

염분농도변화에 따른 TMCP강의 부식피로강도에 관한 실험적 연구

강성원^{†*}, 김철현^{*}, 이해우^{**}

부산대학교 조선해양공학과^{*}, 삼성중공업 조선플랜트 연구소^{**}

An Experimental Study on Corrosion Fatigue Strength of TMCP Steel
in Consideration of NaCl Salinity

S.W. Kang^{*}, C.H. Kim^{*} and H.W. Lee^{**}

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering Pusan National University^{*}
Shipbuilding & Plant R&D Center, Samsung Heavy Industries, Geoje, Korea^{**}

Abstract

Fatigue strength of offshore structures or ship structures is significantly decreased due to corrosive environment condition such as sea water and/or coal, crude oil of cargoes, compared to that of on shore structures. In corrosive environment, fatigue strength of structures also depends on characteristics of weld material heat affected zone(HAZ).

In this research work, rotary bending fatigue tests of parent material and HAZ of TMCP steel were performed in order to investigate the initiation and propagation of cracks both in air and in NaCl solution. Comparison of fatigue strength in relation with the salinity of NaCl were carried out as well. According to the test results weld material or HAZ of TMCP steel showed higher fatigue strength than that of the parent material. The fatigue strength of TMCP steel decreases drastically in NaCl solution compared to that of in air environment. In particular, more reduced fatigue strength is observed in 1% NaCl solution than in 3% NaCl solution.

※Keywords: Corrosive environment(부식환경), Corrosion fatigue(부식피로), TMCP steel(TMCP 강), Fatigue crack(피로균열)

1. 서언

접수일: 2003년 2월 24일, 승인일: 2003년 5월 29일

†주저자, E-mail: swkang@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2345

최근 대형구조물은 사용조건이 더욱 가혹해지고 있을 뿐만 아니라 경량화요구가 점점 증가하고 있어 이들의 안전은 이전보다도 더 한층 강조되고 있다(한문식, 1993). 현재 선박 및 해양구조물의 구조강도설계는 선급협회의 규칙이나 AWS 규격 등에 근거하여 행해지고 있지만, 이들의 규격들은

피로강도에 주의할 것을 언급하고 있으나 피로설계법에 대해서는 추상적이거나 개략적으로 기술하는데 그치는 것이 많다. 또한 이들 규격은 비교적 오래 전에 제정되었으므로 최근에 많이 개발된 용접재료 및 용접법의 개선 효과 등이 충분히 고려되었다고 할 수 없다. 선체의 부식과 관련된 연구로는 유조선 구조의 종강도 부재를 대상으로 확률적 부식예측모델의 개발(백정기, 1998), 노치를 가진 CO₂ 용접이음재에 대한 피로강도연구(강성원, 2000)등 다수가 있으나, 해상환경에 사용되는 재료의 부식피로에 대한 연구는 아직 충분하지 않다.

일반적으로 선박이나 해양구조물의 파손 원인의 하나로 반복되는 파랑 외력에 의한 피로하중과 동시에 해수에 의한 부식작용을 들 수 있다. 이와 같은 부식피로는 반복하중이나 잔류응력에 의한 기계적인 피로현상과 부식에 의한 금속의 용해가 복합되어 작용하기 때문에 복잡한 파괴기구이며(Y. Maeda, 2001), 피로 및 부식에 의한 각각의 손상을 단순 중첩시켜서 평가할 수 없으므로 부식환경 중에서 사용되는 구조물의 피로강도에 대한 신뢰성을 검토하기 위해서는 사용재료에 미치는 환경효과와 피로기준에 대한 검토가 요구된다.

최근에 선박 및 해양구조물 등의 중공업분야에서 용접성이 우수하여 점차 TMCP강의 사용량이 확대되고 있다(N. Yurioka, 1992)이다. 이러한 TMCP강은 80년대 들어서 제어압연에 가속 냉각 시스템을 강 제조에 도입하면서 합금원소의 양을 줄이고서도 기존의 강도를 유지할 뿐 아니라 높은 인성을 가지는 강을 제조할 수 있게 되었으며, 모재의 용접성 향상과 normalizing과 같은 열처리 공정을 생략 할 수 있는 등의 이점이 있다.

한편, 선박의 운항구간이나 해양구조물의 설치 장소에 따라 해양환경은 매우 다르다. 특히 부식피로를 유발하는 중요한 요소인 염분농도가 환경에 따라 다르다(한상복, 1998).

