대 한 조 선 학 회 논 문 집
제 44 권 제 4 호 2007 년 8 월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 44, No. 4, pp. 417-424, August 2007

해수환경중 부식피로균열 발생수명 평가에 관한 연구

김원범†*, 백점기**, 矢島 浩***

부산대학교 생산기술연구소*
부산대학교 공과대학 조선해양공학과**
나가사키 종합과학대학 기계공학과***

Research for the Evaluation of Corrosion Fatigue Crack Initiation Life

Won Beom Kim†*, Jeom Kee Paik** and Hiroshi Yajima***

Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ.*
Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.**
Dept. of Mechanical Engineering, Nagasaki Institute of Applied Science***

Abstract

With regard to corrosion fatigue crack initiation life (Nc), it has been treated ambiguously for the member which doesn't have stress concentration area. In this research, in order to clarify the corrosion fatigue crack initiation life (Nc), corrosion fatigue tests were carried out. Reasonable and universal corrosion fatigue crack initiation life (Nc) was defined and corrosion fatigue crack initiation/propagation model was suggested also. As the fatigue crack which emanates from the pit is usually small, accordingly it is treated as a small crack. In addition, the observation of the corrosion fatigue fracture surfaces using SEM was conducted. And the fracture mechanics analysis using an intrinsic crack model was conducted for the treatment of the small crack. Finally, the followings were obtained. When there is no clear stress concentration point which seems to fall into a corrosion fatigue crack initiation life, the significance of the definition and suggestion of the moment of the reasonable and universal corrosion fatigue crack initiation life (Nc), at which the fatigue crack propagation rate becomes faster than the corrosion pit growth rate so that the fatigue crack initiates from the pit and propagates in earnest, has been clarified.

※Keywords: Corrosion fatigue(부식피로), Corrosion fatigue crack initiation life(부식피로균열발생수명), Small crack(미소균열), Fracture mechanics(파괴역학), Intrinsic crack(고유균열)

접수일: 2006 년 9 월 7 일, 승인일: 2007 년 7 월 3 일
†교신저자: kimwb@pusan.ac.kr, 051-510-3281

1. 서 론

부식환경중에서의 피로균열은 부식과 피로의 상승(相乘)효과에 의해 대기중의 피로균열에 비해 조기에 발생한다(김원범 1997). 피로수명 평가시 부식피로균열 발생수명은 대상물이나 대상부위 등에 따라 그 정의가 다른 것이 현 실정이다.

부식환경하에서 사용되는 구조물에서 구조적 불연속부와 같은 명료한 응력집중부가 존재하는 경우는 별도로 하고, 피로균열의 발생점이 되는 응력집중부가 존재하지 않는 경우에 대해서, 부식피트(pit)의 응력집중에 의하여 발생하는 부식피로균열 발생수명(Nc)은 종래에 모호하게 취급되어왔다.

보편적인 부식피로균열 발생수명을 명확히 정의하는 것은 부식환경하에서의 강구조물의 강도신뢰성을 확보하고 부식피로수명평가를 합리적으로 수행하기 위한 중요한 과제이다.

부식환경하의 조선용강재의 거동에 관하여 선체에서 채취한 부식쇠모강판에 대하여 대기중 및 해수중에서의 피로강도에 관한 연구(김원범 등 2006), 조선 및 해양구조물에서 사용이 확대되고 있는 TMCP 강에 대하여 대기중 및 부식환경하에서의 균열진전거동에 관한 연구(김원범과 백점기 2006) 방식환경하에서의 TMCP 강의 균열진전거동에 관한 연구(김원범과 백점기 2006) 등의 연구가 수행되어져 왔으나 응력집중부가 없는 경우에 부식피트에 주목하여 부식피로균열발생수명에 관하여 고찰한 연구는 없다.

본 연구에서는 부식피로균열 발생시험을 수행하고, 가상균열의 존재를 고려한 고유균열모델(Morita et al. 1993)을 도입한 파괴역학적 해석에 의하여 부식피로균열 발생수명에 관해 검토·고찰한 결과를 서술한다.

