

STS304강의 순수 및 외팔보형 굽힘 피로에 대한 파괴확률 특성

노성국* · 박대현** · 정순억***

Fracture Probability Properties of Pure and Cantilever Bending Fatigue of STS304 Steel

Sung-Kuk Roh, Dae-Hyun Park and Soon-Uk Jeong

Key Words: Notched Specimen(노치시편), Smoothed Specimen(평활시편), Fracture Probability(파괴 확률), P-S-N Curve(P-S-N곡선), Weibull Distribution(Weibull분포), Confidence limit(신뢰한계).

Abstract

Big accidents of flyings, vessel, subways, gas equipments, buildings and bridge happens frequently. Therefore many people are suffering harm of property. The destruction cause of machine components is almost accused by fatigue. This study is test for STS304 specimen using pure and cantilever bending state. Rounded specimen and notched specimen including fracture surface investigation was comparatively experimented, fatigue life according to degree of surface finishing was examined. Fatigue fracture probability of notched cantilever specimens were predicted by P-S-N curve, median rank and Weibull distribution. And at the relation with the rotational speed and stress, the fatigue life of the test specimen was higher at high speed than low speed.

1. 서론

어떤 금속에 매우 작은 응력(stress)이라도 반복해서 부하 하였을 때, 그 물체의 전체에 걸쳐서 혹은 국부적으로 미끄럼 변형이 생기고 시간과 더불어 변화하는 것을 피로(fatigue)¹⁾라 한다. 그리고 어떤 한도까지 반복 응력(repeat stress) 또는 변동 응력(varying stress)을 받아서 피로가 진행하여 파단 한 것이 피로파괴(fatigue fracture)이다²⁾.

기계구조물은 응력 진폭이나 평균 응력이 변하는 변동 하중을 받는 경우가 많다.

이러한 응력 하에서의 피로강도(fatigue strength) 및 피로 수명(fatigue life) 예측은 실제 기계 구조물의 설계에 있어서 대단히 중요하다. 최근 국내에서는 항공, 선박, 지하철, 가스 시설, 건축물, 교량 등 구조물의 대형 사고가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산의 손실을 겪고 있다.

이같은 현상은 부실 시공 및 관리 미숙 등의 원인에 의한 것으로 밝혀졌다. 그리고 산업의 발전과 더불어 대형화, 고속화, 경량화가 진전되어 가고 있어서 이 또한 사고의 위험증가의 한 원인으로 밝혀지고 있다. 또한 그 안정성, 내구성 및 경제성이 중요시되고 있다. 이런 구조물들에는 많은 경우에 있어 불가피하게 존재하는 것으로 생각되는 결함으로부터 하중을 반복하여 받아 균

* 회원, 경상대학교 대학원 기관공학과

** 경상대학교 대학원 기관공학과

*** 회원, 경상대학교 수송기계공학부

열이 발생 전파하는 피로 거동이 문제가 된다³⁾. 피로에 의한 파괴는 전체 기계적 파손의 거의 절반 혹은 그 이상을 차지하고 있다.

그러나 대부분의 피로시험 보고는 순수굽힘(pure bending)이나 비틀림(torsion)피로에 한정되며 외팔보형(cantilever type)의 파괴확률 실험 데이터는 찾아보기 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 순수굽힘 및 외팔보형 피로 특성을 충분히 파악하고자 STS304스테인리스강의 환봉 시험편에 노치(notch)⁴⁾를 준 환봉(round bar)의 피로에 의한 파단(fracture)과 회전수를 달리 하였을 경우에 수명 연장과 단축에 대하여 조사하고, 각각의 응력과 사이클 수에 대한 P-S-N곡선, 50% rank선도를 그리고 Weibull 분포등의 파괴확률 특성을 알아보하고자 한다.

2. 2장 시험편 및 실험방법

2.1 실험기 및 시험편의 형상

본 실험에 사용된 시험편의 화학성분은 Table 1과 같고 기계적 특성은 Table 2⁸⁾와 같다.

Table 1 Chemical composition of STS304 material(wt%).

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0.06	1.56	0.45	0.024	0.027	18.11	8.18

본 논문에서 사용한 시험기⁵⁾는 Fig. 1의 캔티레버식의 회전굽힘 시험기를 사용하였으며, 직경 ϕ 의 시험편 표면에서 최대인장 응력은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma = \frac{32PL}{\pi\phi^3} \dots \dots \dots (1)$$

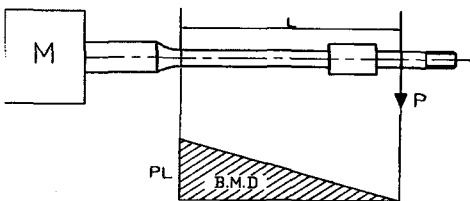


Fig. 1 Bending moment distribution of cantilever fatigue test machine.

