

선체의 부식쇠모강판의 대기중 및 해수중 피로강도평가에 관한 연구

김원범^{†*}, 백점기^{**}, 岩田 光正^{***} 矢島 浩^{****}

부산대학교 생산기술연구소^{*}
부산대학교 공과대학 조선해양공학과^{**}
전 히로시마대학 선박해양공학과 교수^{***}
나가사키 종합과학대학 기계공학과 교수^{****}

Fatigue Strength Evaluation of Rusting Decayed Hull Steel Plate in Air and in Artificial Seawater Condition

Won Beom Kim^{†*}, Jeom Kee Paik^{**}, Mitsumasa Iwata^{***} and Hiroshi Yajima^{****}

Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University^{*}
Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University^{**}
(Former) Dept. of Engineering Systems, Hiroshima University^{***}
Dept. of Mechanical Engineering, Nagasaki Institute of Applied Science^{****}

Abstract

Fatigue strength of hull structural steel plate, extracted from longitudinal bulkhead of a 17-year-old ore/oil carrier for renewal, was investigated in air and in artificial seawater condition. The surface of the plate was covered with corrosion pits and they proved to be crack initiation sites by fractography using SEM. From this research, it was found that the evaluation method for fatigue strength of virgin mild steel plates in air and in artificial seawater can also be applied to the evaluation of the fatigue strength of mild steel plates those were long-term exposed to a corrosive environment and their surfaces had been rusted intensively.

※Keywords: Corrosion fatigue(부식피로), Rusting decayed hull steel plate(부식쇠모한 선체강판), Corrosion pit(부식피트), Corrosion fatigue strength evaluation(부식피로강도평가)

1. 서언

해수 환경중에 사용되는 선체는 도장이나 희생 양극등을 통한 여러 가지 방식조치에도 불구하고 끊임없이 부식이 일어나고 있으며 이것이 원인이 되어 중대손상으로 발전하는 경우도 있다. 예를 들어 1990년 1월부터 1991년 4월까지의 1년 3~4개월 사이에 산적화물선을 중심으로 대형선(2만~15만 D.W.T.) 18척이 침몰·행방불명 또는 중대손상을 일으키고 있다(김원범 1997). 이들 사고의 대부분의 원인은 선체의 부식에 의한 것으로 알려져 있다. 또한 부식환경중에서의 피로균열은 부식과 피로의 상승효과에 의해 대기중에 비하여 조기에 발생한다.

따라서 부식에 의해 쇠모한 강판의 대기중 또는 해수중에서의 피로강도를 파악해두는 것은 사고 원인을 분석하는데 있어서나 고령선 선체의 강도 신뢰성을 정확히 파악하는데 있어서 중요한 과제라고 할 수 있다.

부식피로는 재료적, 역학적, 환경적으로 여러가지 인자의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Ebara 1988). 예를 들어 청수보다 염수에서, 저온보다 고온에서, 빠른 반복속도보다 느린 반복속도에서 부식피로강도는 저하하는 것이 부식피로의 일반적인 특징으로 알려져 있다. 예를 들어 Endo et al.(1982)는 SUS304에 대하여 대기중, 1%NaCl 용액, 3%NaCl 용액으로 삼각파에 의한 0.1Hz 및 5Hz에서 피로균열진전시험을 실시하여 5Hz에서는 1%NaCl 용액 및 3%NaCl 용액중의 피로균열진전속도가 동일하고, 0.1Hz의 3%NaCl 용액에서는 부식용해에 의한 가속효과가 있음을 밝혔다. Komai et al.(1984)의 HT80에 의한 결과에서는 0.1Hz에서 대기중, 1%NaCl 용액, 3.5%NaCl 용액으로 갈수록 균열진전속도가 빠른 것을 나타내었다. 또한 종래의 부식환경에서의 강도에 대한 연구예로서 신공재에 대한 부식환경에서의 피로강도(The Iron and Steel Institute of Japan 1987, Nagai et al. 1977), 대기중 및 해수중에서 일정기간 방치한 부식재에 대한 피로강도(Ogawa et al. 1987), 용접이음에 대한 피로강도(Yuasa and Watanabe 1994) 등 여러 분야에 걸쳐 연구가 진행되어져 왔다.