2. 부식피로균열 발생수명 평가에 관한 한 가지 제안

2.1 부식피로균열 발생·진전모델

본 연구의 기본이 되는 부식피로균열의 발생·진전모델을 Fig. 1 에 나타낸다. Fig. 1 에 나타낸 부식피로균열의 발생·진전은 이하의 영역으로

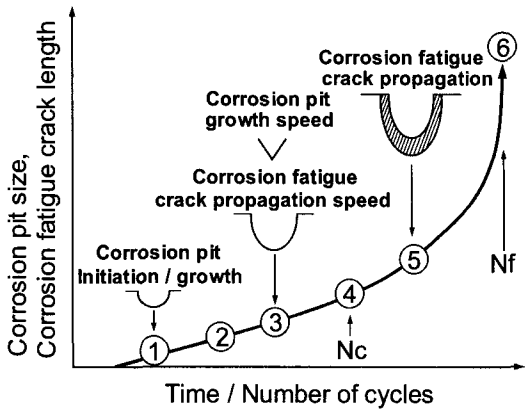


Fig. 1 Schematic diagram of corrosion fatigue crack initiation and propagation

구분된다.

① 부식피트(pit)만이 발생·성장하는 영역
② 부식피트의 응력집중에 의해 부식피로균열이 발생하는 시점
③ 부식피트의 성장속도가 부식피로균열의 진전속도보다 빨라서 부식피트의 침식에 의한 부식피로균열이 발생하지 않는 영역
④ 부식피로균열의 진전속도가 부식피트의 성장속도와 동등하게 되어 부식피로균열이 본격적으로 진전하기 시작하는 시점
⑤ 부식피로균열의 진전속도가 부식피트의 성장속도를 추월하여 부식피로균열이 진전하는 영역
⑥ 파단

본 연구에서는 상기 ④의 시점을 부식피로균열 발생수명(Nc)로 정의한다.

2.2 고유균열모델

부식피트나 부식피로균열 발생수명(Nc) 근방의 균열은 그 치수가 매우 작기 때문에 미소균열로서의 취급이 필요하다. 미소균열에 대해서는 종래의 파괴역학을 그대로 적용할 수 없는 것은 이미 잘 알려져 있다.

본 연구에서는 합리적인 부식피로균열발생수명(Nc)의 평가를 위하여 가상균열의 존재를 고려한 간결하고 실용적인 고유균열모델(Morita et al. 1993)을 도입하여 미소균열의 영향을 고려한 파괴

역학적 수법에 의하여 부식피로균열발생수명(Nc) 평가를 실시하였다.

고유균열모델에 의하여 미소균열에서 장균열에 이르는 부식피로균열의 발생·진전과정의 전(全) 수명과정이 정량적이며 통일적인 평가가 가능할 것으로 기대되었다.

고유균열모델(Morita et al. 1993)의 개념은 다음과 같다. 종래의 선형 파괴역학에 의하여 반무한한판 외측관통균열을 고려하는 경우 피로한도는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\Delta K = 1.122\Delta\sigma\sqrt{\pi a} = \Delta K_{th} \quad \text{에서}$$

$$\Delta\sigma_{th} = \Delta K_{th}/(1.122\sqrt{\pi a}) \qquad (1)$$

여기서,

△K: 응력확대계수범위

$\triangle K_{th}$: 피로균열진전하한계치

Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 식 (1)의 균열재의 피로한도 $\triangle\sigma_{th}$ 와 균열길이 a 의 관계는 a 가 0 (zero)에 근접하면 $\triangle\sigma_{th}$ 는 무한대가 된다. 그러나 $\triangle\sigma_{th}$ 는 평활재의 피로한도 $\triangle\sigma_{w0}$ 이상은 될 수 없다. 따라서 결함이 없는 평활재의 피로한도를 파괴역학적으로 결정하기 위하여 Fig. 3 과 같이 재료고유의 잠재균열이 평활재 및 균열재에 존재한다고 가정하고 이것을 고유균열로 부른다. 균열재에서는 실제 균열길이에 고유균열길이를 더한 길이로 나타낸다. 고유균열의 길이 a_0 는 평활재의 피로한도와 피로균열성장하한계로부터 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$a_0 = (1/\pi)[\Delta K_{th}/(1.122\Delta\sigma_{w0})^2] \qquad (2)$$

여기서 $\Delta\sigma_{w0}$: 평활재피로한도

3. 부식피로균열발생시험

Fig. 1 에 나타낸 기본 모델의 타당성을 검증하기 위하여 인공해수 부식환경중에서의 부식피로시험을 실시하였다. 본 부식피로시험의 목적은 부식피트의 발생·성장거동과 부식피로균열의 발생·