다음의 Fig.2은 4점 하중 회전굽힘 시험기를

사용하였을 경우를 나타내며, 직경 ϕ 의 시험편 표면에서 최대 인장 응력은 다음과 같이 주어진다

$$\sigma = \frac{16PL}{\pi\phi^3} \dots \dots \dots (1)$$

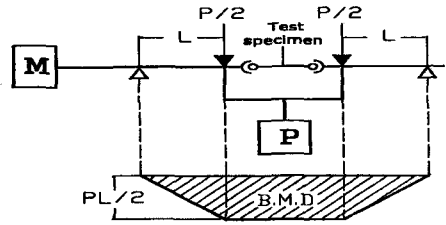


Fig. 2 Bending moment distribution of pure rotary bending fatigue test machine.

2.2. 실험조건

본 실험에서는 시험기의 회전수 및 응력을 일정히 주었으며, 하중을 부가시킬 때 충격이나 편심 하중이 걸리지 않도록 했으며, 시험편의 평행부와 라운드부분의 노치현상을 없애기 위해 R13.5로 라운딩 처리를 행하였다.

본 실험에 사용한 시험편의 모양 및 치수는 Fig. 3에 도시하였으며, 시험에 사용된 시험편은 Wohler의 시험편을 근거로 하여 제작하였다¹⁾.

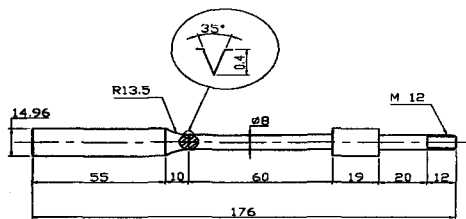


Fig. 3 Profile of cantilever fatigue test specimen.

아래의 Table 3은 노치재와 평활재의 시험 데이터이다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2 Mechanical properties of the base metal.

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation(%)	Reduction of Area(%)	Hardness (H _B)
STS 304	248.136	592.9	62	75	153

Table 3 Fatigue test data between stress and number of cycle at 142RPM

NO.	Notched		Round	
	Stress, σ (MPa)	Number of Cycle	Stress, σ (MPa)	Number of Cycle
1.	450	1907	1100	45
2.	430	2379	1010	85
3.	400	3952	950	154
4.	360	8965	900	213
5.	350	6669	850	344
6.	340	5609	810	1048
7.	330	13828	750	1822
8.	320	17951	680	4863
9.	310	8965	680	5975
10.	300	14096	640	9585
11.	290	18886	610	26412
12.	280	21750	610	33626
13.	270	31910	600	53809
14.	260	18567	570	110878
15.	250	40845	550	367212
16.	240	41156	550	387838
17.			530	2507860

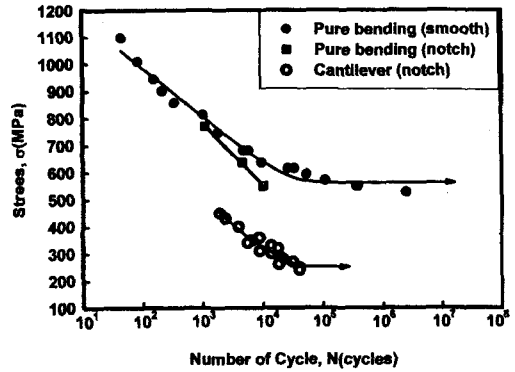


Fig. 4 Relationship between smoothed and notched specimen.

홈의 깊이 t 가 감소할수록 t 는 0에 가까워진다. 만약, $t = 0$ 이면 응력집중계수 α 는 1이 된다. $\alpha=1$ 은 평활재의 시험편과 같다. 따라서, t 가 작아질수록 수명이 길어짐을 알 수 있다.

그리고 파단까지의 회전 수명은 응력이 감소할수록 길어짐을 알 수 있다.

3.1 평활재와 노치재의 영향

Fig. 4는 순수굽힘 피로시험에서의 평활재와 외팔보형 굽힘 피로시험에서의 노치재를 비교한 것으로서 시험편을 동일한 회전수(RPM=142)에서 각각의 다른 응력하에서 실험 하였을 때 응력에 따른 회전수의 변화를 나타내었다.