국내에서의 부식의 영향에 관한 연구는 선체 종강도부재의 부식속도에 대한 확률론적 예측모델(백정기와 박영일 1998), 용접이음재의 회전굽힘 피로강도(강성원과 이승윤 2000), 부식효과를 고려한 검사계획에 대한 연구(김성찬 등 1999) 및 부식에 의한 표면조도의 선박성능에 미치는 영향(권영중과 주동국 1996)등이 있다.

한편 Okazaki et al.(1979) 등은 부식피로에 의한 강도저하는 부식과 피로에 의해 생기는 부식흔에 의한 노치효과에 의존한다고 가정하고 부식재 및 노치재의 부식피로강도를 추정하고 있다.

Nagai et al.(1977)는 노치재의 대기중 및 해수중에서의 피로강도를 평활재의 피로강도로부터 부식효과, 평균응력 및 응력집중률을 고려하여 추정하고 실험결과와 비교하고 있다.

이들의 연구에 의하면 부식환경하에서의 피로시험결과와 파단면에서는 대부분의 경우 부식피트가 발견되었고 부식피트로부터 피로균열이 발생 및 진전해서 파단에 이른다고 보고되어 있다. 최근의 손상보고에서 고령선의 사고사례가 많은 것으로부터 선체의 부식쇠모재에 대한 해수환경중에서의 피로강도와 그 추정법에 대한 검토 및 고찰의 필요성은 크다고 할 수 있다.

본 연구는 건조후 17년 경과한 광석/석유운반선의 선체로부터 채취한 표면이 심하게 부식쇠모해 있는 강판(SR220 1996)의 대기중 및 인공해수중에서의 피로강도와 추정법에 대하여 검토·고찰한 결과이다.

2. 본 연구에 사용한 강판

건조 후 17년 경과한 광석/석유 운반선의 종격벽의 일부가 심하게 부식쇠모한 때문에 새 강판과 교체를 하게 되었다. 따라서 약 2 x 0.6m의 치수로 절단해낸 부식쇠모강판(Fig. 1 참조)을 대상으로 본 연구의 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 종격벽의 도면상 치수는 13mm이었다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 원래 두께 13mm의 강판이 5.3~8.3mm 정도 까지 두께가 감소해 있었다. 또 Fig. 2에 나타난 바와 같이 공시강판의 양 표면은 두꺼운 녹으로 뒤덮여 있고 양 표면 모

두 전면부식에 의해 부식최모해 있었다.

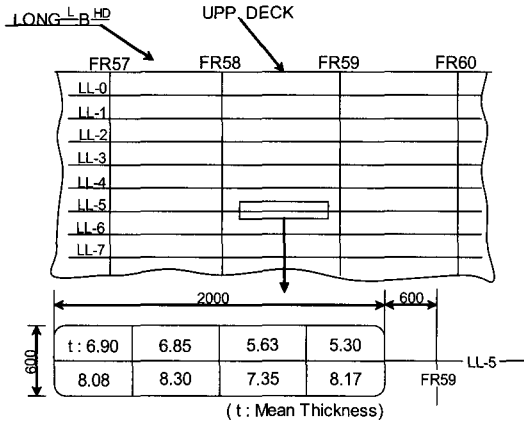


Fig. 1 Extraction position of hull steel plate used

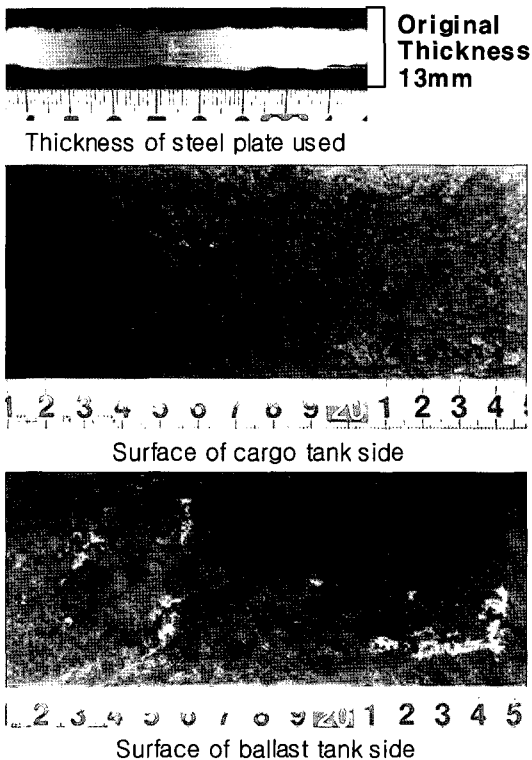


Fig. 2 Surface and cross section of hull steel plate used

Table 1 Mechanical properties of hull steel plate used

Direction	t(mm)	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)
L	4.75	308	474	38
	3.20	312	476	37
C	5.45	311	476	37
	4.85	313	473	37
	5.35	320	480	36

KA:Y.P.≥ 235MPa, T.S.=400~490MPa
Specimen Size: t x 25(W) x 50(G.L.)