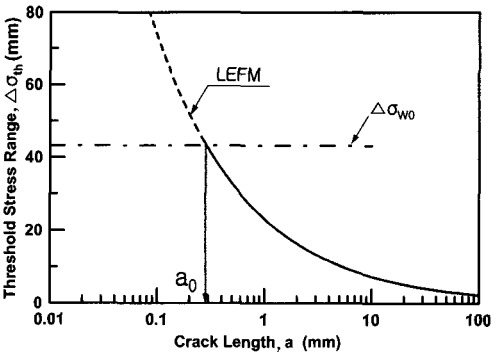
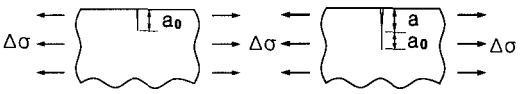


Fig. 2 Concept of intrinsic crack length a_0



(a) at plane body (b) at cracked body

Fig. 3 Concept of intrinsic crack length a_0 at plane body and at cracked body

Table 1 Chemical composition of 13 Cr stainless steel used

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.13	0.32	0.51	0.024	0.002	0.55	11.99	0.36

Table 2 Mechanical properties of 13 Cr stainless steel used

Yield Stress (kgf/mm²)	Tensile Stress (kgf/mm²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)	Reduction of Area (%)
61.6	75.4	23.8	68.7	223

진전거동을 현미경으로 직접 관찰·파악하고, 시험편 파단후 파단면을 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰하여 본 연구의 목적달성을 위한 유용한 정보를 얻는데 있다.

3.1 공시재와 시험편 및 시험방법

공시재로는 해수환경하에서 전면부식을 일으키지 않고 부식피트의 관찰이 비교적 용이한 13Cr계 스텐레스강(SUS410J1)을 사용하였다. 공시재의 화학성분 및 기계적 성질을 각각 Table 1 및 Table 2 에 나타내었다. 시험편 형상 및 치수를

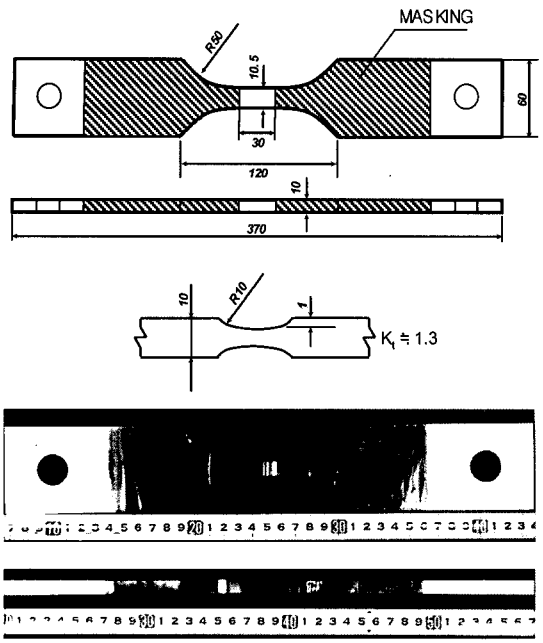


Fig. 4 Shape of corrosion fatigue crack initiation test specimen

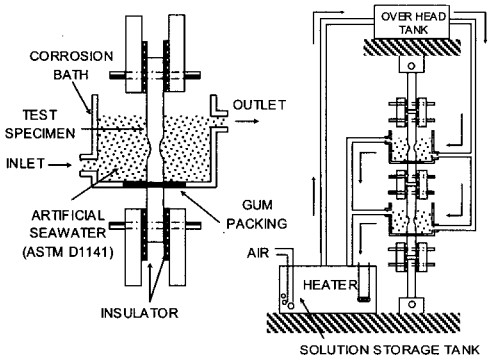


Fig. 5 Corrosion fatigue crack initiation test apparatus

Fig. 4 에 나타내었다. 시험편 표면은 #1600 의 에머리페이퍼로 마무리 연마하고 부식피트의 관찰을 용이하게 하기 위하여 마스킹(masking)을 실시하여 시험 대상부를 시험편 평행부의 영역으로 한정하였다. 이상과 같이 처리한 시험편 2 개를 본 시험에 사용하였다. 이것을 이하에서 No.1 및 No.2 시험편으로 표시한다. 부식피로시험 시스템을 Fig.