본 연구는 TMCP강의 모재 및 열영향부에 대한 대기중 및 부식환경중에서의 회전굽힘 피로시험을 실시하여 부식피로강도를 조사·검토하였다. 또한 염분농도 변화에 따른 부식환경변화에 대한 부식효과를 비교하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 소재 및 시험편

본 실험에 사용된 소재는 두께 20mm인 AH32 TMCP강으로 화학성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. Fig. 1에는 TMCP강의 금속현미경 조직사진을 나타낸 것이다.

피로시험편은 하중방향과 강판의 압연방향이 일치하도록 시험편을 가공하였으며, 중앙부의 모양은 모래시계형으로 하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2에 나타내었으며, HAZ부 시험편 가공을 위한 용접형상은 Fig. 3과 같다. 루트간격은 8 mm이며, 베벨 각도는 40°이다. HAZ부 시험편제작을 위한 용접조건은 아래의 Table 3에 나타내었다.

100% CO₂ 반자동용접을 하였으며, 용접와이어는 직경 1.2 φ인 AWS 기준 A.5.20 E71T-1 (Kobe DW-100)을 사용하여 총 7패스로 용접하였다.

Table 1 Chemical composition of base metal(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Nb	V
0.15	0.25	1.03	0.02	0.004	0.01	0.002

Table 2 Mechanical properties of base metal

Y.P.(MPa)	T.S.(MPa)	EL.(%)
396	532	28



Fig. 1 Microstructure of specimen (magnification ×50)

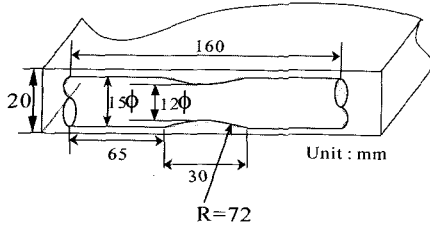


Fig. 2 Schematic diagram and dimension of fatigue test specimen

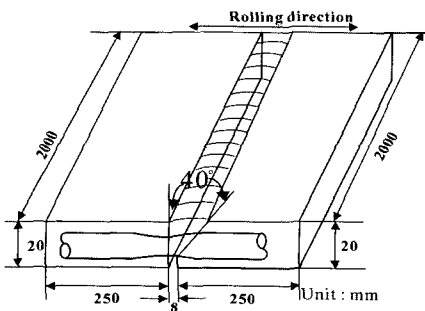


Fig. 3 Schematic diagram of weld panel

Table 3 Welding Parameters

Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
1	200	27	14	23
2	260	31	22	22
3	290	32	23	24
4	290	32	19	28
5	290	32	20	29
6	290	32	30	19
7	290	32	32	17

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에 사용한 실험장치는 오노식(Ono type) 회전굽힘 피로시험기이며, 피로시험기와 부식장치로 나누어진다. 피로시험기는 최대 굽힘모멘트 10 kgf·m이고 하중방식은 4점 굽힘 방식이다. 회전속도는 최저 10 rpm부터 최대 3400 rpm 범위 내에서 조절이 가능하도록 제어장치를 설치

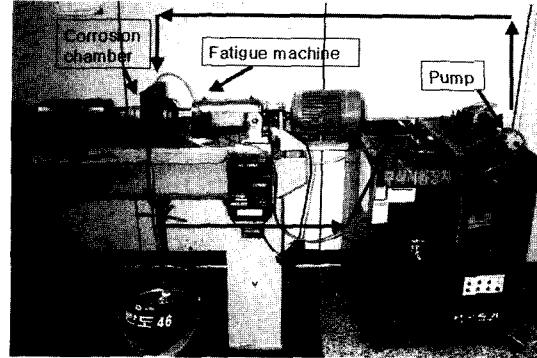


Fig. 4 Corrosion fatigue test equipment

하고 전자감응장치를 이용하여 회전수 측정이 가능하도록 하였다.

부식장치로는 부식수조와 항온수조가 있으며 온도 및 pH와 유량을 측정, 조절할 수 있게 만들어져 있다. 부식장치는 시험편에 대한 인위적인 부식의 영향을 배제하기 위하여 아크릴을 이용하여 부식조(corrosion chamber)를 만들어 시험편에 장착하였다. 또 부식실험을 하기 전에 시험편의 해수 중에 영향을 받는 자연부식전위를 일정하게 하기 위해서 부식피로시험 환경과 같은 조건의 부식환경에 72시간 부식시킨 후 부식피로시험을 실시하였다. Fig. 4는 피로시험장치와 부식장비 및 부식용액의 순환경로를 보여주고 있다.

