

SM 30 C강의 중공 중실축 단면변화가 부식피로강도에 미치는 영향

신 규 동* · 장 백 선* · 김 응 집**
(96년 11월 29일 접수)

The Influence of the Hollow and Solid Shaft Cross Section of SM 30 C Steel on Corrosion Fatigue Strength

Kyou-Dong Shin* · Paik-Sun Chang* · Woong-Jib Kim**

Key Words : Corroded Period(부식기간), Corrosion Condition(부식조건), Surface Roughness
(표면요철), Corrosion Fatigue Strength(부식피로강도), Initial Fatigue Crack
(초기피로크랙), Interference Phenomenon of the Crack(크랙의 간섭현상)

Abstract

The corrosion fatigue test was conducted in air to investigate the corrosion fatigue strength of SM 30 C steel by which was corroded in the under sea and the sea surface in the conditions of 3.0% NaCl salt solution. The fatigue tests were carried out on a rotary bending testing machine of cantilever type. The corrosion effect of the sea surface condition was severer more than that of the under sea condition which was due to the periodic contact of air thus accelerated the corrosion. The difference of the fatigue strength between sea surface and under sea conditions decreased with increase of stress level and corroded period. In the case of the solid shaft and thickness 2mm of hollow shaft, the difference of corrosion fatigue strength decreased as stress level and corrosion periodic increasing. On the contrary in the case of thickness 1mm of hollow shaft, the difference of it increased as stress level, corrosion periodic increasing and also the condition of corrosion changed. The main factors affecting the degradation of fatigue strength due to corrosion were the reduction of sectional area and the increase of surface roughness. The interference phenomenon increased with stress level got higher.

1. 서 론

해양환경하에서 사용되는 선박 및 구조물들은 반

복응력에 의한 기계적인 피로현상과 환경효과가 복합되어 작용하기 때문에 피로강도가 저하하는 것은 잘 알려진 사실이다. 부식환경에 대해 Masuda¹⁾,

* 부산전문대학 기계설계과

** 동아공업고등학교 기계과

Nishijima²⁾ 등은 염수와 이온 교환수 중에서 표면은 부식역과 비부식역으로 나누어지며 부식역에서 Cl 이온 농도의 증가와 수소이온 농도가 증가하여 부식피트가 발생된다고 하였다. Noguchi³⁾ 등은 결정입계와 그 주변에서 우선적으로 부식피트가 발생되며, 결국 이러한 부식피트가 응력집중원이 되어 균열이 전파된다고 하였다. 강재에 미치는 부식 조건으로서는 여러가지 요인이 있으나 해양구조물의 경우 항상 부식액에 침적되어 있는 부분과 일정 시간 주기적으로 부식액에 침적 또는 대기중에 노출되는 부분 즉, 간헐침적현상이 일어나는 부분으로 나눌 수 있다.

Ogawa⁴⁾ 등은 염수부식한 강판에 있어서 피로강도가 감소되는 주요 원인이 강판의 평균적인 판두께 감소와 표면요철에 있다고 하였다. 특히, 판두께가 얇은 재료일수록 부식작용에 의해 판두께 감소와 표면요철 부분에서의 응력집중 현상으로 피로수명이 감소하므로 구조물의 판두께 변화에 대한 부식피로강도 등의 연구는 구조물의 신뢰도를 평가할 때 중요하다고 볼 수 있다.

본 연구는 기계구조물, 선박 및 해양구조물 등에서 광범위하게 사용되는 SM 30 C강재를 이용하여 중실축 형상과 중공축 단면의 두께를 변화시킨 시험편을 제작한 후 3% NaCl 수용액 중에서 일정 시간 침적시켰으며 또한 주기적으로 3% NaCl 수용액 중에 침적 또는 대기 중에 방치시켰다. 이같은 시험편을 대기 중에서 외팔보식 반복회전굽힘 피로시험기를 이용하여 부식피로 파괴수명과 부식피로 파괴특성 등에 대하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

시험편의 소재는 구조용강(SM 30 C)인 열간압연재로서 화학성분은 Table 1과 같다. Fig. 1은 금속현미경 조직사진을 Table 2는 기계적 성질을 나타낸 것이다. Fig. 2는 피로시험편 형상으로서 Fig. 2(a)는 중실축 단면을 Fig. 2(b)는 두께 1 mm, Fig. 2(c)는 두께 2 mm인 중공축 단면의 피로시험편을 나타낸 것이다. Fig. 3은 시험편 표면을 부식시키기 위한 부식장치와 부식액의 순환 계통도를 나타낸 것이다. 부식액은 증류수에 NaCl을 첨가하

Table 1. Chemical composition of the specimen (Wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.310	0.230	0.702	0.061	0.067

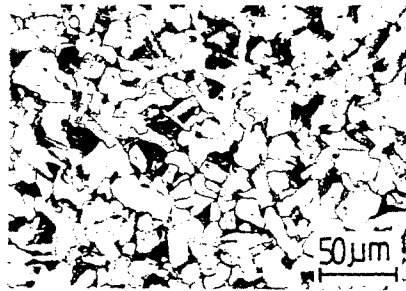
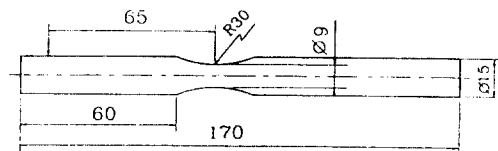


