

CO₂ 용접이음재의 대기 및 해수중에서의 회전굽힘 피로강도에 관한 연구

강성원*, 이승윤**

A Study on Rotary Bending Fatigue Strength of the CO₂ Gas Welded Joint in Air and Sea Water

by

S.W. Kang* and S.Y. Lee**

요 약

용접이음재에서는 용착금속, 열영향부 및 모재가 열사이클 및 조직의 변화에 의하여 각종 기계적 성질의 차이가 있으며, 특히 부식환경에서는 이들의 영향이 현저하게 나타나는 경우가 많다. 또 용접이음재의 피로강도는 이음형식, 용접금속 및 열영향부의 특성, 사용환경과 응력의 종류에 따라 변화한다. 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 성장거동을 조사·검토하였다. 또한 대기중의 피로강도와 부식환경중의 피로강도를 비교함으로써 부식효과 및 응력집중효과 등을 고려한 용접이음재의 부식환경중에서의 피로강도 평가법 및 피로강도 설계곡선을 검토하였다.

Abstract

TMCP steel has been widely used to construct ships and offshore structures. When it comes to ship and offshore structures, corrosion fatigue damages caused by sea water and fatigue occurred by wave-induced forces usually go on occurring simultaneously. So the fatigue life in corrosion environment is decreased markedly in comparison with that in air. The fatigue crack in corrosion easily initiates on welded joints of structure like as the fatigue crack in air. Therefore it is very

접수일자 : 1999년 10월 15일, 재접수일자 : 2000년 3월 30일

* 정회원, 부산대학교 공과대학 조선해양공학과, 생산기술연구소 연구원

** 비회원, (주) 세아 ESAB 근무 (연구당시 부산대학교 대학원 조선해양공학과 석사과정)

important to study the fatigue properties of those of their welded joints as well as steel plates.

In this study, rotary bending fatigue tests have been performed to investigate fatigue crack initiation and behavior of fatigue crack growth on CO₂ gas weld HAZ of TMCP steel. The fatigue test used the specimens with various stress concentration factors in air and 3% NaCl solution

1. 서론

최근 대형구조물은 사용 조건이 더욱 가혹해지고 있을 뿐만 아니라 경량화 요구가 점점 증가하고 있어 이들의 안전은 이전보다도 더 한층 강조되고 있다[1]. 그러나 현재 선박 및 해양구조물의 구조강도설계는 선급협회의 규칙이나 AWS 규격 등에 근거하여 행해지고 있지만, 이들의 규격들은 피로강도에 주의할 것을 이야기하면서도 피로설계법에 대해서는 추상적이거나 개략적으로 기술하는 것이 많다[2]. 특히 이들 규격은 비교적 오래전에 제정되었고 최근에 용접재료 개발과 용접법의 개선 효과를 충분히 고려되었다고 할 수 없다. 용접이음재에서는 용착금속, 열영향부 및 모재가 열사이클 및 조직의 변화에 의하여 각종 기계적 성질이 차이가 있으며, 특히 부식환경에서는 이들의 영향이 현저하게 나타나는 경우가 많다. 일반적으로 선박이나 해양구조물의 파손은 반복되는 파랑외력에 의한 피로하중과 동시에 해수에 의한 부식작용이 원인이 된다. 이와같은 부식피로는 반복하중이나 반복변형에 의한 기계적인 피로현상과 부식에 의한 금속의 용해가 복합되어 작용하기 때문에 복잡한 파괴기구이며, 피로 및 부식에 의한 각각의 손상을 단순 중첩시켜서 평가할 수 없기 때문에 부식환경중에서 사용되는 구조물의 피로강도에 대한 신뢰성을 검토하기 위해서는 사용재료에 미치는 환경효과와 피로기준에 대한 검토가 요구된다.