Table 2 Chemical composition of hull steel plate used

C	Si	Mn	P	S	Ceq
0.17	0.20	0.65	0.02	0.01	0.28

또한 밸러스트측은 붉은색 녹이 뒤덮여 있음을 관찰할 수 있었다. 공시강판은 도면상에서 일반선체용 연강 A 급 강판이었고 실험을 위하여 양 표면을 절삭하여 평탄부가 얻어지도록 판두께를 3~5mm 로 가공하여 압연방향 및 압연직각방향으로 JIS 5 호 시험편을 채취하여 실온에서 인장시험을 실시하였다. 시험결과를 Table 1 에 나타내었다. 또한, 공시강판의 화학성분을 조사한 결과를 Table 2 에 나타내었다.

Table 1 에 나타난 기계적 성질 및 Table 2 에 나타난 화학성분 모두 일반 선체용 연강 A 급 강판으로서 극히 표준적인 것이라고 할 수 있었다. 공시강판 판두께 단면의 비커스 경도분포의 측정 결과를 Fig. 3 에 나타내었다.

Table 1 에 나타난 인장강도와 Fig. 3 에 나타난 비커스 경도분포와의 관계도 JIS 에서 참고하고 있는 SAE J417 를 잘 만족하고 있고 심하게 부식최모한 표층부가 특별히 변화한징후는 보이지 않았다. 공시강판 판두께 단면의 마이크로조직은 Fig. 4 와 같다. 이것은 일반 선체용 연

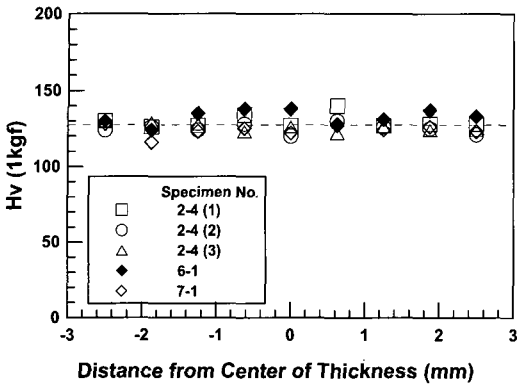


Fig. 3 Hardness distribution in cross section of hull steel plate used

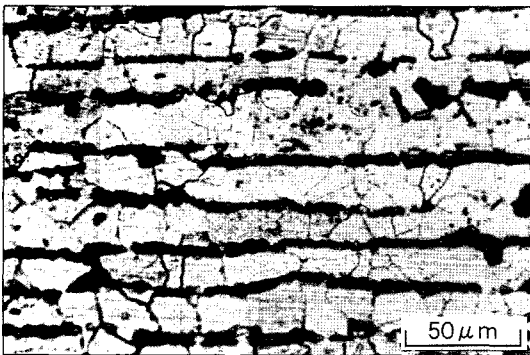


Fig. 4 Microstructure in cross section of hull steel plate used

강판으로서 극히 일반적인 페라이트 · 퍼얼라이트 조직이었다.

이상으로부터 건조후 17년 경과한 선체로부터 채취한 본 연구의 부식쇠모강판(일반선체용연강 A급 강판)은 같은 급의 신품강판과 거의 동등한 제 특성을 가지고 있는 것이 명확하였다.

3. 대기중 · 인공해수중 피로시험내용

실험에 사용하는 강판의 양 표면을 기계절삭 후 #400 에머리 종이로 연마하여 “연마재(Surface Flushed Specimen, SF)”라 하였다. 또한 녹이 붙어있는 상태의 시험편을 “부식재(Rusted Specimen, RS)”라 하였다.