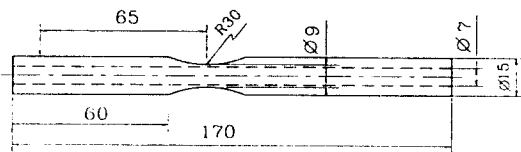
Fig. 1 Microstructure of specimen (black ; pearlite, white ; ferrite)

loading position



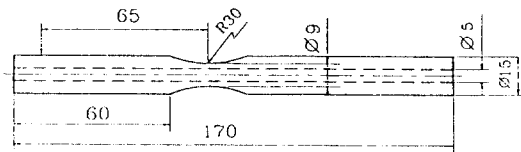
(a) solid shaft specimen

loading position



(b) hollow shaft specimen(t:1)

loading position



(c) hollow shaft specimen(t:2)

Fig. 2 Geometry of testing specimens

여 3% NaCl 수용액을 만들었고 부식액의 온도는 자동온도 조절장치를 이용하여 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰다. 3% NaCl 수용액의 유량은 각 챔버에 약 100 cc/min로 순환시켰으며 부식액은 1주일 단위로 교환하였다. 피로시험편의 부식기간은 각각 4일, 20일, 100일로 하였으며 침적 시험편 (under sea)의 경우 1일 24시간 3% NaCl 수용액 중에 침적시켜 부식시켰으나, 간헐침적 시험편(sea surface)의 경우 1일 12시간은 3% NaCl 수용액 중에 침적시켰으며, 12시간은 대기 중에 방치시켰다. 이와 같이 일정 기간 침적 또는 간헐침적시킨 시험편은 초음파 세척기를 이용하여 세척시켜 진공용기에 보관한 후 대기중에서 피로시험을 하였다. 피로시험기는 외팔보식 반복회전굽힘 피로시험기 (Centilever type rotated bending fatigue testing machine)로써 반복회전수는 1500 rpm으로 하였다.

Table 2. Mechanical properties of the specimen

tensile strength (MPa)	elongation (%)	hardness (Hv), 5 Kg.f
626	22.67	197.5

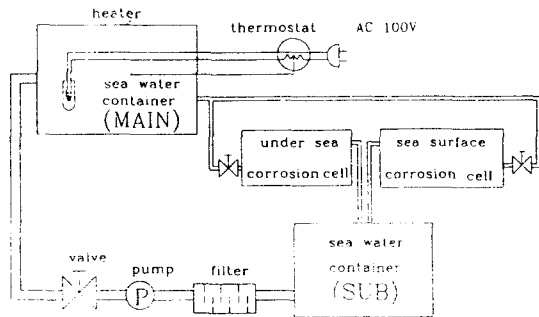


Fig. 3 Circulating system of 3% NaCl solution for corrosion fatigue testing specimens

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부식 후의 상태

Fig. 4는 3% NaCl수용액 중에서 100일간 침적 또는 간헐침적시켰을 때 시험편의 표면이 흑색 산

화물층과 갈색 산화물층의 산화물로써 전면이 부식화되어 표면관찰이 어려우므로 단면에서의 부식상태를 나타낸 것이다. 침적과 간헐침적조건에서의 부식상태는 전면이 요철부식으로 되었으며 간헐침적 시험편의 경우 침적 시험편에 비해 표면층의 부식상태가 더욱 거칠게 나타났다. 일반적으로 해수 표면에서는 공기와 해수에 의한 주기적인 접촉으로 부식작용이 증가하여 해수 중에 침적한 것에 비해 부식이 증가하며 Wei⁵⁾ 등의 연구결과 해수와 공기의 접촉이 많을수록 피로수명이 감소된다고 하였다. 이와 같이 침적상태에 비해 간헐침적상태에서 부식이 촉진되고 부식층의 깊이가 증가된 이유는 Maruyama⁶⁾ 등의 연구 결과와 마찬가지로 시험편을 해수 중에 침적만 시킬 경우 초기에 형성된 비교적 균일하고 안정된 산화막이 전면에 걸쳐 일어나므로 국부적인 부식이 진행하기 어렵게 되어 다소 얇은 피트가 형성되지만, 시험편을 해수 중에 침적시키는 기간과 대기 중에 노출시키는 기간을 중복시킬 경우 해수가 시험편 표면에 유입과 유출을 반복하므로 공기흡수가 가능하게 되어 다소 깊은 피트가 형성되었다.

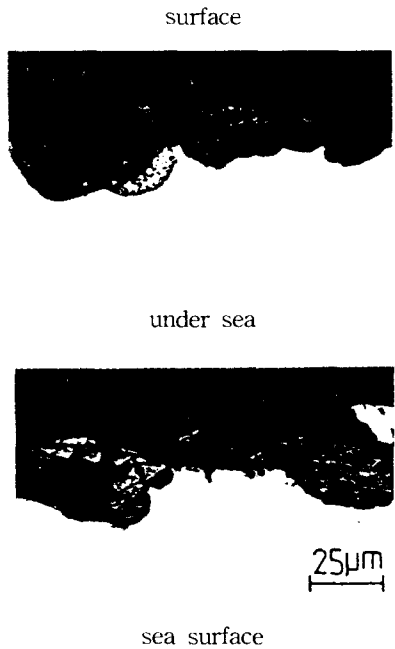


Fig. 4 Cross sectional condition corroded in 3% NaCl solution during 100 days

결과적으로 본 연구에서 부식기간이 증가하고 또한 침적 시험편에 비해 간헐침적 시험편의 경우 그리고 부식기간이 증가 할수록 부식상태가 촉진되며 부식층의 깊이 또한 증가하는 경향은 Ogawa⁷⁾ 등의 연구 결과와도 잘 일치하고 있다.

