

용접이음재의 부식피로강도에 관한 연구

A Study on the Corrosion Fatigue Strength of Welded joint

강성원* 이승윤**

*부산대학교 **부산대학교 대학원

1. 서 론

일반적으로 해양구조물이나 선체의 파손은 해수중에서 반복되는 파랑외력과 동시에 일어나는 부식 작용이 원인이 된다. 이 부식피로는 반복하중이나 반복변형에 의한 기계적인 피로현상과 부식에 의한 금속의 용해가 복합되어 작용하기 때문에 대단히 복잡한 파괴기구이며 피로 및 부식에 의한 각각의 손상을 단순 중첩시킨 것보다 훨씬 크고 빠르기 때문에 해양구조물이나 선박에 사용되는 재료에 대한 부식피로의 연구는 매우 중요하다. TMCP 강은 최근에는 조선, 육상 및 해양구조물 등의 중공업분야에서 사용량이 크게 증가되고 있다. 이 TMCP 강을 보다 효율적으로 확대 적용하기 위해서는 TMCP 강재의 특성, 용접성 및 용접부의 안정성과 부식성에 관한 정량적인 평가가 필요하다. TMCP 강재에 대한 부식피로에 관한 연구로서 TMCP 강재에 대한 크랙진전속도, 두께 방향으로의 크랙진전, 응극 전압하에서의 속도, 염분 변화에 의한 크랙의 발생 및 성장, 용접부 표면균열의 피로균열 전파 등이 있으나 TMCP 강재로 제작된 용접이음재의 대기 및 부식중의 피로강도 평가에 대한 자료는 많지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 현재 선박 및 해양구조물의 건조에 많이 채용되고 있는 TMCP 강재의 CO₂ 가스 용접이음재의 열영향부에 대한 대기중 및 부식환경중에서의 회전굽힘피로시험을 실시하여 피로균열의 발생 및 파단특성을 조사 검토하고자 한다. 또한 대기중의 피로강도와 부식환경중의 피로강도를 비교함으로써 부식효과 및 응력집중효과 등을 고려한 용접이음재의 부식환경중의 피로강도 설계곡선을 검토한다.

2. 시험편 제작 및 실험방법

1) 시험편

본 연구에 사용한 강재는 AH32 TMCP 강으로, 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 용접이음재의 형상 및 노치의 위치는 Fig. 1와 같으며 용접조건은 Table 2와 같다. 용접이음재에서 하중방향과 롤링방향이 일치하도록 시험편을 가공하였으며 평행부의 모양은 모래시계형으로 열영향부가 시험편의 중심에 위치하게 하여 피로파괴 발생 영역을 열영향부로 국한하였다. 그리고 응력집중계수를 변화시키기 위해 Peterson의 응력집중계수식을 참고로 시험편의 열영향부에 횡공노치를 방전가공하여 $K_t=1.72$ 과 $K_t=2.43$ 이 되게 하였다. 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2와 같다.

2) 실험장치 및 방법

본 실험장치는 피로시험기와 부식장치로 나누어지며 시험편에 부식환경을 만들어 주기 위해 아크릴로 부식조(corrosion chamber)를 만들어 시험편에 장착하였다. Fig. 3은 부식피로시험장치의 계통도이다. 부식액은 NaCl을 첨가하여 3.0%식염수용액을 만들고, 부식액의 pH는 6을 유지하였다. 반복속도는 대기중에서 1800rpm 그리고 부식분위기에서 240rpm으로 설정하였다. 수용액의 온도는 자동온도조절장치와 가열장치를 사용하여 $26\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지시켰고, 유량조절밸브를 이용해 부식용액을 750ml/min으로 공급하였다. 부식실험이 장시간 진행됨에 따라 일어나는 부식용액의 농도변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 주기적으로 부식액을 교환하였으며, 용존산소량은 6.5~7.0 ppm을 유지하였다. 크랙길이의 측정은 일정시간 시험한 후 면봉을 이용하여 부식생성물을 제거한 뒤 축에 대하여 직각방향으로 크랙 발생곡면을 따라 현미경으로 관찰하였다. 파단면 관찰시에는 부식생성물을 제거한 후 주사식 전자 현미경으로 관찰하였다. 또 부식실험을 하기 전에 시험편의 해수 중

에 영향을 받는 자연부식전위를 일정하게 하기 위해서 부식피로시험 환경과 같은 조건의 부식환경에 72시간 부식시킨 후 부식피로시험 실시했다.

3. 실험결과 및 고찰

1) 응력집중계수의 변화에 따른 대기중 피로와 부식피로 강도

Fig. 4는 대기중에서와 3% NaCl 수용액 중에서의 피로시험편의 노치형상에 따른 응력집중계수 ($K_t=1.0$, $K_t=1.72$, $K_t=2.43$) 및 작용 응력레벨을 변화시켜 회전굽힘피로 시험한 피로강도 곡선 (S-N curve)을 나타낸 것이다. 대기중에서의 시험편의 피로한도는 응력집중계수가 $K_t=1$ 일 때 242.8MPa, $K_t=1.72$ 에서는 152MPa, $K_t=2.43$ 에서는 122.5MPa이다.