선체의 부식과 관련된 연구로는 부식에 의한 선체구조부재의 판두께 감소효과를 고려한 신뢰성평가 기법[3]과 유조선 구조의 중강도부재를 대상으로 확률적 부식예측모델의 개발[4] 등에 관한 연

구결과들이 있지만 선체에 사용되는 강재의 부식피로에 대한 연구는 부족한 실정이기에 이에 대한 연구가 더욱 필요하다.

최근에 선박 및 해양구조물등의 중공업분야에서 용접성이 우수하여 점차 그 사용량이 확대 추세에 있는 것이 TMCP 강이다. 이러한 TMCP 강은 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 생략 등의 잇점이 있다[5]. 한편, 용접구조물에 발생하는 부식피로균열은 공기중의 피로균열처럼 용접부에서 발생하기 쉬우며, 이는 용접부의 조직 불균일성이나 응력집중부의 존재 또는 잔류응력등이 균열발생을 용이하게 하기 때문이다. 따라서 용접열영향부의 부식환경중의 피로강도 특성을 정량적으로 평가할 필요가 있다.

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 성장거동을 조사·검토하였다. 또한 대기중의 피로강도와 부식환경중의 피로강도를 비교함으로써 부식효과 및 응력집중효과 등을 고려한 용접이음재의 부식환경중에서의 피로강도 평가법 및 피로강도 설계곡선을 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 용접이음재 제작

연구에 사용한 강재는 두께 20mm인 AH32 TMCP 강으로, 그 화학적 성분과 기계적 성질은

Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition and Mechanical properties

Base metal	Thick (mm)	Chemical composition(%)				
		C	Si	Mn	P	S
AH32 TMCP	20	0.147	0.246	1.030	0.020	0.004
Mechanical properties						
Y.P.(MPa)		T.S.(MPa)		EL.(%)		
395.9		532.1		20.0		

용접이음재의 베벨각과 홈형상, 홈간격, 시험재의 치수는 Fig.1과 같으며, 100% CO₂ 수동용접으로 다층용접을 실시하였으며, 용접조건은 Table 2와 같다.

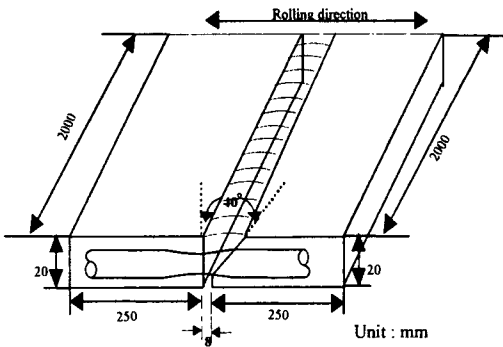


Fig.1 Shape of welded joint

Table 2 Welding conditions

Base metal	Welding wire Dia.	Gas	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)
AH32 TMCP	1.2Ø	100% CO ₂	272	31	22	23

2.2 피로시험편

용접이음재에서 하중방향과 롤링방향이 일치하도록 시험편을 가공하였으며, 평행부의 모양은 모래시계형으로 열영향부가 시험편의 중심에 위치하게 하여 피로파괴 발생영역을 열영향부로 국한하였다. 그리고 응력집중계수를 변화시키기 위해 Peterson[6]의 응력집중계수식을 참고로 시험편의 열영향부에 황공노치를 방전가공하여 $K_t=1.72$ 와 $K_t=2.43$ 이 되게 하였다. 시험편의 형상 및 치수와 노치의 위치는 Fig.2와 같다.

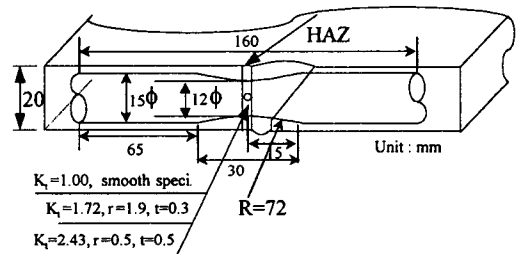


Fig.2 Shape and dimension of specimen and notch location

2.3 실험장치 및 방법

본 연구에 채용한 실험장치는 피로시험기와 부식장치로 나누어지며 피로시험기는 최대 굽힘모멘트 10kgf·m이고 하중방식은 4점 굽힘 방식이다. 회전속도는 최저 10rpm부터 최대 3400rpm 범위내에서 조절이 가능하도록 제어장치를 설치하고 전자감응장치를 이용하여 회전수를 측정하도록 한 오노식 회전굽힘시험기이다.