한국근해 30년 평균 염분값을 고려하여, 증류수에 NaCl을 첨가하여 각각 1%, 3% 식염수용액을 만들고, 부식용액의 pH는 재료의 부식성이 좋은 영역인 6~7을 유지하였다. 반복속도는 대기중에서는 1800rpm 그리고 부식환경에서는 240rpm으로 설정하였으며, 응력비는 R=-1이다. 부식용액의 온도는 자동온도 조절장치와 가열장치를 사용하여 26±1℃로 유지시켰고, 유량조절 밸브를 이용하여 부식용액을 750 ml/min으로 공급하여 시험편이 부식용액에 잠기도록 하였다.

부식실험이 장시간 진행됨에 따라 일어나는 부식용액의 농도변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 주기적으로 부식용액을 교환하였으며, 용존 산소량은 DO Meter로 값을 측정하여 6.8~7.2 ppm을 유지하였다. 균열길이의 측정은 일정시간

시험한 후 먼봉을 이용하여 부식생성물을 제거한 뒤 회전축에 대하여 직각방향으로 균열 발생곡면을 따라 현미경으로 관찰하였다.

시험에 작용하는 응력은 아래식을 사용하여 계산하고 각 하중에서 파괴가 일어날 때까지의 사이클 수를 측정하여 S-N 선도를 구하였다.

$$\sigma = M/Z = 16Wb/\pi d^3$$

여기서, σ : 응력(MPa) W : 하중(N)
 b : 하중 작용점간의 거리(mm)
 d : 시험편 중앙부의 직경(mm)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 대기중 및 부식피로강도

Fig. 5 및 6은 각각 TMCP강의 모재 및 HAZ에 대한 피로시험편에 1%, 3%의 NaCl 부식용액과 대기중에서 작용하는 응력레벨을 변화시켜 회전굽힘 피로시험결과를 응력진폭(Sa)과 파단수명(N)사이의 관계로 나타낸 것이다. Fig. 7은 모재와 HAZ에 대한 피로시험결과를 종합하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 대기중 및 부식용액 중 두 경우 모두, HAZ부에 있어서의 피로강도가 모재의 피로강도보다 높음을 알 수 있다. 그리고, 대기중에 비하여 부식용액중에서는 모재 및 HAZ 모두 피로강도가 상당히 저하됨을 알 수 있다.

이러한 이유는 부식으로 인하여 균열발생이 용이하며, 발생한 균열은 균열선단이 열린 상태로 부식환경에 접하는 시간이 길어져 시험편의 피로강도를 약화시키기 때문이다. 특히 염분농도를 3%와 1%로 달리하여 실험을 한 결과, 모재와 HAZ부 모두에서 1%에서 부식피로 강도가 더욱 저하함을 알 수 있다.

대기중 및 염분농도의 변화에 대한 부식환경 중에서의 모재와 HAZ부 각각의 피로강도 선도에서 응력범위($\Delta S=2S_a$)와 파단까지의 반복수(N_f)사이의 관계를 $N_f=C(\Delta S)^m$ 로 나타내기 위해 최소제곱법에 의해 계수 m, C를 구한 결과는 Table 4와 같다.

