한국공작기계학회 2002 추계학술대회 논문집 pp. 58~63

U-노치반경에 따른 부식피로 파괴거동
(A Study on the Corrosion Fatigue Fracture of U-notch Radius)

이장규* · 윤종희 · 인승현 · 우창기 / 인천대학교, 신관수 · 최양호 · 박성완 / 인천전문대학

Abstract

This study has performed rotary bending fatigue testing that smooth specimen using SM45C materials and notched specimen whose radii were R6, R4 and R2, were processed in 3% NaCl aqueous solutions or in the air. The results are as followed; 1. In the air fatigue limit at 10^7 cycles remarkably reduced as notch radius goes small. 2. In 3% NaCl aqueous solution fatigue strength at 10^6 cycles also had large range of reduction as notch radius goes small. 3. Comparing fatigue strength in the air, fatigue strength at 10^6 cycles in 3% NaCl aqueous solution reduced by 46.2% at smooth specimen, 55.3% at R6 notch radius, 45.8% at R4 and 39.7% at R2 respectively. 4. The reason that fatigue strength reduced in the reduction of notch radius size was because the surface of notch exposed in corrosion was small and consequently it was less corroded.

1. 서론

피로파괴의 문제는 각종 기계, 항공, 토목, 조선 등의 구조물의 수명과 안전성에 직접적인 관계가 있으므로 고속회전 및 왕복기관 등의 부품에 대한 개발과 설계에 중요한 역할을 하고 있다. 또한, 해양구조물의 사용증가와 더불어 구조물의 수명저하에 큰 영향을 미치는 원인 중의 하나인 부식에 대한 연구의 필요성이 증가되고 있다.

노치는 응력집중을 유발시켜 낮은 응력에서도 기계부품이나 구조물을 파괴시키므로 피해야 되나 기계설계시 부품의 결합을 위해 어쩔 수 없이 존재하는 경우가 많다. 따라서, 각종 구조물 및 기계부품의 노치형상이 부식 조건하에서 피로수명에 미치는 영향을 고찰하는 것은 가혹한 환경에서의 사용 수명연장에 대한 중요한 의미를 갖는다.

본 연구에서는 SM45C의 소재를 이용하여 평활(smooth)재와 U형 노치(notch)재로 가공하여 공기 중과 3% NaCl 수용액 중에서 부식피로회전굽힘시험을 하여 평활 및 노치에 의한 효과를 고찰하여 노치형상에 따른 부식피로파괴거동을 분석 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료 및 시험편

본 실험의 회전굽힘 피로시험에 사용된 시험편의 재질은 산업현장의 각종 구조물 및 부품 등에 일반적으로 널리 사용되는 기계구조용 탄소강재인 SM45C로서 동일한 성질을 얻기 위해 동일한 배취(batch)에서 시료를 채취하였으며, Table 1에 시험편의 화학적 성분을 표시하였다.

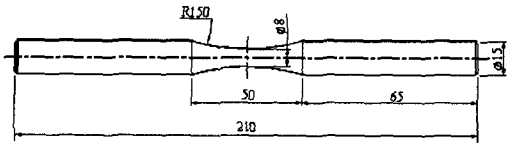
시험편의 형상 및 규격은 Fig. 1 (a), (b), (c) 및 (d)와 같이 평활형과 노치형의 두 가지로 제작하였으며, 노치는 U형으로 하고, 그 반경을 각각 2mm, 4mm 및 6mm로 변화를 주어 CNC선반을 이용하여 가공하였다.

2.2 실험장치

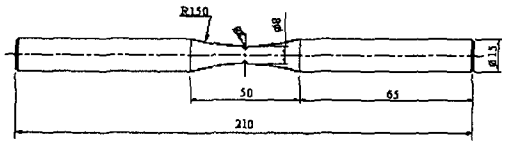
회전굽힘 부식피로시험을 하기 위한 실험장치는 부식환경을 조성하기 위하여 정확한 유량의 제어와 공기를 공급하는 장치, 오노식 회전굽힘 피로시험기(최대굽힘 모멘트가 98N-m, 회전수는 3,600rpm)로 구성하였다.