부식장치로는 부식수조와 항온수조가 있으며 온도 및 pH와 유량을 측정, 조절할 수 있게 만들어져 있다.

시험편에 대한 부식장치는 아크릴로 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 실시했다

[7]. Fig.3은 부식피로시험장치와 부식액의 순환로를 나타내었다.

부식액은 증류수에 NaCl을 첨가하여 3% 식염 수용액을 만들고, 부식액의 pH는 재료의 부식성이 좋은 영역인 6을 유지하였다. 반복속도는 대기중에서 1800rpm 그리고 부식환경에서 240rpm으로 설정하였으며, 응력비는 R=-1이다. 수용액의 온도는 자동온도 조절장치와 가열장치를 사용하여 26±1℃로 유지시켰고, 유량조절 밸브를 이용해 부식용액을 750ml/min으로 공급하여 시험편이 부식액에 잠기게 하였다. 부식실험이 장시간 진행됨에 따라 일어나는 부식용액의 농도변화에 따른 영향을 최소화하기 위하여 주기적으로 부식액을 교환하였으며, 용존산소량은 DO Meter로 값을 측정하여 6.8~7.2 ppm을 유지하였다. 균열길이의 측정은 일정시간 시험한 후 면봉을 이용하여 부식생성물을 제거한 뒤 측에 대하여 직각방향으로 균열 발생곡면을 따라 현미경으로 관찰하였다.

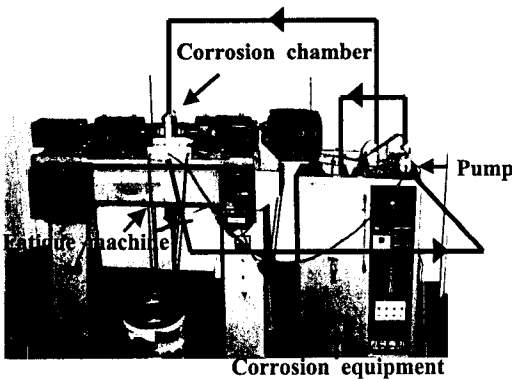


Fig.3 Schematic configuration of corrosion - fatigue test system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 대기중 및 부식피로 강도

Fig.4는 대기중에서와 3% NaCl 수용액 중에서의 피로시험편의 노치형상에 따른 응력집중계수 ($K_t=1.00, 1.72, 2.43$) 및 작용응력레벨을 변

화시켜 회전굽힘 피로시험결과를 응력진폭(S_a)과 파단수명(N_f) 사이의 관계로 나타낸 것이다. 여기서, 응력진폭(S_a)의 계산값은 시험편 평행부 표면의 중심부에서 작용하는 굽힘응력의 값이다. 대기중에서의 시험편의 피로한도는 응력집중계수(K_t)가 각각 1.00, 1.72 및 2.43 일 때 $S_a=242.8, 151.9, 122.5$ MPa이다.

부식환경에서의 피로강도는 공기중에서의 피로한도 이하의 응력레벨인 $S_a=104.7$ MPa까지 낮추어 실험했지만 피로한도가 나타나지 않았으며, 다른 연구결과[8]와 같은 결과를 보여주고 있다.