부식재 시험편의 표면은 Fig. 2와 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 이미 부식이 일어나서 두꺼운 녹으로 덮혀 있으므로 도장수명에 대한 영향은 고려하지 않았다. 대기중 및 인공해수중에서의 피로시험에 이용한 시험편 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 10tonf 전기유압식 피로시험기를 사용하여 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 5개의 시험편을 직렬로 연결하여 피로시험을 하였기 때문에 Fig. 5 중의 b(시험편폭)의 치수는 17.0mm ~ 26.5mm로 하였다. 단, 시험편 폭(b)의 치수에 대응한 곡률반경(R)의 치수를 변화시켜서 시험편 최소단면에 있어서 표면의 부식피트에 의한 응력집중계수영향을 고려하지 않는 응력집중계수가 항상 1.1이 되도록 하였다.

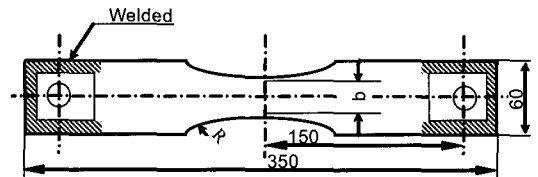


Fig. 5 Shape of fatigue test specimen

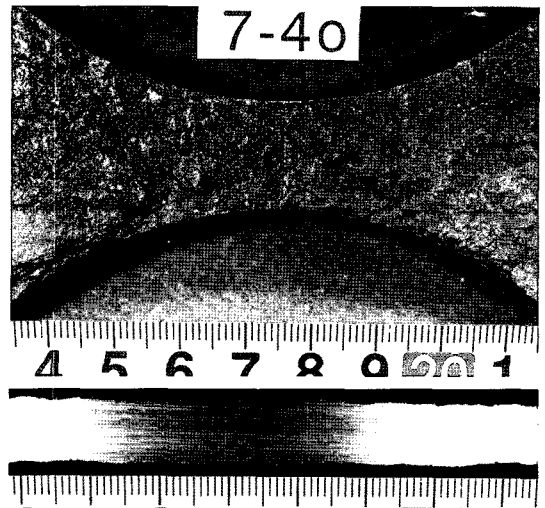


Fig. 6 Surface and cross section of rusted specimen for fatigue test

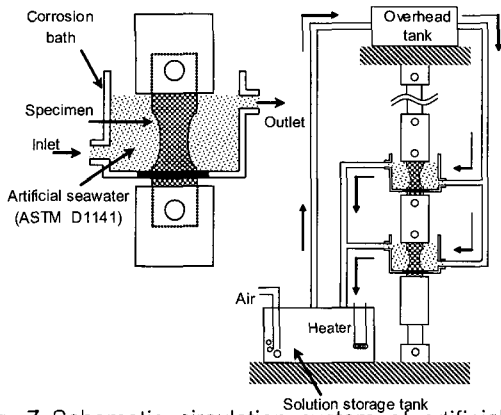


Fig. 7 Schematic circulation system of artificial seawater for fatigue test

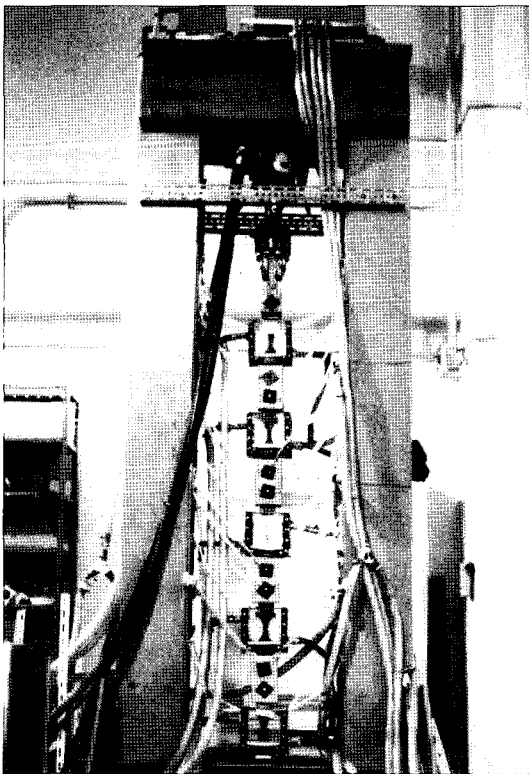


Fig. 8 Corrosion fatigue specimen, circulation system and equipment in tests

부식재의 시험편 표면과 시험편 판두께 단면을 Fig. 6 에 나타내었다. 앞에서 기술한 바와 같이

Table 3 Conditions for fatigue test

	In air	In artificial seawater (ASTM D1141)
Test Frequency	3~5Hz	0.17Hz
Stress Ratio	0.1	0.1
Temperature	Room temp.	25°C
pH	-	8.2

원래 판두께 13mm 의 연강판이 5.3mm~8.3mm 정도까지 부식에 의해 판두께가 감소해 있었다. 또한 시험에 사용한 강판은 종격벽의 일부이었으나 밸러스트탱크측이나 화물탱크측 모두 두꺼운 녹으로 덮여 있었다.