응력집중계수의 증가에 따른 대기중 및 부식피로 수명을 비교했을 때 응력집중계수가 증가할수록 기울기의 차가 더욱 적은 것을 알 수 있다.

평활재 및 노치재에 대한 S-N 선도를 이용하여 실험응력(S)과 반복수(N)의 관계를 바스킨 식

$S N_f^m = C$ 를 이용해 최소자승법으로 계수 m , C 를 구하였으며 결과는 Table 3와 같다.

여기서 S : 파괴응력(MPa), N_f : 파괴가 일어날때의 사이클 수, m , C : 상수이다.

2) 부식피로에 있어서의 균열과정과 크랙전파 거동

Fig. 5,6,7은 3% NaCl 수용액에서의 부식피로 시험 중 표면에서 관찰된 부식양상을 나타낸 것이다. pit에서 크랙이 발생, 전진 및 합쳐하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8, 9은 3% NaCl에서 노치재의 크랙발생과 성장거동을 나타낸 것이다. 노치를 준 시험편에서는 부식피로 크랙은 초기의 부식환경의 영향보다는 기계적인 피로 작용으로 노치를 준 응력집중부 표면에서 주크랙이 발생, 전진하는 중에 부식피트가 발생, 이것이 응력집중원으로 작용하여 크랙이 발생하고 국부적으로 주크랙과 상호 작용하여 합쳐되는 현상으로 크랙전진거동을 볼 수 있다.

3) 피로크랙의 전파 거동

본 시험에서는 회전굽힘 피로시험에 있어서 응력확대계수(ΔK)와의 관계식은 Tokaji에 의해 보고되어진 $\Delta K = \Delta S \sqrt{\pi a}$ 를 사용하였다. Tokaji은 부하응력이 항복강도와 비교하여 작을 경우 회전굽힘 부하상태하의 피로크랙 전파특성은 뒤 식에 의해 평가될 수 있다고 보고하였다. 대기중에서와 3% NaCl 수용액중에서 피로균열의 전진속도를 비교해 보기 위해 노치를 준 시험편의 시험한 결과로 피로크랙 전파속도(da/dN)와 응력확대계수 범위(ΔK)와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 3% NaCl 수용액중에서 피로균열 전진속도는 공기중에서 보다 높은 것을 알 수 있다.

Paris 영역에서의 대기중과 부식중의 피로균열 성장속도는 다음과 같았다.

$$3\% \text{ NaCl } da/dN = (3.39 \times 10^{-18}) (\Delta K)^{1.54} (\text{mm/cycle})$$

$$\text{in air } da/dN = (2.99 \times 10^{-18}) (\Delta K)^{1.44} (\text{mm/cycle})$$

4) 파단면 관찰

Fig. 11,12,13,14는 부식 시험재의 저응력일 때와 고응력일 때의 변화에 따라 파단면을 저배율로 주사식 현미경으로 관찰한 사진이다.

표면부에서 내부로 파괴방향과 평행한 굽은 선들은 서로 다른 면에서 발생한 균열을 구분할 수 있다. 이러한 발생은 이웃한 균열원이 만나는 단면을 나타내는 것이며 저응력에 의한 파단 내부에서 더욱 깊게 관찰이 된다. 이러한 파면형상은 응력의 영향보다는 부식의 영향으로 인한 것으로 보이며 저응력 일수록 계단형 파면이 많이 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

TMCP 강의 열영향부에 대한 대기중 피로와 3% NaCl 부식피로에 대한 응력집중계수를 변화시켜 회전굽힘 피로시험기로 시험한 결과는 다음과 같다.

1) 응력집중계수가 클수록 피로수명은 대기중과 부식환경중 모두다 감소하였으며 평활재의 대기중 및

부식중에서의 피로수명을 비교했을 때 가장 큰 피로수명의 감소를 가져왔으며 응력집중계수가 클수록 피로수명은 적은 감소율을 나타냈다.

- 2) 부식환경하에서의 노치 시험편은 초기에 부식환경의 영향보다는 기계적인 피로작용으로 주크랙이 노치에서 발생하며 주크랙이 성장하는 중에 pit에 의해 발생한 크랙과 상호작용하여 연결되는 크랙진전거동을 나타내었다.
- 3) 대기중 및 부식환경하에서의 크랙진전속도를 비교했을 때 부식환경일 때가 더욱 빨랐다.
- 4) 시험재의 파단면은 저응력 일수록 부식에 의한 영향으로 파면이 거칠고 균열 발생원이 만나는 단면을 나타내는 곳이 많다.