Table 3 Conditions of corrosion fatigue crack initiation test

Maximum load	4.0 tonf
Stress ratio	0.1
Test frequency	1.7 Hz
Temperature	60 °C
Environment	Artificial seawater (ASTM D1141)

5 에 나타내었다. 피로시험에는 10tonf 전기유압식 피로시험기를 이용하였다. 시험조건을 Table3 에 나타낸다. 최대하중 4.0tonf(시험편 최소단면의최대응력: 47.6kgf/mm²), 응력비 0.1, 반복속도 1.7Hz 의 축력편진인장하중으로 시험을 실시하였다. 부식환경으로서 ASTM 에서 규정한 성분을 가지는 금속재료부식시험용 인공해수를 사용하고 수용액의 온도를 60°C 로 하였다.

No.2 시험편에서는 부식피로균열의 진전과정을 추적할 목적으로 피로균열표면에 총 18 회의 비치마크를 넣었다.

3.2 시험결과

No.1 및 No.2 시험편의 파단면의 상황을 각각 Fig. 6 및 Fig. 7 에 나타낸다. 이들 사진에서 화살표로 표시한 바와 같이 부식피로균열의 기점은 부식 피트이고, 이들 부식피트로부터 발생한 부식피로균열이 진전해서 파단에 이른 것을 알 수 있다. No.2 시험편의 파단 면에서는 비치마크가 한 개 발견되었다. 따라서 관찰된 비치마크는 최후에 넣은 것으로 단정하였다.

부식피로균열발생시험의 결과를 Table 4 에 나타내었다. 실험한 2 개의 시험편에서 파단수명은 크게 분산된 결과를 나타내었다. 이 요인으로서는 두 시험편 모두 시험대상부(노출부)와 마스킹을 위한 도장부의 경계에서 부식피트가 발생 및 성장하여 파단에 이르렀기 때문에 각각의 시험편에 있어서 응력조건과 부식형태에 차이가 생긴 것으로 판단된다.