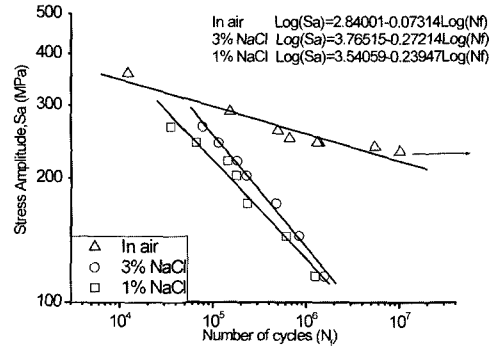


Fig. 5 Effect of the change of salinity on S-N Curve of base metal

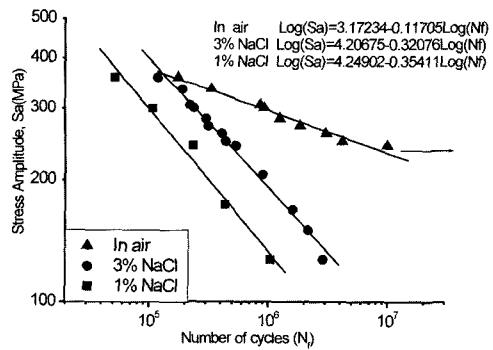


Fig. 6 Effect of the change of salinity on S-N Curve of HAZ

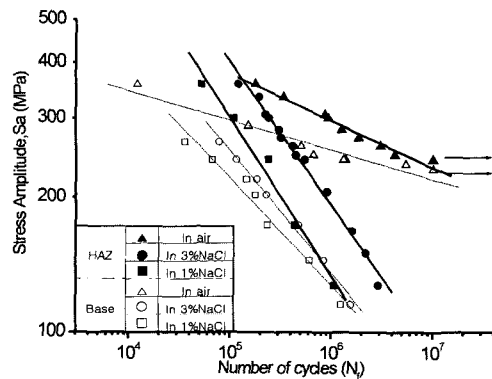


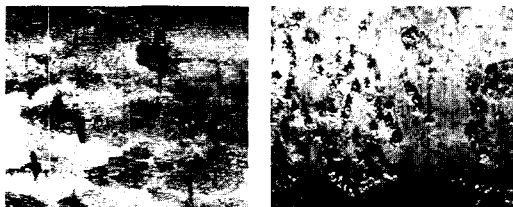
Fig. 7 Effect of the change of salinity on S-N Curve of TMCP steel

Table 4 Regression analysis

Condition		Regression analysis
		$N_f=C(\Delta S)^m$
HAZ	air	$N_f=7.12 \times 10^{26}(\Delta S)^{-9.2428}$
	3%	$N_f=1.08 \times 10^{13}(\Delta S)^{-3.0633}$
	1%	$N_f=7.34 \times 10^{11}(\Delta S)^{-2.7672}$
Base	air	$N_f=6.80 \times 10^{36}(\Delta S)^{-12.8482}$
	3%	$N_f=5.79 \times 10^{13}(\Delta S)^{-3.6427}$
	1%	$N_f=3.07 \times 10^{14}(\Delta S)^{-4.0451}$

3.2 부식피로에 의한 균열의 발생 및 성장 거동

Fig. 8은 1% NaCl 수용액에서의 부식피로 시험 중 작동을 잠시 멈춘 후에 표면에서 관찰된 부식 균열 성장거동을 나타낸 것이다.

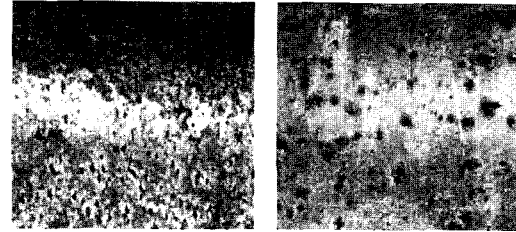


(a)cycles = 253,480 (b)cycles = 362,340

Fig. 8 Behavior of fatigue crack growth in 1% NaCl solution, Sa= 173MPa

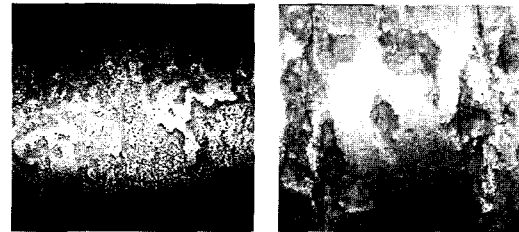
(a)에서는 부식환경의 영향으로 표면에 다양한 크기의 부식 피트가 생성된 것을 확인 할 수 있으며, (b)에서는 사이클이 증가함에 따라 발생한 부식 피트에서 균열이 발생, 성장함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 응력진폭(S_a)이 266 MPa일때의 부식에 의한 시험편 표면에서의 피트의 발생을 보여주고 있다. (a)의 1% NaCl 부식용액의 파단수명이 (b)의 3% NaCl 부식용액일 때의 약 45%이다. 이



(a)1%NaCl solution (b)3% NaCl solution
N_f=35,520 cycles N_f=77,280 cycles

Fig. 9 Behavior of corrosive surface pit at Sa = 266 MPa



(a)1%NaCl solution (b)3% NaCl solution
1,047,570cycles 1,038,040cycles
N_f=1,241,100cycles N_f=1,548,600cycles

Fig. 10 Behavior of corrosive surface pit at Sa = 115 MPa

러한 차이는 표면에서 발생한 피트의 수와 피트들에서 진행된 균열의 유무로 확인할 수 있다.

(a)의 1% NaCl 부식조건일 경우에 시험편 표면에 발생한 부식 피트의 수가 많이 관찰되며, 균열이 발생하고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 응력진폭(S_a)이 115 MPa일 때의 부식표면에 발생한 피트의 거동을 보여주고 있다. (a)의 1% NaCl 부식용액에서는 부식피트의 진행이 깊이 방향으로 많이 나타난 반면에, (b)의 3% NaCl 부식용액에서는 깊이가 일정하게 부식되는 일반부식(general corrosion)의 거동이 나타난 것으로 보인다. 깊이방향으로 피트의 진행이 높은 (a)에서 보다 높은 응력집중과 단면적 감소효과가 크게 되어서 (b)보다 파단수명이 짧아진 것으로



Fig. 11 Behavior of fatigue crack in 1% NaCl solution, Sa=266MPa



Fig. 12 Behavior of fatigue crack in 1% NaCl solution, Sa=115MPa

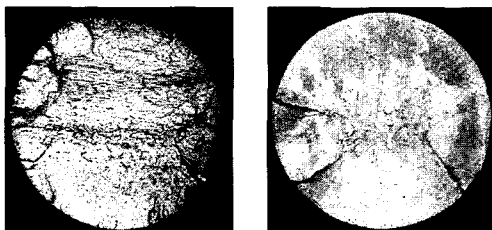
보인다.