실험에 따른 결과는 Table 3에 나타내었으며, 또한 노치재의 피로시험은 작용응력이 240인 상태에서 점차적으로 소정의 하중까지 증가 시켜서 시험하였다.

실험에서 홈의 깊이를 $t=0.40$, 홈저의 곡률 반경 $\rho=0.2R$ 이며, 굽힘 응력집중계수 $\alpha^{(9)}$ 는 $\alpha=1+2\sqrt{\frac{t}{\rho}}=1+2\sqrt{\frac{0.40}{0.2}}=3.819\cdots(1)$ 이다.

3.2 표면가공의 영향

동일 조건하에서 표면 거칠기가 파괴에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같은 3가지 실험을 하였다.

표면 거칠기를 나타내는 가공면 조도 R_{max} 는 다음과 같으며

$$R_{max} = \frac{f^2}{8r} \cdots \cdots \cdots (2)$$

R_{max} : 가공면 조도(mm)

f : 이송(mm/rev), r : 인선반경(mm)이다.

3가지 평활재 환봉 시험편의 조도는 Table 4에 나타냈다.

Table 4. Roughness of cutting surface.

구분	f(mm/rev)	r(mm)	Rmax(mm)
경면연마	0.01	0.2	6.250×10^{-3}
정삭	0.15	0.2	1.406×10^{-2}
황삭	1	0.2	6.250×10^{-1}

이송 f 가 적을수록 가공면 조도 Rmax가 작아지는 것을 알 수 있으며, 그 결과 Fig. 5에서 표면 거칠기에 따른 응력 σ 와 회전수의 변화를 관찰할 수 있다.

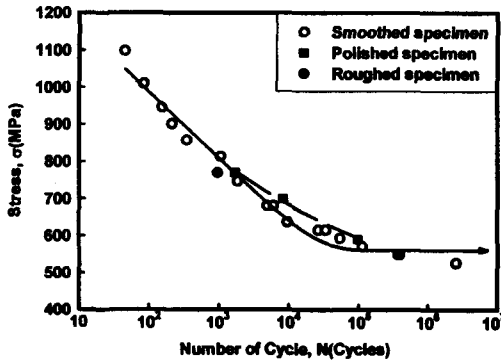


Fig. 5 Relationship between Roughness and number of cycle of specimen.

따라서, 표면 거칠기에 따른 시험편의 수명은 $\sigma = 770$ 일 때 조도 Rmax가 낮을수록 길어짐을 알 수 있다. 하지만, 피로한도에 가까워짐에 따라 큰 차이가 없어지는 것으로 나타났다.

그 이유는 고응력부에서 표면거칠기의 영향이 커지기 때문으로 사료된다.

3.2 P-S-N 곡선

다음에 나타낸 P-S-N곡선은 S-N시험법에 의한 Table 3의 데이터를 이용하여 구한 것이며, P=10%, 90%의 P-S-N곡선은 50%에 대한 S-N곡선을 24MPa씩 수직이동 한 것에 의해 구했다.

P=50% 일 때 P-S-N의 상관관계식은 다음과 같은 최종식이 도출 되었다.

$$\text{Log}N = 6.2598 - 0.0068S \dots \dots \dots (2)$$

S-N곡선법에 의한 시험데이터에서 결정되어진 Fig.6의 P-S-N곡선은 P=10~90%의 범위에 한하는 응력과 수명의 관계가 나타났다.

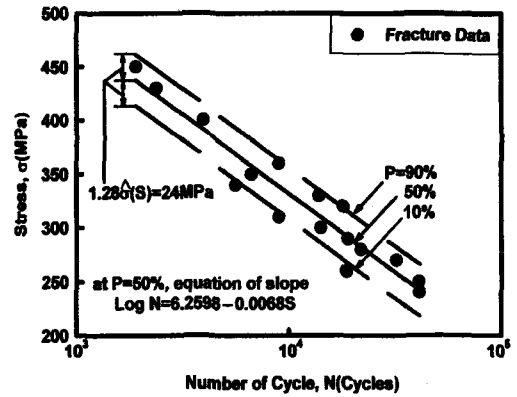


Fig. 6 P-S-N curve at 142RPM.