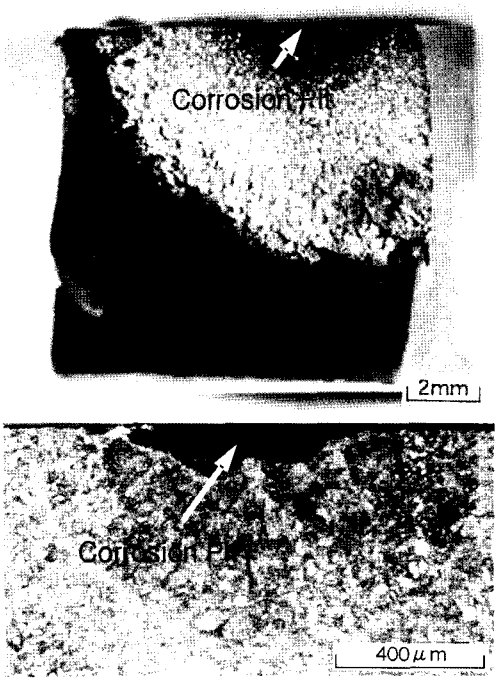


Fig. 6 Fracture surface of No.1 specimen

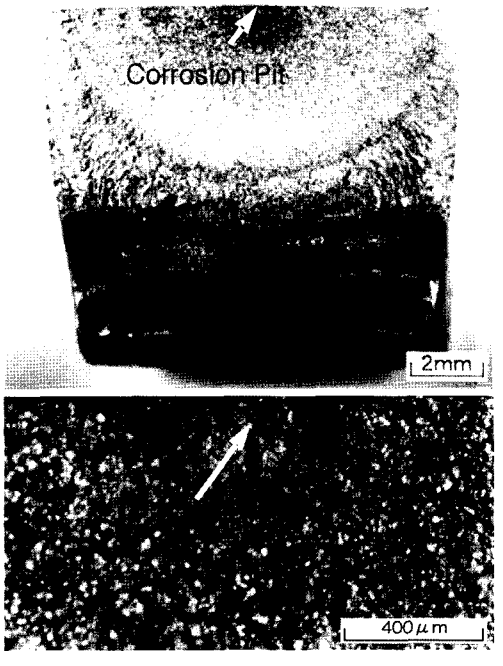


Fig. 7 Fracture surface of No.2 specimen

Table 4 Results of corrosion fatigue crack initiation tests

Specimen No.		1	2
Stress range $\Delta\sigma$ (kgf/mm^2)		34.3	31.3
Cycles of fracture life Nf (cycles)		8.35×10^5	2.44×10^6
Site of fatigue crack initiation		Corrosion pit	
Sizes of corrosion pit (mm)	a	0.120	0.315
	c	0.400	0.225
Sizes of beachmark (mm)	a	—	0.665
	c	—	0.570
Crack length of final fracture (mm)	a	6.5	5.0
	c	6.8	5.3

a: Depth of corrosion pit or fatigue crack
2c: Diameter of corrosion pit or length of corrosion fatigue crack

4. 부식피로균열발생시험결과에 대한 고찰

4.1 재료특성치

No.1 및 No.2 시험편 모두 시험대상부와 마스킹을 위한 도장과의 경계에서 부식피트 및 부식피로균열이 발생・진전하여 파단에 이르렀기 때문에 부식피트 및 부식피로균열의 성장・진전거동을 직접 관찰할 수 없었다. 따라서 파단면의 관찰로부터 얻어진 결과(피트의 치수, 비치마크 치수 등)를 기초로 부식피로균열 발생한계조건의 평가 및 부식피로균열 진전해석에 의한 역 해석적 부식피로균열 발생수명의 평가를 실시하였다.

부식피트나 부식피로균열 발생수명 근방의 균열은 그 치수가 1mm 이하로 미소한 때문에 미소균열로서의 취급이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고유균열모델(Morita et al. 1993)을 도입한 파괴역학적 수법에 의하여 미소균열의 영향을 고려한 평가를 실시하였다.

Table 5 에 본 시험용 강판의 60°C 인공해수 중에서의 재료특성치를 나타내었다. Table 5 에 나타

낸 피로균열진전하한계치(ΔK_{th}) 및 C, m 값은 동일재료로 실시한 60°C 의 3% NaCl 수용액 중에서의 부식피로균열 진전시험결과(김원범 1997)로부터 최소자승법에 의해 결정하였다. 여기서 부식피로균열진전속도식은 식 (3)을 이용하였다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (3)$$

평활재의 피로한도($\Delta\sigma_{w0}$)는 인장응력조건하에서의 값이 불명하였으므로 공시재의 인장강도로부터 인장응력조건하에서의 양진피로한도를 추정하고 (김원범 1997) 수정 Goodman 선도를 이용하여 응력비 0.1 의 경우에 대하여 구하였다. 응력확대계수의 계산에는 Newman-Raju 의 해(Newman and Raju 1981)를 이용하였다.

4.2 부식피로균열발생한계조건의 평가

부식피트를 미소한 균열로 간주하고 그 응력확대계수범위(ΔK)와 피로균열 진전하한계치(ΔK_{th})를 비교하는 것에 의해 부식피로균열 발생한계조건의 평가를 시도하였다.

부식피로균열발생시험에서 균열이 마스킹 도장의 경계에서 발생하여 부식피트의 성장거동을 직접 관찰・파악할 수 없었기 때문에 파단면의 관찰결과로부터 얻어진 부식피트를 피로균열이 진전하기 시작하는 한계의 부식피트치수로 평가하였다.

부식피트와 같이 균열치수가 미소한 영역에서는 피로균열진전하한계치는 균열치수의 저하와 함께 감소하는 것이 알려져 있다(Tanaka 1989). 이러한 균열치수의존성을 나타내는 피로균열진전하한계치[(ΔK_{th})$_s$]는 고유균열모델에 의하면 식 (4)와 같이 나타내어진다(김원범 1997).

$$\frac{(\Delta K_{th})_s}{\Delta K_{th}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + a_0/a}}\right) \quad (4)$$

여기서, a_0 : 고유균열치수

인장응력하에서의 반무한체 표면반원균열에서

$$a_0 = \frac{Q}{\pi}\left(\frac{\Delta K_{th}}{1.12 \cdot \Delta\sigma_{w0}}\right)^2$$

$$Q = 2.464$$

Table 5 Constant of fatigue crack propagation rate of material used

ΔK_{th} (kgf/mm$^{3/2}$)	$\Delta\sigma_{w0}$ (kgf/mm^2)	C	m
29.3	43.2	2.03x10^{-8}	1.95