3.2 피로강도 곡선

Fig. 5는 부식시키지 않은 시험편을, Fig. 6, 7, 8은 3% NaCl 수용액 중에서 4일, 20일, 100일간 침적 또는 간헐침적조건에 의해 시험편을 부식시킨 후 대기 중에서 응력레벨을 변화시켜 반복회전굽힘 피로실험한 피로강도곡선(S-N curve)을 나타낸 것이다. 시험편 표시는 침적 시험편의 경우 4일(●), 20일(▲), 100일(■), 간헐침적 시험편의 경우 4일(○), 20일(△), 100일(□)로써 각각 표시 하였다.

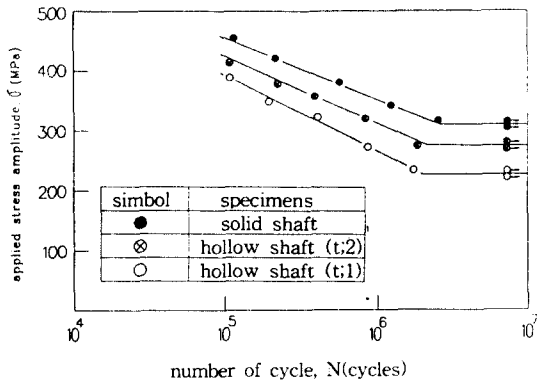


Fig. 5 S-N curves of specimen uncorroded

Table 3은 Fig. 5에서의 피로한도를 나타낸 것으로 피로한도는 중실축 시험편에 비해 두께 2 mm의 중공축 시험편일 때 89 %, 두께 1 mm일 때 74 % 감소하였다.

Table 3. Fatigue limit(MPa) of specimens uncorroded

solid shaft	hollow shaft(t:2)	hollow shaft(t:1)
309.5	278.2	229.6

Table 4는 Fig. 6, 7, 8에서의 피로한도를 나타낸 것으로 두께 1 mm의 중공축 시험편을 100일간 간

헐침적시켰을 경우 피로한도가 나타나지 않았다. 피로한도는 중실축 시험편에 비해 중공축 시험편 일 때 중공축 시험편의 경우 두께가 얇을수록 그리고 부식기간이 길수록 감소하였으며 부식기간이 동일한 경우 침적에 비해 간헐침적 상태일 때 피로한도가 감소하였다.

Table 4. Fatigue limit(MPa) of specimens corroded with 3% NaCl solution

		4days	20days	100days
under sea	S	264.6	211.7	165.5
	H(t:2)	241.1	199.9	152.9
	H(t:1)	214.6	149.9	125.4
sea surface	S	234.2	183.3	153.8
	H(t:2)	226.4	176.4	140.1
	H(t:1)	178.4	133.3	-

S:solid shaft

H:hollow shaft

Table 5. Ratio of fracture number of cycles for 3% NaCl solution and air condition (N_{sea} / N_{air})

		4days	20days	100days	
under sea	N _f :1.0×10 ⁵ cycles	S	0.84	0.78	0.67
		H(t:2)	0.88	0.82	0.70
		H(t:1)	0.95	0.82	0.56
	N _f :1.0×10 ⁶ cycles	S	0.80	0.69	0.60
		H(t:2)	0.90	0.79	0.69
		H(t:1)	0.96	0.70	0.54
sea surface	N _f :1.0×10 ⁵ cycles	S	0.82	0.76	0.67
		H(t:2)	0.87	0.81	0.67
		H(t:1)	0.90	0.72	0.42
	N _f :1.0×10 ⁶ cycles	S	0.74	0.65	0.56
		H(t:2)	0.84	0.73	0.61
		H(t:1)	0.82	0.64	0.49

S:solid shaft

H:hollow shaft

Table 5는 Fig. 5, 6, 7, 8의 피로강도 곡선에서의 부식기간과 부식조건에 대한 파괴 수명 1.0×10^5 과 1.0×10^6 cycles 일 때의 피로강도비 N_{sea} (3% NaCl solution) / N_{air} 를 나타낸 것이다. 파괴 수명 1.0×10^5 과 1.0×10^6 cycles에서 Fig. 6, 7의 중실축 시험편과 두께 2 mm의 중공축 시험편일 때 응력레벨이 높을수록 파괴수명의 차이가 적고 응력레벨이 낮을수록 파괴수명의 차이가 증가하는 것은 Maruyama⁶⁾, Youm⁸⁾, Ishihara⁹⁾ 등의 해수 중에서 파괴수명을 연구한 보고에서도 본 연구의 경향과 잘 일치하고 있다.

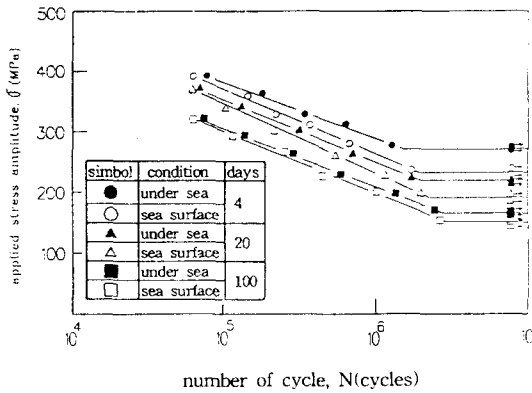


Fig. 6 S-N curves of solid shaft specimen corroded with 3% NaCl solution

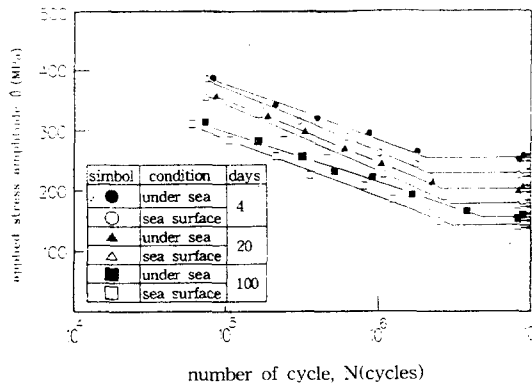


Fig. 7 S-N curves of hollow shaft specimen of 2mm thickness corroded with 3% NaCl solution