RPM을 다르게 하였을 경우 저속일 때 보다도 고속일 때 더 늦게 파단이 일어났으며, 이는 재료의 소성변형에 대한 저항이 서서히 부가할수록 작아지는 현상과 관계가 있는 것으로 사료된다.

다음의 Fig. 7은 응력과 수명의 상관관계에서 RPM에 따른 변화에 따른 응력과 수명의 상관관계식⁷⁾은 다음과 같이 나타났다.

$$\begin{aligned} \text{RPM} = 57.5, \text{Log}N &= -0.00705 S + 6.226 \\ \text{RPM} = 142, \text{Log}N &= -0.0068 S + 6.2598 \dots \dots (3) \\ \text{RPM} = 312, \text{Log}N &= -0.00770 S + 6.633 \end{aligned}$$

그리고, RPM 변화를 고려한 최종식은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{Log}N = -7.183 \times 10^{-3} S + (1.685 \times 10^{-3} \text{RPM} + 6.0856) \dots \dots (4)$$

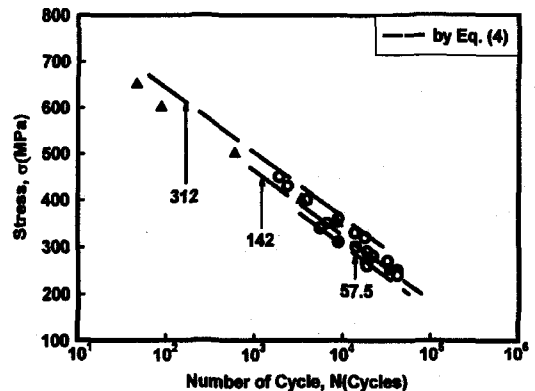


Fig. 7 Relationship between number of cycle and stress according to RPM.

식(4)에 의한 결과를 Fig.7에 도시한 결과 실제

실험 데이터와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.4 Weibull분포의 구간추정

2모수 Weibull 분포의 구간 추정^{5),6)}을 위하여 Table 5를 이용하여, 파단확률과 회전수의 상관성을 Fig. 8에 나타내었다.

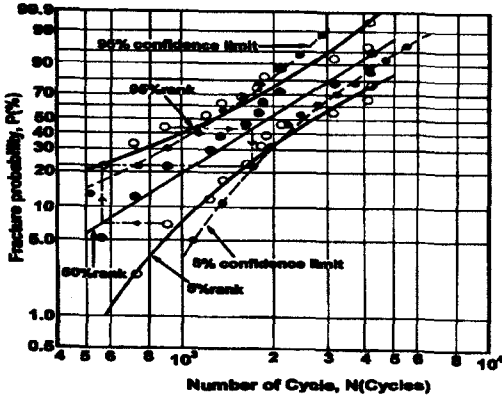


Fig. 8 2-Parameter Weibull distribution.

Fig. 8에서 파단확률 50%는 평균 rank에 의한 수명 데이터를 나타낸 것으로서, P = 5~95%의 rank에 의한 상관성이다.

수명의 5~95% 신뢰구간을 나타내는 예로서 1.5×10^5 의 경우 90%의 신뢰구간은 파단확률 약 22~67%로 나타났다. 그리고 50% weibull 분포식은 다음과 같이 나타났다.

Table 5 Fatigue data, median, 5% and 95% rank (n=12)

No	Number of Cycle	Probability Distribution (%)	5% Line	95% Line
1	5609	5.613	0.427	22.092
2	6669	13.598	3.046	33.868
3	8965	21.669	7.187	43.811
4	13828	29.758	12.285	52.733
5	14096	37.853	18.102	60.914
6	17951	45.951	24.530	68.476
7	18567	54.049	31.524	75.470
8	18886	62.147	39.086	81.898
9	21750	70.242	47.267	87.715
10	31910	78.331	56.189	92.813
11	40845	86.402	66.132	96.954
12	41156	94.387	77.908	99.573

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{2.25 \times 10^4}\right)^{1.791}} \dots\dots\dots(5)$$

3.5 평균 rank에 의한 파괴확률 분포

50%파괴확률과 피로수명의 상관관계⁸⁾를 Fig. 9에 나타냈다. 임의의 피로수명에서 파괴확률을 예측 할 수 있으며, 응력 단계가 다르더라도 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

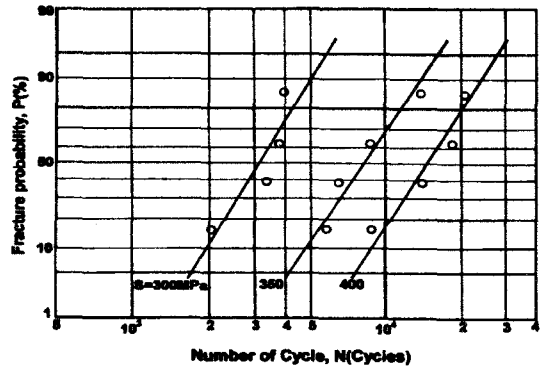


Fig. 9 Relationship between median rank and number of cycle.