Table 1 Chemical composition (wt.%)

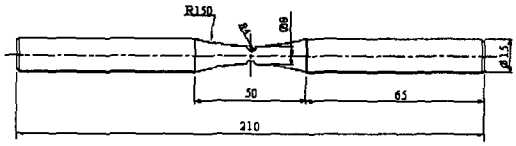
Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.46	0.26	0.71	0.021	0.018



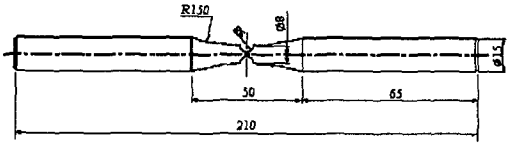
(a) Smooth specimen



(b) U-notch specimen (R2)



(c) U-notch specimen (R4)



(d) U-notch specimen (R6)

Fig. 1 Shapes and dimensions of rotary bending fatigue test specimen(unit:mm)

2.3 실험방법

부식액은 증류수에 NaCl을 용해시킨 3% NaCl 수용액으로 하였으며, 실험 중 부식환경을 일정하게 하기 위하여 용존산소량은 용존산소측정기(DO meter, Orion DO850)로 수시 측정하여 부족한 부분은 공기펌프(air pump)를 이용, 산소를 공급하여 용존산소량(DOC)을 7±1ppm이 되도록 수소이온농도측정기(pH meter, Orion 720A)로 측정하여 보정하였다. 또한, 부식액의 온도는 제어판(control panel)의 자동온도조절장치를 이용하여 대체해수조건인 25±1℃로 제어시켰다. 그리고 부식액의 공급은 순환펌프(circulate pump)와 유량조절밸브를 사용하여 1L/min으로 하였으며, 부식생성물에 의한 영향을 막기 위해 부식액 공급장치의 여과기능을 0.5㎛로하여 여과한 후, 시험편 위에 적하시켰다.

인장시험의 결과를 토대로 피로하중을 설정하여 공기중에서 회전굽힘 피로시험을 실시하였다. 그리고 그 결과를 토대로 부식피로시험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노치의 효과

공기 중에서 평활 및 노치시험편의 회전굽힘 피로시험을 행한 결과를 S-N곡선을 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 도시하였다. 회귀직선은 통계적 피로시험방법으로 계산하였으며, 피로한도 수명은 10^7 반복회전수를 기준으로 하였다.

실험결과 공기 중에서 SM45C 평활시험편의 피로한도는 380.6MPa이고, 노치반경이 R6인 노치시험편의 피로한도는 361.1MPa이며, 노치반경이 R4인 노치시험편의 피로한도는 322.0MPa이고, 노치반경이 R2인 노치시험편의 피로한도는 224.4MPa로 나타났다.

따라서, 노치시험편의 경우 평활시험편에 비하여 노치반경이 R6일 때에는 5.1%의 피로한도 감소를 보였고, 노치반경이 R4일 때에는 15.4%의 감소를 보였으며, 노치반경이 R2일 때에는 41.0%의 피로한도가 감소하였다.

3% NaCl 수용액에서 SM45C의 평활 및 노치 시험편의 회전굽힘 피로시험 결과를 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9에 도시하였다. 3% NaCl 수용액에서 10^6 반복회전수를 기준으로한 시간강도는 SM45C 평활시험편이 245MPa이고, 노치반경이 R6인 노치시험편의 시간강도는 190MPa이며, 노치반경이 R4인 노치시험편의 시간강도는 175MPa이고, 노치반경이 R2인 노치시험편의 시간강도는 140MPa로 나타났다.