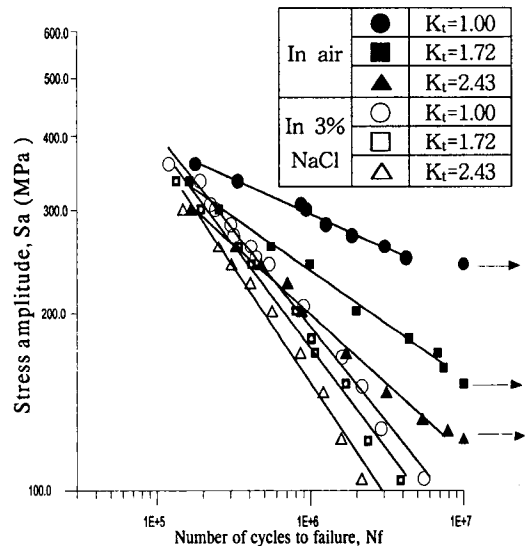


Fig.4 S-N curves on HAZ of TMCP steel in air and 3% NaCl solution

이러한 이유는 부식으로 인하여 균열발생이 용이하며 발생한 균열은 균열선단이 열린 상태로 부식 환경에 접하는 시간이 길어져 시험편의 피로강도를 약화시키기 때문이다.

Table 3은 대기중에서와 부식환경중에서의 응력집중계수 변화에 따른 피로수명 감소 정도를 비교해 보기 위해 나타낸 것이다. 여기서 N_{fa} 는 대기중에서의 파단수명이며, N_{fs} 는 부식환경중에서의 파단수명을 나타낸다. 응력집중계수가 클수록 피로수명 감소율이 적은 것을 확인할 수 있으며,

$S_a=300.7\text{MPa}$ 일 때 보다도 $S_a=260.3\text{MPa}$ 일 때 피로수명 감소율이 더 큰 것은 부식환경에 접하는 시간이 길수록 피로수명이 더욱 더 감소하는 것을 알 수 있다.

대기중에서와 부식환경중에서의 평활재와 노치재에 대한 각각의 피로강도 곡선은 응력진폭(S_a)와 파단까지의 반복수(N_f) 사이의 관계를 바스킨식 $S_a N_f^m = C$ 로 나타내기 위해 최소제곱법(9)에 의해 계수 m , C 를 구한 결과는 Table 4와 같다. 또, Table 4에서 바스킨 식과 실험치 사이의 상관관계를 비교하기 위해 상관분석에 의한 표본상

Table 3 Fatigue life rate in air and 3% NaCl

$S_a(\text{MPa})$	S. C. F. K_t	N_{fs}/N_{fa} (%)
260.3	$K_t=1.00$	24
	$K_t=1.72$	61
	$K_t=2.43$	77
300.7	$K_t=1.00$	36
	$K_t=1.72$	76
	$K_t=2.43$	89

Table 4 Regression analysis equations and correlation coefficients in air and 3% NaCl

	S.C.F. K_t	Regression analysis equation	Correlation coefficient
		$S_a=C(N_f)^m$	$ \gamma $
In air	1.00	$S_a=151(N_f)^{-0.117}$	0.981
	1.72	$S_a=294(N_f)^{-0.181}$	0.971
	2.43	$S_a=518(N_f)^{-0.237}$	0.973
In 3% NaCl	1.00	$S_a=1320(N_f)^{-0.304}$	0.958
	1.72	$S_a=2111(N_f)^{-0.350}$	0.949
	2.43	$S_a=3593(N_f)^{-0.394}$	0.952

관계수(10)를 나타내었다.

3.2 부식피로에 있어서의 피로균열 발생 및 성장거동

Fig. 5는 평활재($K_t=1.0$)의 3% NaCl 수용액에서의 부식피로 시험 중 표면에서 관찰된 부식균열 성장거동을 나타낸 것으로 (a)그림에서 부식환경의 영향으로 시험편에 피트 a_1 이 생겼으며 어느 한 개의 피트에서 균열이 발생·성장하는 사이에 (b)그림에서 b_1 , c_1 인 또 다른 피트가 발생한 것을 확인할 수 있었다. (c)그림에서는 a_1 , b_1 균열이 서로 합체되고 균열이 연결된 것을 볼 수 있으며, (d)그림에서 a_1 , b_1 , c_1 인 균열이 전부 연결되어 주크랙으로 성장하는 것을 확인할 수 있으며, 옆에 또 다른 d_1 크랙이 성장하고 있음을 볼 수 있다.