부식재의 시험편 표면과 최소단면 부근의 판두께는 포인트마이크로미터로 10 개소를 측정하여 그 평균값으로 표시하였다. 대기중에서의 피로시험은 축력편진인장하중조건(응력비 0.1)으로 실시하고 하중반복속도는 3~5Hz 로 하였다.

또한 인공해수중에서의 피로시험도 마찬가지로 응력비 0.1 의 축력으로 실시하고 하중반복속도는 0.17Hz(10cpm) 로 하였다. 그리고 ASTM 에서 규정된 성분을 가지는 금속재료 부식시험용 인공해수(아쿠아마린)를 사용하고 온도는 25°C로 하였다

부식재 즉 시험편 표면에 녹이 붙어있는 상태의 시험편의 인공해수중에서의 피로시험에 있어서는 금속면이 직접 해수에 닿는 시험편 표면이 아노드(양극)가 되고 녹이 붙어 있는 표면이 캐소드(음극)가 되기 때문에 표면이 전기방식 상태가 되어 부식이 잘 일어나지 않을 것으로 예상되었다. 따라서 시험편 표면에 예폭시 수지를 도포하여 방식처리를 하여 인공해수중에서 자연 부식상태가 되도록 하여 실험을 실시하였다.

인공해수중에서의 피로시험은 시험편과 부식수조 사이에 실리콘고무로 패킹을 해서 결합하고 부식수조내에 인공해수를 순환시켜 실시하였다.

강재의 해수중에 있어서의 자연 부식전위는 강재를 해수중에 침적하여 약 8 시간 후에 안정상태로 되는 것이 알려져 있기 때문에(Nagai et al. 1977) 시험편을 인공해수중에 침적하여 12 시간 경과한 후에 부하를 개시 하였다. 대기중 및 인공해수중

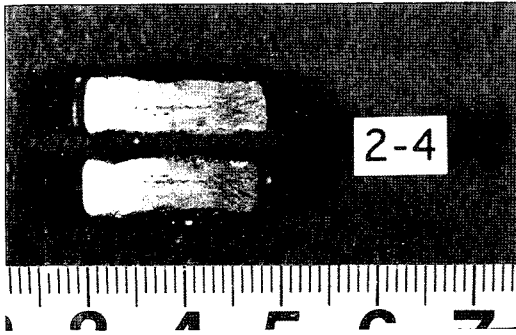


Fig. 9 Example of fatigue fracture surface of rusted specimen (in air)

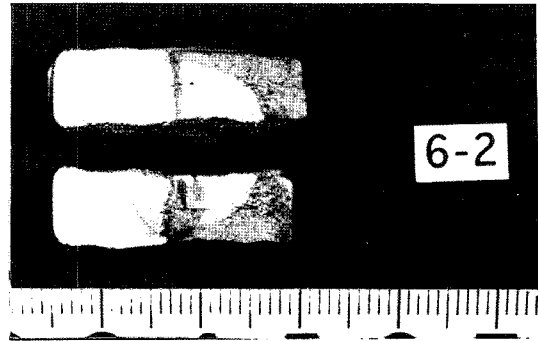


Fig. 11 Example of fatigue fracture surface of rusted specimen (in artificial seawater)

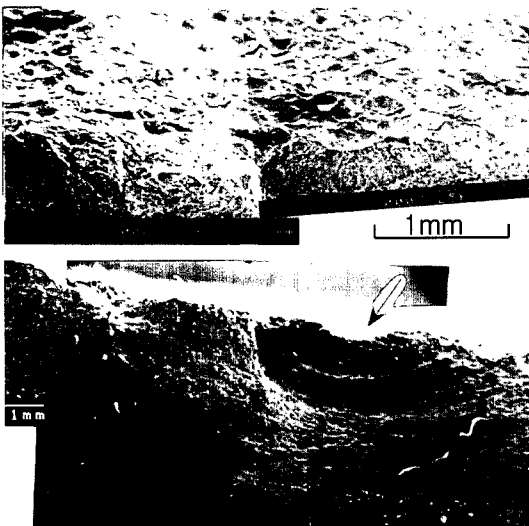


Fig. 10 Example of SEM observation for fatigue fracture surface of rusted specimen(in air)

중에서의 피로시험조건을 Table3 에 나타낸다.