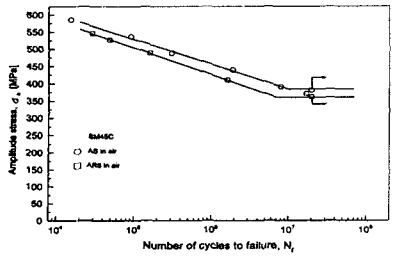


Fig. 2 S-N diagram of smooth and notched(R6) specimen in air

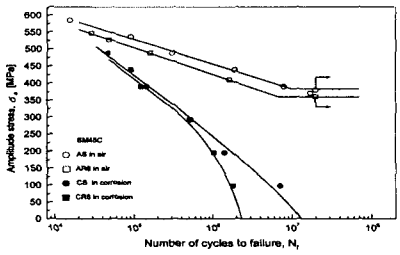


Fig. 6 S-N diagram of smooth and notched(R6) specimen in air and corrosion

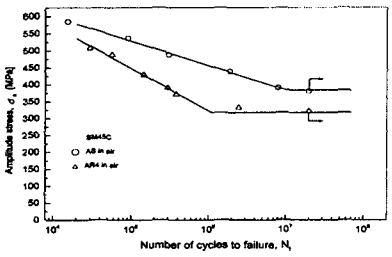


Fig. 3 S-N dagram of smooth and notched(R4) specimen in air

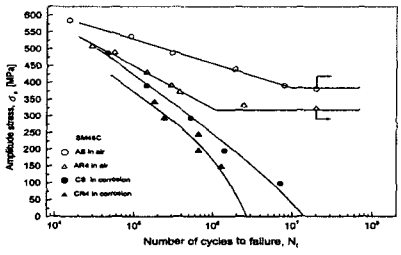


Fig. 7 S-N diagram of smooth and notched(R4) specimen in air and corrosion

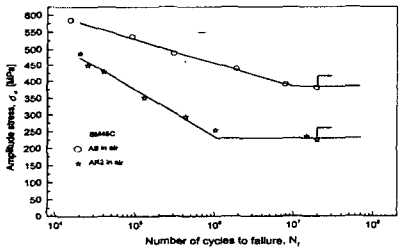


Fig. 4 S-N diagram of smooth and notched(R2) specimen in air

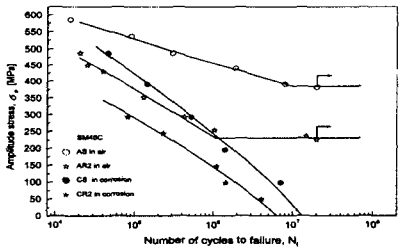


Fig. 8 S-N diagram of smooth and notched(R2) specimen in air and corrosion

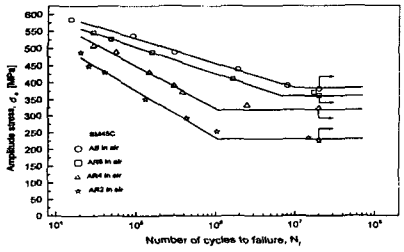


Fig. 5 S-N diagram of smooth and notched specimen in air

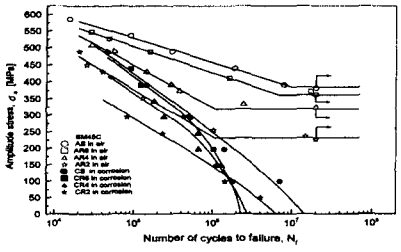


Fig. 9 S-N diagram of smooth and notched specimen in air and corrosion

특히 부식중에서의 S-N곡선의 결과는 Fig. 9에 나타난 것처럼 노치가 있으면 평활시험편에 비하여 시간강도가 감소하며, 큰 하중에서는 노치반경이 작을수록 시간강도가 낮으나 하중이 작아지면서 약 115MPa이하에서는 노치반경이 R2인 시험편은 노치반경이 R4, R6보다, 노치반경이 R4인 시험편은 노치반경이 R6인 시험편의 시간강도보다 높아 노치반경이 작을수록 시간강도가 크게 나타남을 알 수 있다.

따라서, 피로한도는 노치의 영향을 받으며 노치반경의 크기가 피로한도에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.2 부식의 영향

공기 중에서와 3% NaCl 수용액에서 SM45C의 평활 및 노치시험편의 회전굽힘피로시험 결과를 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에 도시하였다. 3% NaCl 수용액에서 10^6 반복회전수를 기준으로 한 시간강도는 SM45C 평활시험편이 245MPa이고, 노치반경이 R6인 노치시험편의 시간강도는 190 MPa이며, 노치반경이 R4인 노치시험편의 시간강도는 175MPa이고, 노치반경이 R2인 노치시험편의 시간강도는 140MPa로 나타났다.

10^6 반복회전수를 기준으로한 평활시험편의 시간강도는 공기 중에서 455MPa이고, 3%NaCl 수용액 중에서 245MPa로 공기 중에서의 시간강도에 비하여 46.2% 감소하였다.

노치반경이 R6인 노치시험편의 시간강도는 공기 중에서 425MPa이고, 3%NaCl 수용액 중에서 190MPa로 공기 중에서의 시간강도에 비하여 55.3% 감소하였으며 공기 중에서의 평활시험편에 비하여 공기 중 노치반경 R6은 6.6%, 부식액 중 노치반경 R6은 58.2% 감소하였다.

노치반경이 R4인 노치시험편의 시간강도는 공기 중에서 323MPa이고, 3%NaCl수용액중에서 175MPa로 공기 중에서의 시간강도에 비하여 45.8% 감소하였다

노치반경이 R2인 노치시험편의 시간강도는 공기 중에서 232MPa이고, 3%NaCl 수용액 중에서 140MPa로 공기 중에서의 시간강도에 비하여 39.7% 감소하였다.