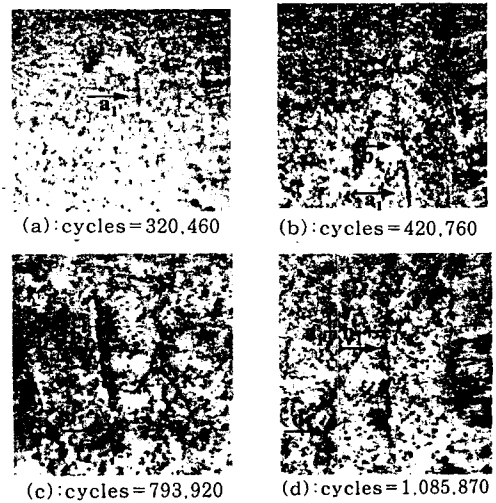


Fig.5 Behavior of fatigue crack growth in 3% NaCl solution ($K_t=1.00$, $S_a=168.6\text{MPa}$)

Fig.6은 3% NaCl 부식환경중에서의 노치재($K_t=2.43$)의 균열발생과 성장거동을 나타낸 것이다. 노치를 준 시험편에서는 부식피로 균열은 (a)그림에서 초기의 부식환경의 영향보다는 노치를 준 응력집중부 표면인 a_1 에서 주균열이 발생, 성장하는 중에 (b)그림에서 b_1 에 있는 부식피트에서 응력집중원으로 작용한 균열이 발생, 성장하여

주균열 a₁과 상호작용하여 합체되는 균열 성장거동을 나타냈다.

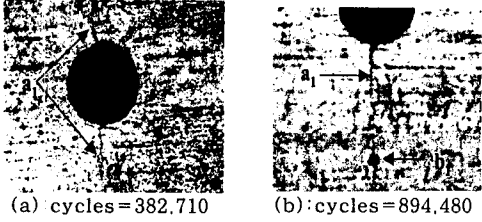


Fig.6 Behavior of fatigue crack growth in 3% NaCl solution ($K_I=2.43, S_a=122.5MPa$)

평활재과 노치재의 피로균열의 발생 및 성장거동을 비교했을 때 평활재는 여러곳에서 주균열로 성장할 수 있는 균열이 발생하는데 비해, 노치재는 응력집중부 표면에서 주균열이 발생, 성장하여 피트에서 생긴 균열과 합체 되는 균열거동을 보였다.

Fig.7, 8은 평활재와 노치재의 균열성장의 차이를 비교하기 위해 파단직전의 균열을 관찰한 시험편 표면의 형상이다. Fig.7은 평활재 시험편의 피로균열들을 시험편 중앙부의 폭 2mm 부분을 원주방향으로 (a), (b), (c)로 삼등분하여 3면에서 관찰된 균열의 거동을 나타낸 것으로서 (a)면에서는 한곳에서 생긴 균열이 계속 전파하고 있으며 (b), (c)면에서는 각각 다른 세 곳에서 발생한 균열들이 합체를 이루는 것을 볼 수 있다. 즉 평활재에서는 파단에 직접 기여하는 균열이 원주표면에 총 7곳에서 성장한 것을 확인할 수 있다. Fig.8은 노치재의 노치측(a), (c)와 반대측(b)를 나타낸 것으로서 (a), (c)에서 보는바와 같이 노치에서 발생한 균열은 파단 직전까지 성장하고 있으며, 노치의 뒷면(b)에서 발생한 균열들이 합체가 되는 것은 관찰되지 않았다.