4. 대기중 • 인공해수중 피로시험결과

연마재 및 부식재에 대한 대기중 및 인공해수중에서의 피로시험결과와 응력범위($\Delta\sigma$)와 파단반복수(N_f)와의 관계를 Fig. 14 에 나타내었다.

이 그래프에서 해수환경중 부식재의 부식피로 특성은 10^6 회 이상 영역($f=0.17\text{Hz}$, 시험기간 158 일)의 데이터를 포함하고 있다.

Fig. 9 는 대기중에서 피로시험을 실시한 부식재 중 하나의 파단면이다. 또한 대기중에서 피로시험을 실시한 부식재의 표면의 녹을 제거하여 피로균열이 발생한 점을 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 Fig. 10 에 나타낸다. Fig. 10 으로부터 알 수 있는 바와 같이 시험편 표면에는 직경 0.2~0.7mm 깊이 0.1~0.2mm 정도의 부식피트가 무수히 존재하고 있고 이들 피트의 바닥으로부터 피로균열이 발생·성장한 것이 확인되었다. Fig. 11 은 인공해수 중에서 피로시험을 실시한 부식재 중 하나의 파단면이다. 또한 파단한 각 부식재 시험편의 주사형전자현미경(SEM) 사진으로부터 관찰하여 구한 피로균열의 발생점이 된 부식피트의 응력집중계수(K_f)를 Table 4 에 나타낸다.

여기서 부식피트의 응력집중계수(K_f)는 다음과 같이 구하였다. 즉, Fig. 10 의 부식피트와 같은 응력집중부가 연속해서 존재하는 경우에는 단독으로 존재하는 경우에 비해서 상호간섭에 의해 응력집중이 완화되어 응력집중률이 저하하는 것이 알려져 있고 이때의 응력집중률은 선도의 형태로 주어진다(Nishida 1971). 계산을 간편하게 하기 위하여 길이방향의 2 차원 문제(Iwata et al. 1997)로 간주하여 Fig. 12 와 같이 부식피트의 곡률반경을 ρ 라하고 부식피트의 표면의 길이를 $2c$, 깊이를 a 라 할때, Fig. 12 의 피치 $2P$ 는 $2c$ 와 동등하다고 하여 Table 4 와 같이 K_t 를 구하였다.

Table 4 로부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 부식재 표면의 피로균열의 발생점이 된 부식피트의 응력집중계수 K_f 는 약 1.9 라고 볼 수 있다.

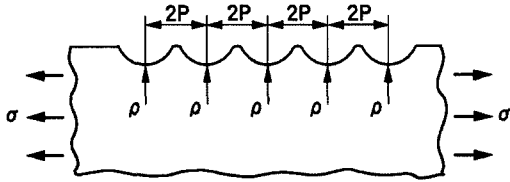


Fig. 12 Multi-notched semi-infinite plate

Table 4 Sizes and stress concentration factors of surface rusted pits at crack initiation points for rusted specimens

Test conditions	Speci. No.	ρ (mm)	$2c$ (mm)	a (mm)	K_t
In air	2 - 4	0.28	0.40	0.10	1.9
	6 - 1	0.35	0.63	0.20	2.0
	3 - 2	0.33	0.55	0.15	1.9
	7 - 1	0.38	0.68	0.23	2.0
	8 - 3	0.25	0.45	0.13	2.0
In arti. sea-water	4 - 3	0.10	0.15	0.04	1.9
	1 - 2	0.33	0.48	0.10	1.9
	7 - 4	0.45	0.65	0.15	1.9
	5 - 1	0.25	0.40	0.10	1.9
	6 - 2	0.30	0.50	0.15	1.9

5. 대기중 · 인공해수중 피로시험결과에 대한 고찰

이전 저자중의 한 명이 실시한 연구 결과에 의하면 일반선체용연강 A 급강판에 대하여 평활환봉 시험편으로 얻어지는 대기중에서의 응력-변형률관계와 완전양진일정변형을 피로시험 결과의 $\Delta\epsilon \sim N_c$ 곡선 및 시간에 의존하는 부식의 영향을 나타내는 부식효과계수 K_c 가 파악되어 있으면 편진인장하중 조건하에서(하중제어)의 노치평판시험편의 대기중 및 인공해수중에서의 피로강도 ($\Delta\sigma \sim N_c$ 곡선)를 추정 가능한 것이 알려져 있다(Nagai et al. 1977).