Fig. 11, 12는 1%의 염분농도 하에서 응력레벨에 따른 균열성장의 차이를 비교하기 위하여 파단 직전의 균열을 시험편의 원주방향으로 70배 확대경을 사용하여 관찰한 것을 연결한 것이다.

고응력 레벨에서는 하나의 주균열이 발생, 성장하여 파단에 기여하는 것을 볼 수 있다. 저응력 레벨에서는 시험편의 표면에 부식의 영향으로 여러 군데의 부식 피트에서 발생한 균열들이 합체를 이루는 것을 볼 수 있다.

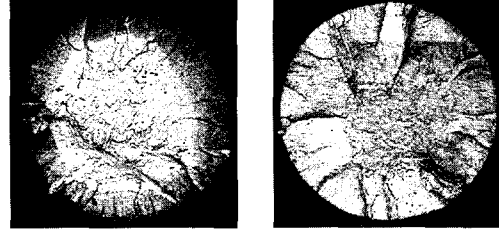
3.3 파단면 관찰

Fig. 13, 14는 고응력때와 저응력일때의 염분변화(1%, 3%)에 따라 파단면을 25배율 확대경으로 관찰한 사진이며, 저응력으로 갈수록 표면에서 중심방향으로의 균열이 응력의 영향보다는 부식환경의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.



1% NaCl, $N_f=35,520$ 3% NaCl, $N_f=77,280$

Fig. 13 Macroscopic of fatigue fracture at base metal, Sa = 266MPa



1%NaCl, $N_f=1,241,100$ 3%NaCl, $N_f=1,548,600$

Fig. 14 Macroscopic of fatigue fracture at base metal, Sa = 115MPa

3. 결론

TMCP강의 모재와 열영향부에 대한 대기중 및 염분농도를 각각 1%와 3% 변화시킨 부식환경 중에서의 회전굽힘 피로시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 모재의 피로강도에 비하여 HAZ부의 피로강도가, 대기중 및 부식용액중의 경우 모두에 대하여, 높음을 알 수 있다. 그리고, 대기중에 비하여 부식용액중에서는 모재 및 HAZ 모두 피로강도가 상당히 저하됨을 알 수 있다. 그리고, 염분농도가 낮을수록 피로수명 감소율이 높았으며, 이는 염분농도에 따른 부식발생의 양상이 다르기 때문이다.

(2) 부식환경하에서 균열성장거동은 고응력 레벨과는 달리 저응력 레벨인 경우에 여러 곳에서 생긴 피트들이 균열원이 되어 각각 주균열로 성장하여 합쳐지는 현상에 의해 최종파단에 이른 것을 볼 수 있으며, 이는 부식환경에 장시간 노출되었기 때문이다.

후 기

본 연구는 부산대학교 기성회재원 학술연구 조성비에 의한 연구임.

참 고 문 헌

- 한운식, 1993, “대형 구조물의 파괴강도 특성 평가 기술에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제30권 제4호, pp. 102-111
- 백정기, 박영일, 1998, “유조선 증강도 부재의 확률론적 부식속도 예측모델의 개발”, 대한조선학회 논문집, 제35권 제2호, pp. 83-93
- 강성원, 이승윤, 2000, “CO₂ 용접이음재의 대기 및 해수중에서의 회전굽힘 피로강도에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, 제37권 제2호, pp. 118-126
- 한상복, 강영실, 정희동 외 6명, 1998, “한국 근해 30년 평균 수온 염분 용존산소 수평분포도”, 국립수산진흥원, pp. 1-9, 141-154
- Y. Maeda, A. Ohta, N. Suzuki, 2001 “Fatigue Properties in Synthetic Sea Water by $\sigma_{max}=\sigma_y$ Testing Method”, Quar. J. JWS, Vol. 19, No. 2, pp. 360-364
- N. Yurioka, 1992, “Welding of TMCP Steels”, JWS, Vol. 61, No. 4, pp. 50-66



< 강 성 원 >



< 김 철 현 >



< 이 해 우 >