위 식에서 [(ΔK_{th})$_s$]와 고유균열모델을 이용하여 나타낸 ΔK_{th} 는 각각 다음과 같다.

$$(\Delta K_{th})_s = 1.12 \cdot \Delta\sigma_{th}\sqrt{\pi a} \cdot \frac{1}{\sqrt{Q}} \quad (5)$$

$$(\Delta K_{th}) = 1.12 \cdot \Delta\sigma_{th}\sqrt{\pi(a + a_0)} \cdot \frac{1}{\sqrt{Q}} \quad (6)$$

(4)식에 의하여 나타내어지는 피로균열진전하한계치[(ΔK_{th})$_s$] 및 파단면의 관찰로부터 얻어진 부식피트의 응력확대계수범위(ΔK)와, 균열길이와의 관계를 Fig. 8 에 나타낸다. Fig. 8 의 종축은 장균열에 대한 피로균열진전하한계치(ΔK_{th})로 무차원화하였고, 횡축은 고유균열치수(a_0)로 무차원화하여 나타내었다.

실선은 (4)식에 의하여 나타내어지는 피로균열진전하한계치[(ΔK_{th})$_s$]를 나타내고 있고, 파선은 장균열에 대한 피로균열진전하한계치(ΔK_{th})를 나타내고 있다. 또한 ■ 및 ● 표시는 부식피로균열발생시험의 결과로부터 얻어진 실측치를 나타내고 있다. 또한 동일재료에 의한 평면굽힘하중에서의 동일환경중에서의 부식피로시험의 결과(Ebara et al. 1990)도 병행하여 □ 및 ○ 표시로 나타내었다.

여기서 부식피트의 실측치는 동일기준으로 비교검토하기 위하여 등가치를 가지는 반무한체 표면반원균열로 환산하였다.

Fig. 8 로부터 명확한 바와 같이 피트로 부터 부식피로균열이 발생하기 시작하는 한계의 ΔK의 실측치는 장균열에 대한 ΔK_{th}보다 상당히 작고 균열치수의존성을 나타내고 있다.

고유균열모델을 이용한 피로균열진전하한계치[(ΔK_{th})$_s$]는 균열치수의 저하와 함께 감소해가는 균열치수의존성을 잘 나타내고 있고, 또한 실측치와 잘 대응하고 있다.

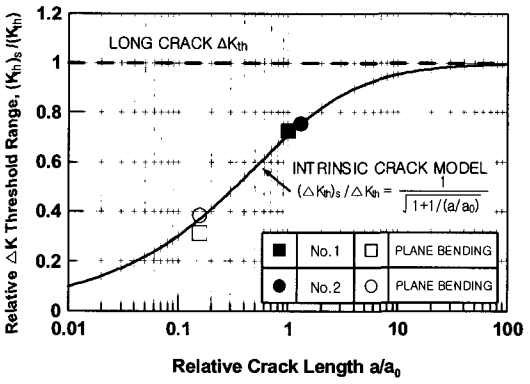


Fig. 8 Results of evaluation for the critical condition of corrosion fatigue crack initiation

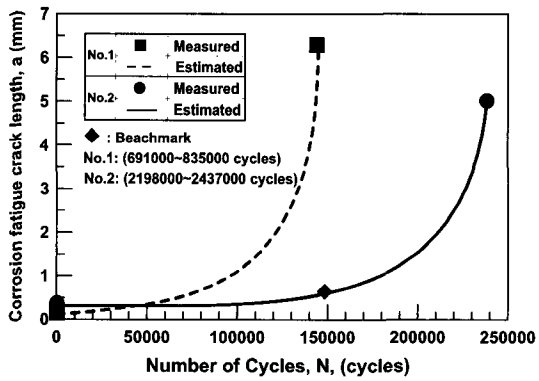


Fig. 9 Comparison between measured and estimated results for corrosion fatigue crack propagation

이상으로부터, 고유균열모델을 이용한 피로균열 진전하한계치 $[(\Delta K_{th})_s]$에 의한 평가에 의하여 부식피로균열발생한계조건의 추정이 가능한 것을 알 수 있다.