Fig. 8의 두께 1 mm의 중공축 시험편의 경우 응력레벨이 높을수록 파괴수명의 차이가 크게 나타났다. 노치가 있는 중공형상보의 경우 노치부에 인접한 표면층에서 최대응력이 발생된다는 Tamura¹⁰⁾ 등의 보고와 마찬가지로 본 실험에서도 시험편의 형상이 중공축 시험편일 때 중실축 시험편보다 피로강도가 낮으며 중공축 시험편의 경우 두께가 감소할 수록 피로강도가 감소하였다. 중실축 시험편의 경우 중공축 시험편에 비하여 이론적으로는 동일한 응력의 레벨에서 굽힘모멘트가 동일하게 작용하더라도 균열전파영역이 크고 동일한 부식조건에서 부식시킨 경우 부식층의 깊이가 단면적에 미치는 영향은 중실축 단면적에 비하여 중공축 단면적에 미치는 영향이 상대적으로 크므로 중실축의 경우 피로강도가 증가하였다. 중공축 시험편의 경우 두께가 감소할 수록 균열전파영역이 짧고 부식층 깊이의 영향이 파괴수명에 크게 영향을 미치므로 피로강도가 감소되었다고 보아진다. 또한, Ogawa⁷⁾ 등은 판 두께를 변화시켜 해수 중에서 부식시킨 시험편을 공기 중에서 피로실험한 결과 침적기간이 길수록 표면층의 요철이 증가하여 피로강도가 감소된다고 하였다. 본 실험에서 부식조건에 대한 파괴수명의 차이는 동일단면의 시험편의 경우 부식기간과 응력레벨이 동일 할때 부식조건에 따라 시험편표면의 부식상태가 변하므로 침적 시험편에 비해 간헐침적 시험편의 경우 시험편표면의 부식생성물과 부식피트로 인한 표면요철 등이 증가하여 응력집중화 현상을 가속시켜 파괴수명이 감소하였다. 특히, 두께 1 mm의 중공축 시험편의 경우 부식기간이 길고 간헐침적 시험편의 경우 부식의 영향이 증가하여 중실축과 중공축 두께 2 mm의 시험편에 비하여 파괴수명의 차이가 크며 부식일수 100일의 경우 부식의 영향이 더욱 증가하여 S - N 곡선에서 거의 직선에 가까운 기울기로 나타나며 피로한도가 나타나지 않았다. 결과적으로 부식피로 현상은 여러 가지 요인이 있으나 본 연구에서 사용된 시험편은 무하중에서 부식시킨 시험편으로써 파괴수명에 대한 차이가 나타나는 이유는 무하중에서도 부식의 영향으로 시

험편 표면에서 부식생성물과 부식피트로 인한 표면요철의 크기 등이 노치화 되어 응력집중현상이 일어나 저응력레벨에서도 균열성장이 이루어져 부식시키지 않은 시험편에 비해 피로파괴수명이 감소된 것으로 보인다. 특히, 중공축 시험편의 경우 중실축 시험편에 비해 균열전파영역이 적으며 동일 두께의 경우 침적 시험편에 비하여 간헐 침적 시험편일 때 부식일수가 길고 시험편 두께가 적을수록 시험편 단면에 미치는 부식의 영향이 가중되어 피로파괴수명이 저하되므로 저응력레벨에서의 설계가 요망된다.

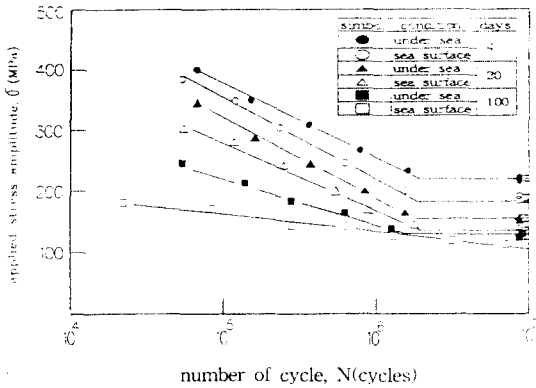


Fig. 8 S-N curves of hollow shaft specimen of 1mm thickness corroded with 3% NaCl solution