Table 1 Chemical composition and Mechanical properties

Base metal	Thick (mm)	Chemical composition(%)					Mechanical properties		
		C	Si	Mn	P	S	Y.P(Kg/mm ²)	T.S(Kg/mm ²)	EL(%)
AH32 TMCP	20	0.147	0.246	1.030	0.020	0.004	40.4	54.3	20.0

Table 2 Welding conditions

Base metal	Welding wire		Gas	Current(A)	Voltage(V)	Welding speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
	Brand	Dia					
AH32 TMCP	DW-100	1.2 ϕ	100% CO ₂	272	31	22	23

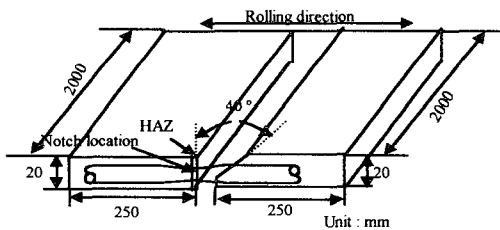


Fig.1 Shape of welding grooves and notch location of welded joint

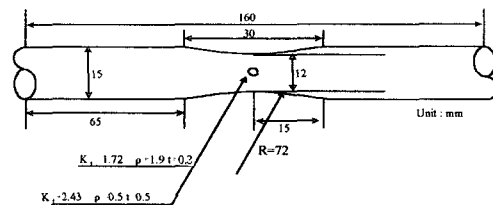


Fig.2 Shape and dimension of specimen

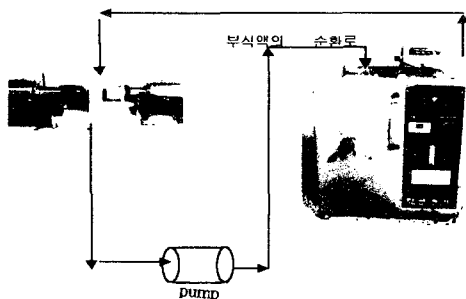


Fig. 3 Schematic configuration of Corrosion - Fatigue system

Table 3 equation for in air and 3% NaCl

in air	$K_t=1.0$	$S=33.9(N_f)^{-0.091}$
	$K_t=1.72$	$S=3467.4(N_f)^{-0.104}$
	$K_t=2.43$	$S=5128.6(N_f)^{-0.133}$
in 3% NaCl	$K_t=1.0$	$S=5011.9(N_f)^{-0.123}$
	$K_t=1.72$	$S=7943.3(N_f)^{-0.104}$
	$K_t=2.43$	$S=26915.3(N_f)^{-0.114}$

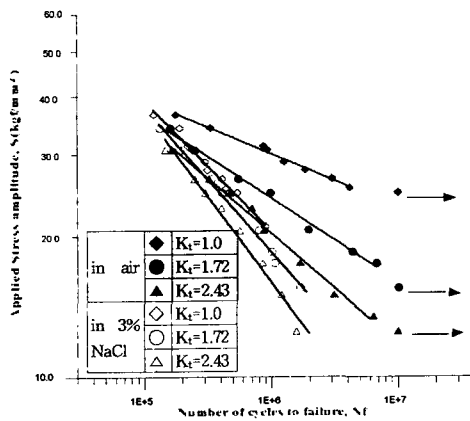


Fig. 4 S-N curves for TMCP steel in air and in 3% NaCl solution

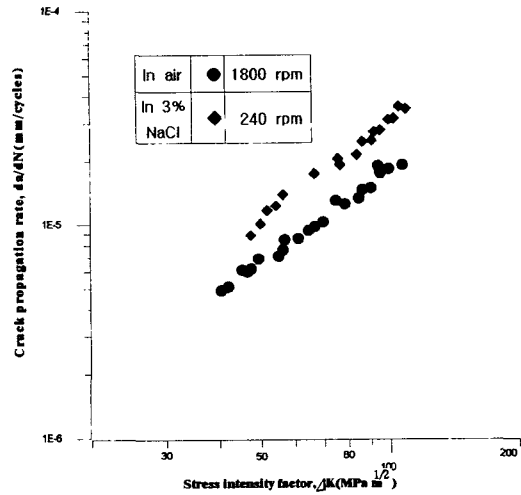


Fig. 10 The relation of crack growth rate and stress intensity factor



Fig.5 $K_t=1.0$ $S=21$ cycles= 679,510



Fig.6 $K_t=1.0$ $S=26.56$ cycles= 365,490

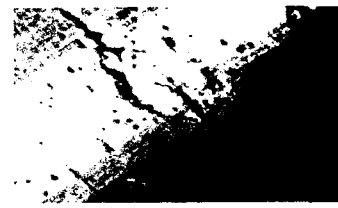


Fig.7 $K_t=1.0$ $S=28.91$ cycles= 239,570



Fig.8 $K_t=2.43$ $S=20.6$ cycles= 299,570



Fig.9 $K=1.72$ $S=15.5$ cycles=1,496,540



Fig. 11 $K_t=1.0$ $S=24.78$
 $N_f=537,300$



Fig. 12 $K_t=2.43$ $S=17.5$
 $N_f=857,280$



Fig. 13 $K=1.72$ $S=34.22$
 $N_f=192,930$



Fig. 14 $K_t=1.0$ $S=30.68$
 $N_f=191,350$