공기 중 평활시험편의 시간강도를 기준으로 한 시간강도 감소 비율은 부식액 중에서의 감소율이 공기 중에서의 감소율보다 더 작아져 노치반경이 R6인 시험편의 경우는 51.6% 더 감소하였고, 노치반경이 R4인 경우는 32.5%, R2인 경우는 20.2% 더 감소하여 공기 중에서 보다 부식액 중에서 피로한도가 현저히 감소함을 알 수 있으며, 노치반경이 작을수록 감소율 폭이 작아지는 것은 노치반경이 작을수록 부식환경에 노출된 표면적이 적어져 노치반경이 큰 시험편에 비하여 부식의 영향을 적게 받는 것으로 생각된다.

노치반경의 크기가 같아도 3%NaCl 수용액 부식환경에서의 피로한도는 공기 중에서 보다 급격히 감소함을 알 수 있으며, 부식조건에 노출된 노치면적이 작을수록 피로한도 감소율이 작아짐을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 노치시험편의 미세한 요철부분이 부식환경에 노출되어 응력 집중에 의한 균열 선단부에 부식액이 쉽게 접촉하기 때문에 부식에 의한 영향이 증대되기 때문으로 생각된다.

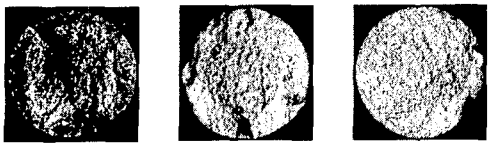
3.3 파단면 고찰

SM45C 시험편의 회전굽힘피로시험을 하여 피로파괴된 파단면의 형상을 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 10의 파단면 사진은 평활시험편의 공기 중에서 피로파괴된 단면을 나타내는데 (a)의 조건은 $N_f=5.06\times10^3$, $\sigma=683.1$MPa이며, (b)의 조건은 $N_f=3.06\times10^5$, $\sigma=487.9$MPa, (c)의 조건은 $N_f=7.95\times10^6$, $\sigma=390.3$MPa이다.

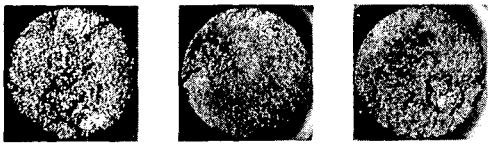
파단면 사진 (a)는 과하중을 받아 시험편 표면에 열이 발생하여 청열취성을 보이며 파단면이 거칠고 요철이 심하다.

파단면 사진 (b)는 비교적 큰 하중을 받는 경우로 과하중의 영향으로 시험편 원주의 표면 여러 곳에서 균열의 기점이 발생되어 초기에는 그 곳으로부터 독립적으로 균열이 진전되다가 성장, 합체하는 과정에서 거친 파단면을 형성하게 되고 시험편 내부로 균열이 진전되다가 시험편 내의 불순물 또는 조직의 불균일 등의 이유로 강도상 약한 부위에 최종적으로 합체되어 급속 파단되는 취성 파괴의 형태를 보이고 있으며 급속 파단부의 크기가 비교적 크게 보인다.



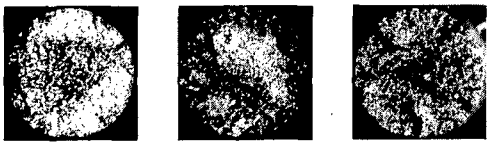
(a) N_f=5.60×10^3 σ=683.1MPa (b) N_f=3.06×10^5 σ=487.9MPa (c) N_f=7.95×10^6 σ=390.3MPa

Fig. 10 Optical fractography of SM45C in air (smooth specimen)



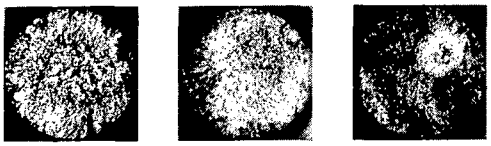
(a) N_f=4.03×10^4 σ=429.4MPa (b) N_f=4.30×10^5 σ=292.7MPa (c) N_f=1.48×10^7 σ=234.2MPa

Fig. 11 Optical fractography of SM45C in air (R2 notched specimen)



(a) N_f=4.63×10^4 σ=487.9MPa (b) N_f=1.41×10^6 σ=195.2MPa (c) N_f=7.12×10^6 σ=97.6MPa