앞에서 서술한 바와 같이 본 연구에 사용한 건조후 17년경과한 선체로부터 채취한 부식쇠모강판(일반선체용연강 A 급 강판)은 동급의 신소재와 거의 동등한 제 성질을 가지고 있는 것으로 판단되었다. 따라서 이전 저자중의 한 명이 실시한(Nagai et al. 1977) 것과 같은 재료정수(응력~변형률 관계와 $\Delta\epsilon \sim N_c$ 곡선)를 사용하여 같은 수법으로 Fig. 13의 실선으로 나타낸 방법으로 연마재와 부식재에 대한 대기중 및 인공해수중에서의 피로강도를 추정한 결과를 피로시험결과와 함께 Fig. 14에 나타내었다. 앞에서 서술한 바와 같이 부식재 표면의 피로균열 발생점이 된 부식피트의 K_t 를 약 1.9로 계산하였다. Fig. 14로부터 알 수 있는 바와 같이 추정치는 시험결과와 잘 일치하고 있다. 이 추정선도를 간단히 나타내면 다음과 같다.

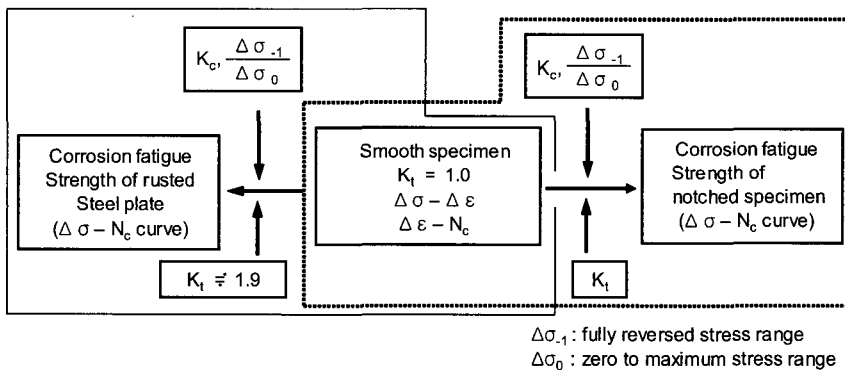


Fig. 13 Flow chart for estimation of fatigue strength of notched specimen and its application to the rusting decayed hull steel plate in seawater

$$K_t \cdot \Delta\sigma = D \tag{1}$$

여기서 D 는 응력-변형률 함수이다.
추정결과의 $\Delta\sigma \sim N_c$ 곡선은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma_A = \frac{D}{K_t}$$

$$\Delta\sigma_S = \frac{D}{K_t \cdot K_c} \tag{2}$$

여기서, $\Delta\sigma_A$: 대기중 피로강도
 $\Delta\sigma_S$: 해수중 피로강도

$$D = (0.0207 N_c^{-0.176} + 1.453 N_c^{-0.597})^{1/2} \times 10^3 \tag{3}$$

$$K_c = 1.0 \quad T_c \leq 500 \text{ min}$$

$$= 0.576 \left(\frac{N_c}{f}\right)^{0.0887}, K_t \geq 1.5, T_c > 500 \text{ min}$$

$$= 0.849 \left(\frac{N_c}{f}\right)^{0.0263}, K_t = 1.0, T_c > 500 \text{ min} \tag{4}$$

여기서, $T_c = N_c / f$
 $f = \text{frequency(cpm)}$

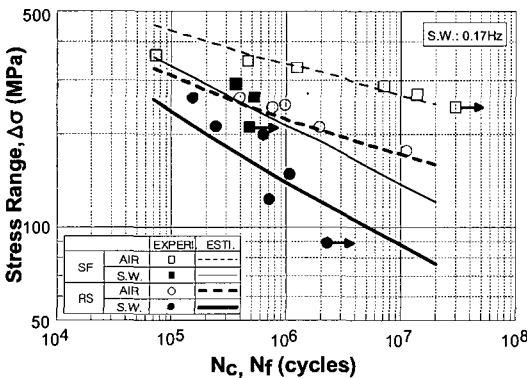


Fig. 14 Fatigue strength of hull steel plate used (Fatigue test results and estimated results)

5. 결론

건조 후 17년 경과한 고령선의 선체로부터 채취한 부식쇠모강판의 대기중 및 인공해수중에서의 피로강도에 대해서 검토·고찰하고 이하의 결론을 얻었다.