3.3 부식 피로 파괴 특성

Fig. 9는 중실축 시험편에 대하여 20일간 침적시킨 후 파괴수명 1.0×10^5 과 1.0×10^6 cycles에 대한 응력을 작용시켰을 때 각각의 파괴수명 60% 일 때의 표면을 관찰한 것이다. 대기 중에서 피로 실험한 Oh¹¹⁾ 등의 보고에서 응력레벨이 높을 경우 초기슬립이 발생하여 포화슬립이 형성된 후 균열이 발생 성장하지만 응력레벨이 피로한도 근처의 낮은 응력레벨에서는 슬립은 거의 발생하지 않고 균열이 발생 성장한다고 하였다. 일반적으로 부식액 중에서 피로실험한 경우 대부분 부식피트에서 균열이 발생하며, Noguchi³¹⁾ 등의 보고에서 입계는 입내에 비해 격자결함이나 불순물 원자가 많으므로 화학적으로 불안정하며 탄성응력이 생겨 있으므로 결정입계가 우선 부식된 후 그 주변이 응력과 부식의 공동작용에 의해 파괴된다고 하였다. 본 실험의 경우 20일간 부식시켰을 경우 전 표면이 부식화 되었으며 페라이트(ferrite)와 퍼얼라이트(pearlite)의 경계부(boundary)근처에서 더욱 부식화 경향이 증가하였다. 피로실험결과 파괴수명에 관계없이 경계부 근처에서 슬립과 크랙이 관찰되며 파괴수명 1.0×10^5 cycles의 경우 경계부 근처에서 슬립이 발생하여 페라이트 부분으로 많은 슬립이 성장한 후 크랙이 발생하지만 파괴수명 1.0×10^6 cycles의 경우 피로한도 근처의 낮은 응력이므로 슬립발생이 거의 없고 크랙만 발생 성장하였다.



N ; 6.0×10^4 cycles, 363 MPa



N ; 6.0×10^5 cycles, 240 MPa

← loading direction →

Fig. 9 Crack initiation of solid shaft specimen corroded with 3% NaCl solution during 20days (P ; pearlite, F ; ferrite, B ; boundary, S ; slip, C ; crack)

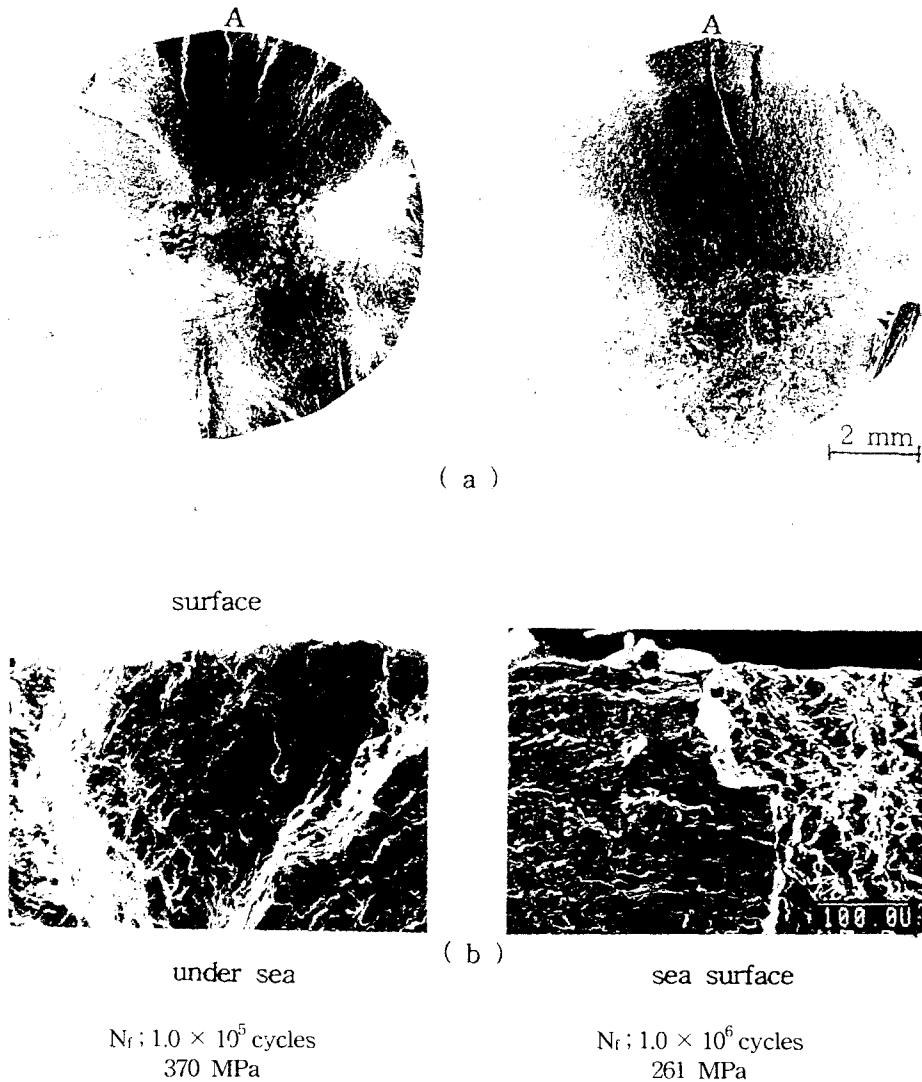


Fig. 10 Fractography of solid shaft specimens corroded with 3% NaCl solution during 4 days
 (a) ; Macroscopic fatigue fracture surface
 (b) ; Microscopic fatigue fracture surface of region A

Fig. 10은 중실축 시험편에 대하여 4일간, Fig. 11은 100일간 부식시킨 후 피로파괴된 파단면 형상이고 Fig. 12는 두께 2mm, Fig. 13은 두께 1mm의 중공축 시험편에 대하여 100일간 부식시킨 후 피로파괴된 파단면 형상을 관찰한 것이다.