4.3 부식피로균열진전해석에 의한 부식피로균열 발생수명의 역 해석적 평가

부식피로균열 발생시험결과로 부터 얻어진 파단면의 정보(Table 4 참조)를 기초로 고유균열모델을 도입한 선형파괴역학에 의한 부식피로균열진전 해석을 실시하여 역 해석적인 부식피로균열 발생수명(Nc)의 평가를 실시하였다.

파단면의 관찰결과로부터 얻어진 피트의 치수가 될 때까지 피트가 성장한 시점에서 피로균열이 발생하기 시작했다고 가정하고 이 수명을 Nc 로 하였다. 이 피트 치수를 초기균열치수(ai)로 하고, 파단균열치수(af)까지 진전할 때까지의 Nc~Nf 간의 균열진전해석을 역 해석법에 의하여 실시하였다.

부식피로균열진전속도식은 앞에 나타낸 (3)식을 이용하여 해석하였고, 각 재료특성치는 Table5 에 나타낸 값을 이용하였다.

해석결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 그림의 횡축은 부식피트로부터 균열이 진전하기 시작하는 시점의 반복수(Nc)를 원점으로 나타내어 표시하였다.

해석결과는 비치마크위치와 잘 대응하고 있고 본 해석모델이 실제의 현상과 잘 일치하는 것이 확인되었다.

5. 결 언

13Cr 계 스텐레스강에 의한 인공해수중에서의 부식피로균열발생시험 및 시험후의 파단면의 관찰 및 고유균열모델을 도입한 파괴역학적 해석에 의하여 부식피로균열의 진전이 부식피트의 성장을 추월하여 시험편의 파단에 이르기까지의 현상을 명확히 나타낼 수가 있었다.

No.1 및 No.2 시험편 모두 시험대상부와 마스킹을 위한 도장과의 경계에서 부식피트 및 부식피로균열이 발생 및 진전하여 파단에 이르렀기 때문에 부식피트 및 부식피로균열의 성장 및 진전거동을 직접 관찰할 수 없었다. 따라서 파단면의 관찰로부터 얻어진 결과(피트의 치수, 비치마크 치수 등)를 기초로 부식피로균열 발생한계조건의 평가와 함께 부식피로균열 진전해석에 의한 역 해석적 부식피로균열 발생수명의 평가를 실시하여 다음과 같이 결론 지을 수 있었다.

즉, 분명한 부식피로균열의 발생점이 되는 응력집중부가 없는 경우의 합리적이고 보편적인 부식피로균열발생수명의 정의는, 부식피트의 성장을 추월하여 피트로부터 부식피로균열이 발생・성장하기 시작하는 시점으로 정의・제안하는 것이 의의가 명확하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실(부산대학교 선체해양구조역학연구실) 사업의 지원에 의해 수행되었음(과제번호 ROA-2006-000-1023P-0).

참 고 문 헌

- 김원범, 1997, 강재의 해수환경중에서의 피로강도 평가에 관한 연구, 히로시마대학 공학박사 학위논문.
- 김원범, 백점기, 岩田光正, 矢島浩, 2006, " 선체의 부식쇠모강판의 대기중 및 해수중 피로강도평가에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 4 호, pp. 480-488.
- 김원범, 백점기, 2006, "TMCP 강의 인공해수중 부식피로균열 진전특성에 관한 연구," 대한조선학회 2006 년도 춘계학술대회 논문집, pp. 913-917.
- 김원범, 백점기, 2006, "TMCP 강의 인공해수중 전기방식환경하에서의 부식피로균열 진전특성에 관한 연구," 대한조선학회 2006 년도 추계학술대회 논문집, pp. 309-314.
- Ebara, R., Tamada, T. and Kawano, H., 1990, "Corrosion Fatigue Process of 12Cr Stainless Steel," ISIJ International, Vol. 30, No. 7, pp. 535-539.
- Morita, K., Kajimoto, K., Murai, R., Fujii, M., Shimogouchi, H. and Iwata, M., 1993, "Effect of flaws on fatigue strength of cast or forged material," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 30, No. 3,pp. 270-275.
- Newman, J.C. Jr. and Raju, I.S., 1981, "Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies," NASA TM 83200.
- Tanaka, K., 1989, "The Propagation of Small Fatigue Cracks," Zairyou, Vol. 33, No. 371. pp. 961-972.

< 김 원 범 >

< 백 점 기 >

< Hiroshi Yajima >