즉, 17년간 해수부식환경하에서 여러가지 반복하중을 받은 공시강판에 대해서 그 기본적인 제 성능은 신소재와 거의 동등한 것으로 볼 수 있었다.

따라서 부식쇠모에 의한 강판의 판후감소에 따르는 응력조건의 변화 외에 부식쇠모강판의 피로강도를 결정하는 주된 요인은 표면의 부식피트에 기인하는 표면조도에 의한 응력집중이라고 할 수 있다.

이상으로부터 장기간 부식환경에 노출되어 표면이 심하게 부식쇠모한 강판에 대해서도 대기중에서의 피로강도 및 인공해수중에서의 부식피로강도평가는 신소재에 대한 평가법이 적용 가능함을 명확히 하였다.

참 고 문 헌

- 김원범, 1997, 강재의 해수환경중에서의 피로강도평가에 관한 연구, 히로시마대학 공학박사(Dr Eng.) 학위논문 (일본어)
- 강성원, 이승윤, 2000, "CO2 용접이음재의 대기 및 해수중에서의 회전굽힘 피로강도에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 2 호, pp. 118-126.
- 권영중, 주동국, 1996, "선박의 표면조도에 관한 연구: 추정법 및 선박성능에 미치는 영향," 대한조선학회 논문집, 제 33 권, 제 2 호, pp. 31-35.
- 김성찬, 윤장호, 藤本由紀夫, 1999, "부식효과를 고려한 선체구조 검사계획안의 최적화," 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 4 호, pp. 137-146
- 백정기, 박영일, 1998, "유조선 증강도부재의 확률론적 부식속도 예측모델의 개발," 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 2 호, pp. 83-93.

- Ebara, R., 1988, " Corrosion Fatigue Test Method for the Material," Bulletin of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 703, pp. 34-43 (in Japanese).
- Endo, K., Komai, K. and Murayama, S., 1982, " Influence of Cl-Concentration on Corrosion Fatigue Crack Growth of an Austenitic Stainless Steel," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 48, No. 436, pp. 1489-1495(in Japanese)
- Iwata, M., Yajima, H., Huang, Y., Yamamoto, M., Kim, W.B. and Saito, T., 1997, " A Study on the Fatigue Strength of Rusting Decayed Steel Plates," The West-Japan Society of Naval Architects, No. 93, pp. 97-102(in Japanese).
- Komai, K., Minoshima, K. and Yamamoto, K., 1984, " Corrosion Fatigue Crack Growth in High Tensile Strength Steel under Cathodic Overprotection," Zairyo, Vol. 33, No. 374, pp. 1407-1413(in Japanese).
- Nagai, K., Mori, M., Yajima, H. Yamamoto, Y. and Fujimoto, Y., 1977, " Studies on the Evaluation of Corrosion Fatigue Crack Initiation," Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 142, pp. 239-250(in Japanese).
- Nishida, M., 1971, Stress Concentration, Morikita-shuppan(in Japanese).
- Ogawa, K., Saruki, K., Asano, T. and Furuta, T., 1987, " Influence of Notch Sensitivity on Fatigue Strength of Steel Sheets Corroded with Salt-Water," Zairyou, Vol. 20, No. 411, pp. 1375-1380(in Japanese).
- Okazaki, S., Nakamura, H. and Tsunenari, T., 1979, " On Corrosion Fatigue Strength of High Tensile Steels," Zairyo, Vol. 28, No. 312, pp. 887-893(in Japanese).
- SR220 Final Report, " A Study on the Corrosion Fatigue Strength of Ballast Tank," Shipbuilding Research Association of Japan, (1996), pp. 411-417(in Japanese).
- The Iron and Steel Institute of Japan, The Japan Institute of Metals and Japan Society for the Promotion of Science, 1987, Proceedings of the 3rd Symposium of Environmental Strength of the Steel(in Japanese).
- Yuasa, M. and Watanabe, T., 1994, " Fatigue Strength of Corroded Weld Joints," Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 176, pp. 481-489 (in Japanese).



< 김원범 >



< 백정기 >



< 岩田 光正 >



< 矢島 浩 >