Fig. 10, 11, 12, 13의 (a)는 거시적인 파단면 형

상으로써 부식기간이 길수록 표면이 심하게 부식되었다. Fig. 10, 11 (a)의 중실축의 경우 파괴수명 1.0×10^5 cycles일 때 높은 응력이 작용하므로 많은 균열이 각각 단독으로 발생하여 단의 수가 많고 최종파단이 일어 나기 직전에 중앙에서 균열이 합체되어 급속파단 되었음을 알 수 있으나 파괴수명 1.0×10^6 cycles의 경우 낮은 응력이

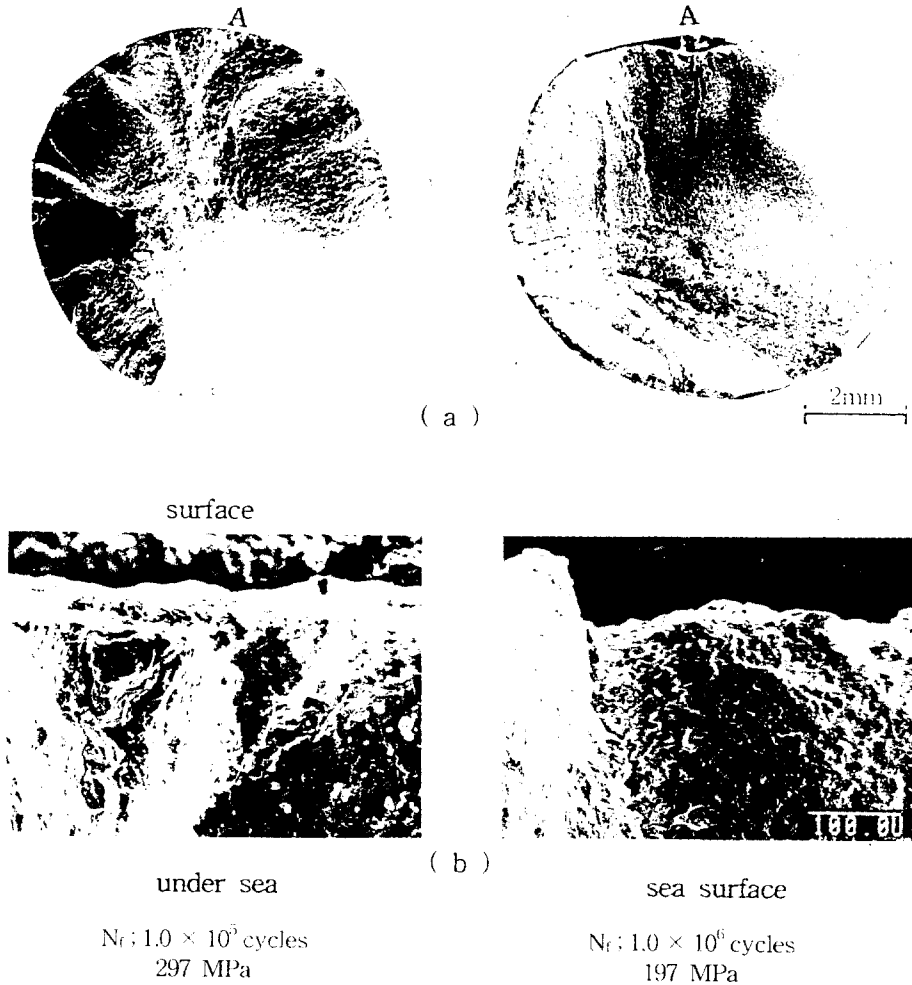


Fig. 11 Fractography of solid shaft specimens corroded with 3% NaCl solution during 100 days

- (a) ; Macroscopic fatigue fracture surface
- (b) ; Microscopic fatigue fracture surface of region A

작용하므로 균열의 발생개수가 적고 단의 형상이 평탄하므로 균열전파속도가 지연 되었음을 알수 있다. Fig. 12, 13 (a)의 중공축의 경우 응력레벨이 높고 두께가 클때 균열의 발생개수가 많고 단의 형상이 거칠게 나타나지만 두께가 적고 응력레벨이 낮을때 균열발생개수가 적고 단의 형상이 평탄하였다.

Fig. 10, 11, 12, 13의 (b)는 (a)의 파단면상에서 균열의 단이 겹치는 A부를 미시적으로 관찰

한 것으로 시험편 원주면에 생긴 파단부에서는 부식기간이 길고 침착 시험편에 비하여 간헐침적 시험편의 경우가 부식의 영향이 증가되어 표면이 더욱 거칠고 균열이 생긴 부분은 원주부에서 발생한 부식피트 등의 표면요철에 의한 영향으로 원주에서 내부로 성장한 의사벽개 파단면(quisi-cleavage fracture)과 일부에 파상형상의 소성변형을 가지는 분리파면이 관찰되었다. Fig. 10, 11 (b)의 중실축의 경우 균열의 단이 뚜렷하