3.3 피로균열의 전파특성

Fig.9, 10은 대기중에서와 3% NaCl 수용액 중에서의 피로균열전파길이와 반복회수의 관계를 알아보기 위해 각기 다른 응력진폭($S_a=300.7, 201.9MPa$)과 응력집중계수($K_I=1.72, 2.43$)

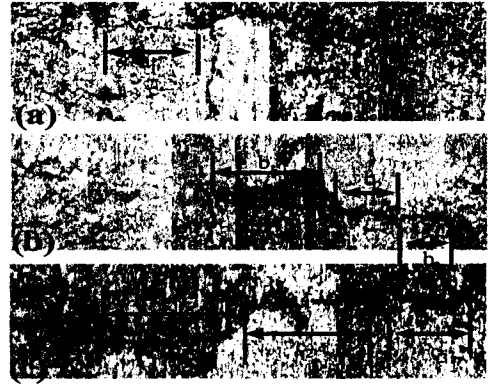


Fig.7 Behavior of fatigue crack on smooth specimen in 3% NaCl solution ($K_I=1.00, S_a=144.8MPa$)



Fig.8 Behavior of fatigue crack on notch specimen in 3% NaCl solution ($K_I=1.72, S_a=144.8MPa$)

에서 서로 비교해 본 것이다. 균열길이 측정시 노치 주변에서 생긴 주균열 길이를 기준으로 하여 측정하였으며, 주균열과 합체되지 않은 피트에서 생긴 균열은 측정길이에 포함되지 않았다.

Fig. 9, 10에서 균열성장의 초기단계는 공기중과 부식환경중 모두 피로균열의 성장의 차이가 크지 않다. 이것은 부식피로 균열이 초기에는 부식환경의 영향보다는 역학적인 요인이 더 큰 영향을 미치기 때문이라고 생각된다. 그러나 반복수가 증가함에 따라 부식환경의 영향이 크게 되어 공기중에서 보다 부식환경중에서 더욱 빠른 균열성장

을 보인다. 이 시기의 부식환경중에서는 피트에서 발생·성장한 균열과 합체되면서, 불연속적으로 성장하게 되어 공기중에서보다 진전속도가 빠르게 된다.

또한 공기중에서와 부식환경중에서의 균열 전파 특성을 비교해보면 작용응력과 응력집중계수가 낮을수록 부식환경의 영향이 큼을 알 수 있다.

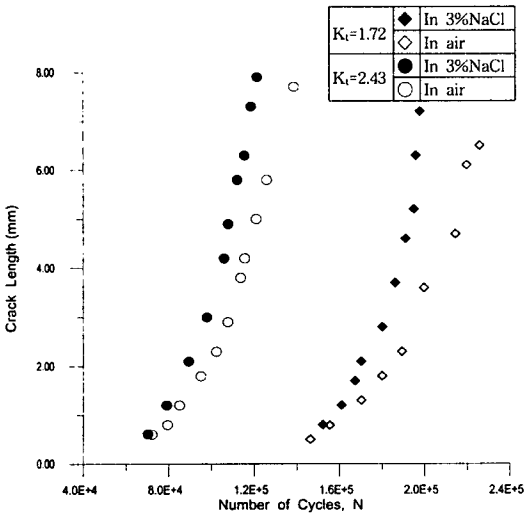


Fig.9 Crack length vs. number of cycles ($S_a=300.7\text{MPa}$)

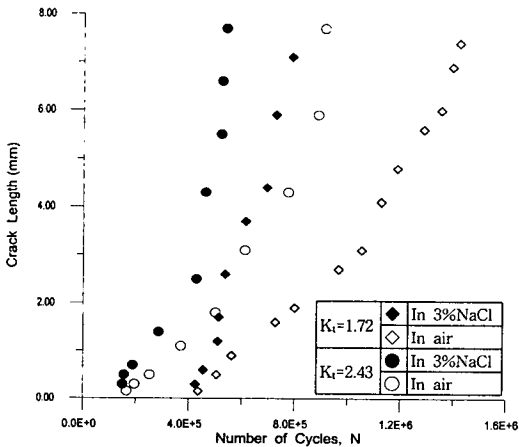


Fig.10 Crack length vs. number of cycles ($S_a=201.9\text{MPa}$)