3.6 파단면의 조사

본 실험에서 사용한 STS304강의 외팔보형 굽힘 피로 시험편의 파단면 부위를 확대하여 관찰한 결과를 Fig. 10에 나타냈다.

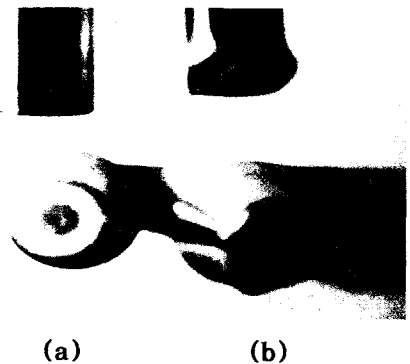


Fig. 10 Photographs of notched and smoothed specimen.

Fig. 10의 (a)는 노치재 시험편의 등근 파단부 위의 단면을 촬영한 것이며, 노치재의 파단면은 노치선단에서 점진적인 균열의 진전으로 중앙부에 등근 최종 파단부를 선명하게 보이며, 파단이 깨끗이 일어났음을 알 수 있다. 노치를 부가하지 않은 평활 시험편인 (b)의 경우 round부 경계에서 응력집중에 의하여 표면부에 미소균열이 발생하고 시험편 전체로 진전하여 파괴에 이르는 것으로 나타났으며, 파단면은 날카롭고 거칠게 일어난 것을 볼 수 있다.

4. 결론

STS 304스테인리스강의 외팔보순수굽힘 및 피로시험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1)노치재가 평활재보다 응력집중으로 인하여 피로수명이 짧게 나타났으며, RPM이 높을수록 피로수명이 길게 나타났다. 이 때 RPM을 고려한 피로수명식은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{Log}N = -7.183 \times 10^{-3} S + (1.685 \times 10^{-3} \text{RPM} + 6.0856)$$

2)Weibull 분포에 의한 통계적 구간추정이 가능 하였으며, 50% 파괴확률 상관계식은 다음과 같이 나타났다.

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{2.25 \times 10^7}\right)^{1.71}}$$

3)P-S-N곡선과 응력 변화에 따라 평균 rank에 의한 파괴확률 선도가 정량적으로 나타났으며, 50%P-S-N 상관계식은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{Log}N = 6.2598 - 0.0068S$$

4)평활재의 시험편의 파단면은 날카롭고 거칠게 일어났으며, 또한 노치재의 파단면은 중앙부에서 미소균열의 파단이 깨끗이 일어났음을 알 수 있다.

참고문헌

(1) 이택순, 1991. 재료시험. 형설출판사. pp. 16~

142

- (2) 오세욱, 오환섭, 김상태, 오환교, 1994. 재료시험입문, 원광출판사. pp. 185
- (3) 이용복, 정진성, 조남익, 1996. "SS330 용접재에서 재분포 잔류응력 및 균열 단합 영향을 고려한 피로 거동에 관한 연구." 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2234~2235
- (4) 오세욱. 1990. 재료역학. 동명사. pp. 8~440
- (5) American Society for Metals, 1985. "Metars Handbook Ninth Edition." Vol,8, pp. 370~371
- (6) H.O.Fuchc, R.I.Stephens, 1980. "Metal Fatigue in Engineering." John Wiley & Sons, Inc. pp. 94~99
- (7) 日本機械學會, 1981. "JSME 日本機械學會 基準 統計的 疲勞試驗 方法." 日本機械學會. pp. 22~41
- (8) 丁劍, 西田新一, 服部信祐, 2000. "SUS304軸力疲勞特性に及ぼすひずみ時効および過大應力の影響." 日本機械學會論文集(A編), 66卷 647号. pp. 1331~1336
- (9) 서창민, 서덕영, 이동재, 1995. "HSS-Co와 SM55C 이종 마찰용접재의 피로강도에 관한 연구(2)." 대한기계학회논문집(A), 제19권, 제4호, pp. 931~932.