Fig. 12 Optical fractography of SM45C in corrosion (smooth specimen)



(a) N_f=9.14×10^4 σ=439.1MPa (b) N_f=5.06×10^5 σ=292.7MPa (c) N_f=1.79×10^6 σ=97.6MPa

Fig. 13 Optical fractography of SM45C in corrosion (R6 notched specimen)

파단면 사진 (c)는 보다 작은 응력이 걸리는 경우로, 반복응력이 작아지면서 시험편 표면의 균열기점에서 고르게 연성파괴로 진전되다가 반복 응력에 견딜 수 없는 임계 단계에 도달해 급속 파단된 취성파괴 형태를 나타내고 있어 하중이 작아지면서 파단면이 고르고 평탄하며 급속 파단부가 작아진다.

Fig. 11은 노치반경이 R2인 노치시험편의 공기 중에서 피로파괴된 파단면을 나타내는데 파단면 사진 (a)와 같이 하중이 큰 경우에는 노치의 영향 및 과대 하중의 영향으로 노치가 없는 평활재처럼 크랙이 크고 요철이 심하며 파단면이 거칠다. 하중이 작아지면서 노치의 영향으로 평활재에 비하여 노치 표면 주변 전체에서 균열의 기점이 발생하여 내부로 진전되다가 급속 파단되는데 하중이 작아지면서 파단면이 평탄하고, 급속 파단부가 점점 작아진다.

Fig. 12는 평활시험편의 부식환경 중에서 부식피로파괴된 파단면을 나타내는데 큰 하중을 받는 경우에는 균열이 내부로 진전되면서 연성파괴가 일어나다가 외부 응력에 견딜 수 없는 임계 단계까지 성장되면 급속 파단되는 취성파괴를 보이며 급속파단부는 하중이 낮을수록 작아진다.

Fig. 13은 노치반경이 R6인 시험편의 부식환경 중에서 부식피로 파괴된 파단면을 나타내는데 비교적 작은 하중을 받는 경우에는 균열의 기점이 발생하여 시험편 내부로 균열이 진전되어 가는 과정에서 큰 하중의 파단면과 비교해 볼 때 평탄하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 최종 파단되는 영역 역시 큰 하중을 받는 시험편에 비해 작은 양상을 보이고 있다.

이것은 노치의 영향 및 부식의 효과로 평활 시험편에 비해 노치 주변 전체에서 균열의 기점이 발생하며 내부로 진전되어 파단면이 고르고 평탄하며, 큰 하중을 받는 시험편의 균열진전속도가 작은 하중을 받는 시험편에 비해 빠르며 급속하게 파단되면서 나타나는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SM45C재를 평활시험편과 노치반경이 R6, R4 및 R2인 노치시험편으로 가공하여 공기 중 및 3% NaCl 수용액 중에서 회전굽힘피로시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공기 중에서 10^7 반복회전수를 기준으로한

피로한도는 노치반경이 작아질수록 피로한도가 현저하게 감소함을 확인할 수 있다.

2. 3% NaCl 수용액 중에서 10^6 반복회전수를 기준으로한 시간강도는 노치반경이 작을수록 시간강도의 감소 폭이 커짐을 알 수 있다.

3. 공기 중과 3% NaCl 수용액 중에서 10^6 반복회전수를 기준으로한 시간강도는 공기 중의 시간강도에 비하여 평활시험편의 경우 46.2%, 노치반경 R6인 경우 55.3%, 노치반경 R4인 경우 45.8%, 노치반경 R2인 경우 39.7% 감소하였다.

4. 노치반경이 작을수록 시간강도의 감소율 폭이 작아지는 것은 부식환경에 노출되는 노치면의 표면적이 적어져 부식에 의한 손상을 적게 받는데 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

References

1. 石橋定, 1976, *金屬の疲勞と破壞の防止*, 養賢堂, pp.9~12, pp.112~130.
2. 日本機械學會, 1995, *機械工學便覽事典*, pp. A4 112~117.
3. R.E. Peterson, 1974, *Stress Concentration Factors*, New York, J. Wiley.
4. 이강용, 1994, *材料學動學*, 喜重堂, pp.58~59.
5. 腐蝕防蝕協會, 1980, *金屬防蝕技術便覽*, 서울, 機電硏究社, p.113.
6. 酉島敏, 舟久保熙康, 1973, *金屬の疲れ*, 丸善, pp.291~292.