3.4 부식환경에서의 피로강도 추정

선박이나 해양구조물은 많은 부분이 용접이음부로 제작되며, 이러한 용접이음부는 응력집중원으로 작용하여 대기중 및 부식환경중에서 피로강도를 저하시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 용접이음부 근처, 즉 용접열영향부와 응력집중이 중첩되는 개소의 부식환경에 의한 피로강도 감소 효과를 정량적으로 추정하는 것은 부식환경을 고려한 용접이음구조의 피로강도설계에서 중요한 자료가 된다. 그러나 모든 응력집중계수에 대해 부식피로 실험을 실시한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 최소한의 실험을 통해 부식환경에서 사용되는 부재의 허용응력과 안전율을 결정하는 것이 필요하며, 부식환경에 따른 신뢰성 있는 피로수명 추정방법이 요구된다. 이에 따른 부식환경에서의 추정방법의 확립을 위해 많은 연구[7.11]가 있었다.

본 연구에서는 응력집중계수의 영향을 고려한 용접열영향부의 부식피로강도 추정식을 검토하여 보았다. Fig.4와 Table 4에서 나타난 부식피로강도 특성식에서 계수 C 및 지수 m와 응력집중계수 사이의 관계는 Fig.11에서 보는바와 같이 직선식으로 가정할 수 있었다. 즉 응력집중계수의 변화에 따른 계수 C와 지수 m은

$$C=1588.4(K_t)-385.3 \dots \dots \dots (3.1)$$

$$m=-0.0629(K_t)-0.2413 \dots \dots \dots (3.2)$$

와 같이 K_t 의 함수로 나타낼 수 있다. Fig.4의 부식환경중에서의 피로시험 결과는 응력집중계수의 영향을 고려한 계수 C와 지수 m를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_a = [1588.4(K_t) - 385.3] (N_f)^{[-0.0629(K_t) - 0.2413]} \dots \dots \dots (3.3)$$

추정식과 실험치 사이의 상관관계를 비교하기 위해 상관분석에 의한 표본상관계수를 구하여 Table 5에 나타내었으며, 이 결과를 보면 추정식 (3.3)은 본 실험결과를 비교적 잘 나타내주고 있다.

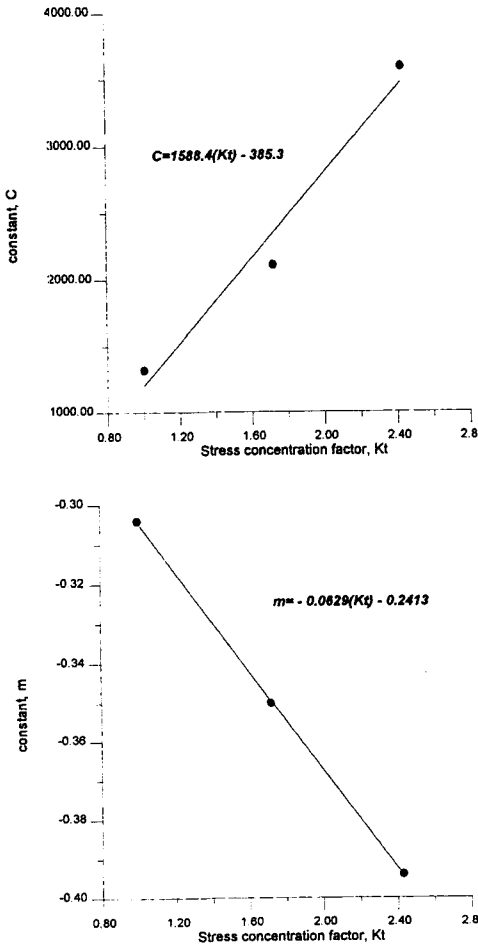


Fig.11 Stress concentration factor(K_t) vs. constant(C, m)

Table 5 Correlation of experimental date and estimated formula

Test environment	S. C. F. K_t	Correlation coefficient $ \gamma $
In 3% NaCl	$K_t=1.00$	0.919
	$K_t=1.72$	0.910
	$K_t=2.43$	0.927

열영향부에 대한 대기중에서와 3% NaCl 부식환경에서의 회전굽힘 피로시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 대기중에서와 부식환경중에서의 피로수명을 비교했을 때 부식환경에서의 피로수명이 감소하고, 응력집중계수가 클수록 피로수명은 대기중과 부식 환경중 모두 감소하였으며, 부식환경의 영향으로 인한 피로수명 감소율을 대기중에서와 비교할 때 평활재가 가장 큰 감소율을 나타냈으며, 응력집중계수가 클수록 감소율은 작았다.