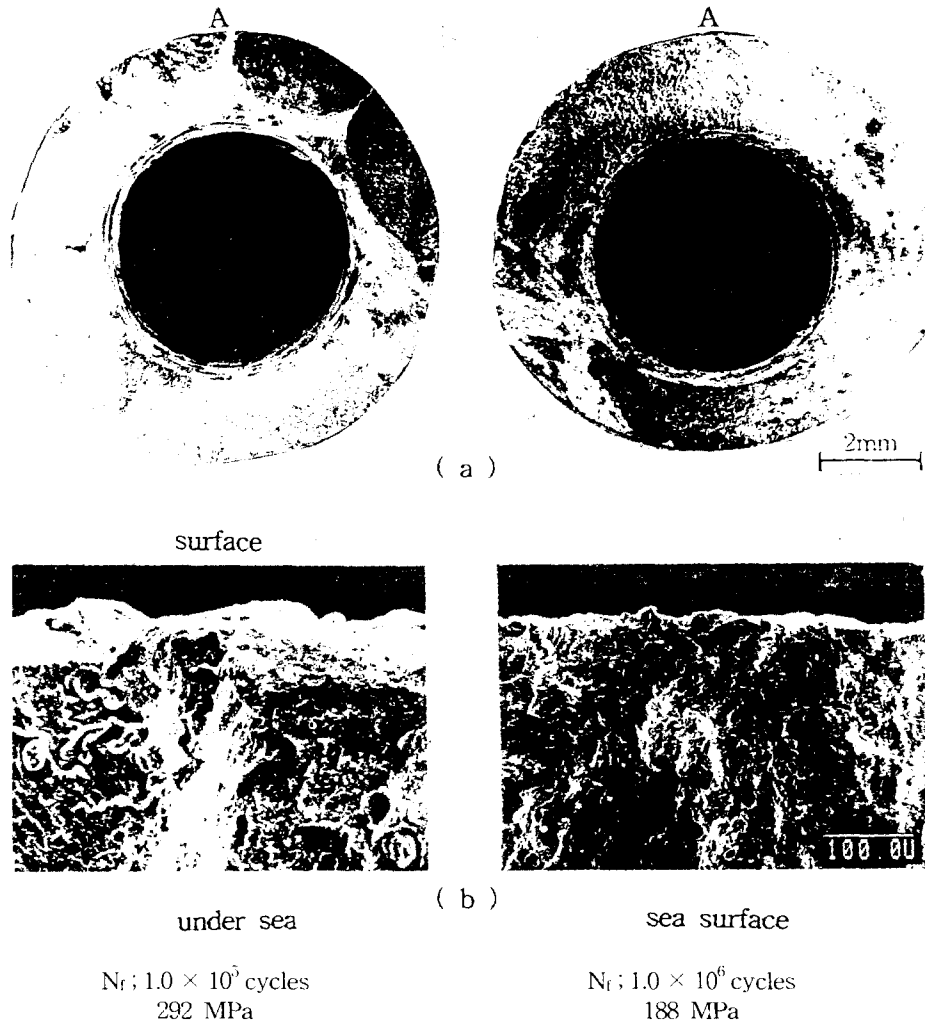


Fig. 12 Fractography of hollow shaft specimen of 2mm thickness corroded with 3% NaCl solution during 100 days

- (a) ; Macroscopic fatigue fracture surface
- (b) ; Microscopic fatigue fracture surface of region A

게 나타나지만 Fig. 12, 13 (b)의 중공축의 경우 중실축에 비하여 그리고 응력레벨이 낮고 두께가 적을때 균열의 단이 뚜렷하게 나타나지 않고 평탄하게 나타났다.

결과적으로 응력레벨이 클수록 단의 수가 많고 파단면이 거칠게 나타나며 중실축의 경우 중공축에 비하여 균열전파영역이 크므로 부식의 영향을

적게 받아 균열의 단이 뚜렷하게 나타나지만 중공축의 경우 두께가 적을수록 균열전파영역의 감소와 부식작용으로 인한 표면의 요철 등이 피로에 미치는 영향을 가속화 시켜 전면이 피로의 영향을 받기 쉬우므로 단의 형상이 뚜렷하지 않고 파상형상의 파면이 증가하였다.

