), 50, 546, 1453-1460.
- 駒井謙次郎, 長野 整, 1986, 腐食生成物のくさび効果に及ぼす繰返し速度と應力比の影響, 日本機械學會論文集(A), 52, 476, 867-874.
- Kim, G. S., K. Minoshima, S. Kinoshita, and K. Komai, 1988, Corrosion Fatigue Crack Initiation of High-Tensile Strength Steels in Synthetic Seawater, JSME International Journal, 31, 3, 606-612.
- 金貴植, 箕島弘二, 駒井謙治郎, 1989, 人工海水中における高張力鋼の腐食疲労き裂進展特性, 日本機械學會論文集(A), 55, 510, 179-185.
- Kim, G. S., K. Minoshima, and K. Komai, 1989, An Estimation Method of Long-Term Corrosion Fatigue Crack Growth Characteristics, JSME International Journal, 32, 2, 263-268.
- 牙田博之, 松岡三郎, 1989, 變動荷重  $\Delta K$  減少試験法による HT80鋼の低 $\Delta K$  域腐食疲労傳ば機構の研究, 防食技術, 38, 378-383.
- Newman, J. C. and I. S. Raju, 1981, An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics, 15, 1-2, 185-192.
- 山田 實, 龜井淺道, 1990, 高張力鋼における腐食疲労き裂の形態, 日本機械學會論文集(A), 56, 522, 244-250.