2) 부식환경하에서 평활재의 균열성장거동은 노치재와는 달리, 비슷한 시기에 여러곳에서 생긴 피트들이 균열발생원이 되어 각기 주균열로 성장하여 합쳐지는 현상에 의해 최종파단에 이르기 때문에 노치재의 응력집중원 표면의 균열이 주균열로 성장하는 경우보다 피로수명의 감소효과가 크다.

3) 부식환경하에서의 노치 시험편은 초기에 부식환경의 영향보다는 기계적 응력집중부인 노치에서 발생한 균열이 주균열로서 성장하는 중에 피트에서 발생한 균열과 연결되는 균열 성장거동을 보였다.

4) 노치재의 부식피로 균열은 초기에는 부식환경의 영향보다는 역학적인 요인이 원인이 되어 성장하지만, 반복수가 증가함에 따라 피트에서 발생·성장한 균열과 합체되면서, 불연속적으로 성장하게 되어 공기중에서보다 진전속도가 빠르게 된다.

5) 본 연구에 채용한 TMCP 강의 용접열영향부에 대한 응력집중계수의 변화에 따른 회전굽힘 부식피로강도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$S_a = [1588.4(K_t) - 385.3] (N_f)^{-0.0629(K_t) - 0.2413}$$

후 기

이 논문은 1998년도 부산대학교 학술연구조성비의 지원을 받아 수행된 연구이다.

참 고 문 헌

[1] 한문식 "대형구조물의 파괴강도특성평가기술에

4. 결 언

TMCP강을 사용한 CO₂ 가스 용접이음재의

- 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, Vol. 30, No. 4, 1993, pp. 102-111
- [2] 江原降一郎, 山田義和, 石黒隆義, “海洋構造物用高張力鋼の腐食疲勞舉動”, 三菱重工技報, Vol. 18, No. 5, 1981, pp. 138-143
- [3] 백점기, 양수홍, 김성규, “부식을 고려한 선각 거더의 최종강도 신뢰성”, 대한조선학회 논문집, Vol. 35, No. 2, 1996, pp. 96-109
- [4] 백점기, 박영일, “유조선 중강도 부재의 확률론적 부식속도 예측모델의 개발”, 대한조선학회 논문집, Vol. 35, No. 2, 1998, pp. 83-93
- [5] 신민태, 윤중근, 김희진, “TMCP강 용접열영향부 인성에 관한 연구”, 대한용접학회지, Vol. 4, No. 3, 1986, pp. 43-49
- [6] Peterson, R. E., “Stress Concentration Factors”, Wiley Interscience Pub, 1973 p. 235
- [7] 永井欣一, 山本豊, “軟鋼切欠平板の腐食疲勞龜裂發生壽命推定に關する研究”, 日本造船學會論文集, Vol. 142, No. 132, 1977, pp. 239-249
- [8] 오세욱, 김용집, “복합조직강의 부식피로 파괴에 미치는 3.5% NaCl 수용액의 pH와 모상입경의 효과”, 대한기계학회지, Vol. 11, No. 6, 1987, pp. 867-876
- [9] 김상태, 오환섭, 오세욱, “재료시험입문”, 원창출판사, 1996, p. 228
- [10] 구자홍, 김진경, 이재준, “통계학”, 자유아카데미, 1994, pp. 282-289
- [11] Matuda, S., Okazaki, K., Ono, H., Nihei, K., “Prediction of Corrosion Fatigue Life”, JSMS, Vol. 33, No. 374, 1984, pp. 1414-1420