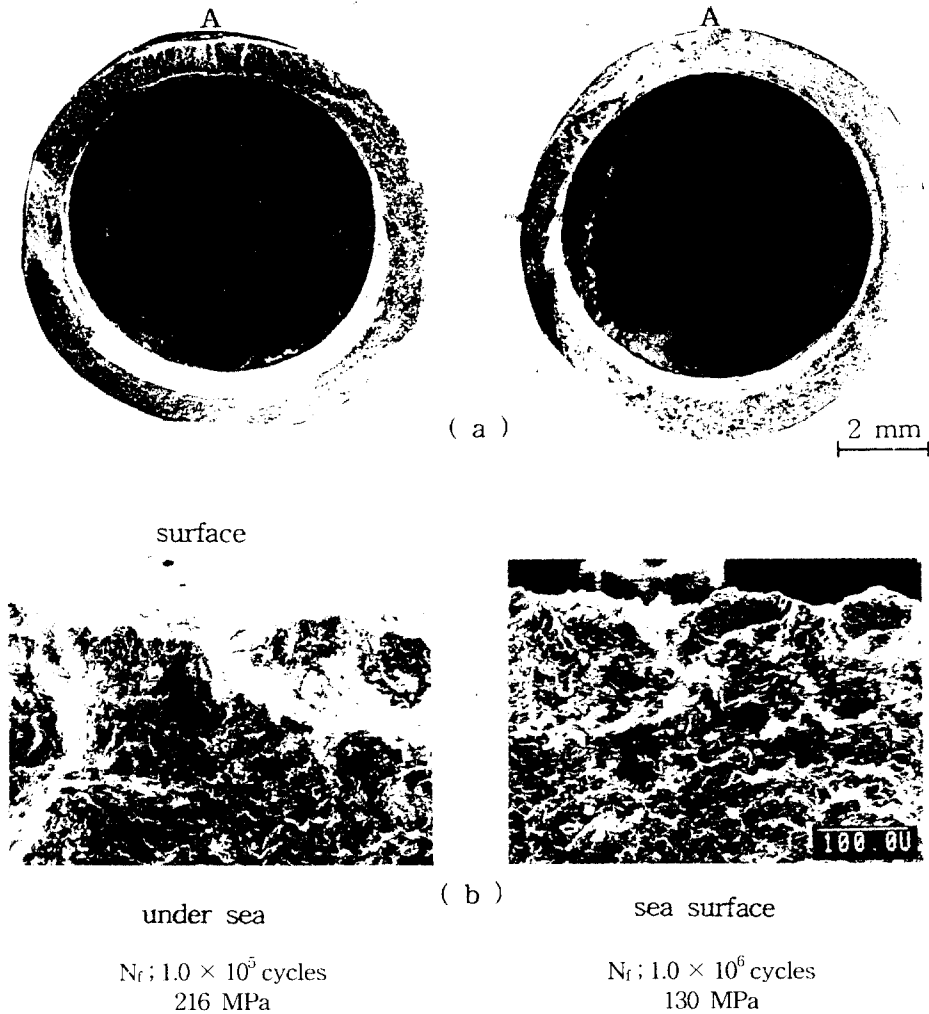


Fig. 13 Fractography of hollow shaft specimen of 1mm thickness corroded with 3% NaCl solution during 100 days

(a) ; Macroscopic fatigue fracture surface

(b) ; Microscopic fatigue fracture surface of region A

4. 결 론

SM 30 C재를 이용하여 중실축과 두께가 다른 중공축 시험편을 제작한 후 3 % NaCl 수용액 중에서 4일, 20일, 100일간 침적 또는 주기적으로 침적 및 대기 중에 방치시켜 부식시킨 시험편을 대기 중에서 반복회전굽힘 피로실험을 한 결과 다음과

같은 결론을 얻었다.

- 1) 부식기간이 길고 간헐침적 시험편일 경우 침적 시험편에 비해 부식작용이 촉진되어 시험편 표면의 요철이 증가하여 피로강도가 감소하였다.
- 2) 중공축일 경우 두께가 적을수록 중실축에 비하여 균열전파영역의 감소와 부식기간이 길

수축 부식작용으로 인한 표면요철의 증가 등으로 피로강도가 감소되었으며 응력레벨이 증가 할수록 피로강도의 차이가 더욱 증가하였다.

- 3) 중실축일 때 응력레벨이 높을수록 균열의 합체현상이 많이 일어나 파단면의 단수가 많고 뚜렷하며 거칠게 나타 나지만 응력레벨이 낮고 중공축일 때 두께가 적을수록 부식작용으로 인한 균열전파영역이 감소되어 피로파괴 수명이 감소되며 단의 형상이 뚜렷하지 않고 평탄하게 나타났다.

- 후 기 -

본 연구 논문은 1996년도 부산전문대학의 학술 연구 조성비로 이루어 졌으며, 지원해 주신 부산전문대학에 감사드립니다.

참고문헌

1) Masuda, C., Nishijima, S., Abe, T. and Sumiyoshi, H., "On orrosion Fatigue Mechanisms for S45C and SCM43 Steels in Rotating Bending" , JSME Trans.(A), Vol.50, No.453, pp. 1019~1025, 1985

2) Nishijima, S., Abe, T., Masuda, C. and Hirakawa, H., "Corrosion Fatigue Property and Frequency Effect of Low Alloy Steels in Salt Water under Rotating Bending", JSME Trans.(A), Vol.51, No.461, pp. 156~160, 1985

3) Noguchi, H., Nisitani, H. and Ogawa, T., "Corrosion Fatigue Process of Annealed 0.50% Carbon Steel under Rotating Bending", JSME Trans.(A), Vol.55, No.511, pp. 386 ~ 391, 1988

4) Ogawa, T., Tokaji, K. and Ochi, S., "The Influence of Loading Frequency on Near Threshold Fatigue Crack Growth", JSME Trans.(A), Vol.52, No.474, pp. 399~405, 1985

5) Wei, R. P. and Ebara, R., "Corrosion Fatigue Science and Engineering", JSME Trans.(A), Vol.91, No.841, pp. 8~10, 1988

6) Maruyama, N., Sumita, M. and Horibe, S., "Fatigue Strength of a High Strength Steel in Various Sea Water Environments", Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol.73, No.2, pp. 356~363, 1987

7) Ogawa, K., Saruki, K., Asano, T. and Furuta, T., "Influence of Notch Sensitivity Fatigue Strength of Steel Sheets Corroded with Salt-Water", JSMS, Vol.36, No.411, pp. 1375 ~1380, 1987

8) 廉永夏, 李長茂, 辛太明, "人工海水中的 鋼의 疲勞強度에 관한 研究", 서울대학교, 공대연구보고, 제15권, 제2호, pp. 65~76, 1983

9) Ishihara, S., Shiozawa, K., Miyao, K. and Inoue, M., "Effects of Fluid Flow Rate and Stress Amplitude on the initiation and Growth Behavior of Corrosion Pits on an Annealed Carbon Steel", JSME Trans.(A), Vol.57, No.540, pp. 1775~1781, 1991

10) Tamura, k. and sato, Y., "Yielding on Mild Steel Bean of Hollow Circular Cross Section with a Radial Hole", JSME, Trans.(A), Vol.58, No.547, pp. 431~435, 1992

11) 吳世旭, 金雄執, "複合組織鋼의 微視組織變化가 疲勞破壞傳播에 미치는 影響", 韓國海洋工學會誌, 第5卷, 第2號, pp. 58~66, 1991