

STS304강의 비틀림 피로파괴 확률특성

박대현* · 정순억*

Fracture Probability Properties of Torsion Fatigue of STS304 Steel

Dae-Hyun Park, Soon-Uk Jeong

Key Words: Fracture Probability(파괴 확률), P-S-N Curve(P-S-N곡선), Weibull Distribution(Weibull분포), Confidence Limit(신뢰한계)

Abstract

This study is test for STS304 specimen using bending and torsion 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 canilever 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. If summarize STS304 torsion result of fatigue test, is as following. Fatigue life prediction was available by Weibull statistics distribution, and 50% breakdown probability correlation equation was appeared as following.

1. 서 론

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, 가스시설, 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 발

전과 더불어 대형화, 고속화, 경량화가 진전되어가고 있어서 이 또한 사고의 위험증가의 한 원인으로 밝혀지고 있다. 또한 그 안정성, 내구성 및 경제성이 중요시되고 있다. 이런 구조물들에 많은 경우에 있어 불가피하게 존재하는 것으로 생각되는 결함으로부터 하중을 반복하여 받아 균열이 발생 전파하는 피로 거동이 문제가 된다³⁾. 피로에 의한 파괴는 전체 기계적 파손의 거의 절반 혹은 그 이상을 차지하고 있다.

† 경상대학교 대학원 기관공학과

* 경상대학교 기계항공공학부

E-mail : sujeong@gaechuk.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3126 FAX : (055)640-3128

그러나, 대부분의 피로시험 보고는 순수굽힘(pure bending)이나 비틀림(torsion)피로에 한정된다.

따라서, 본 논문에서는 비틀림 피로 특성을 충분히 파악하고자 STS304스테인리스강의 환봉 시험편에 노치(notch)⁴⁾를 준 환봉(round bar)의 피로에 의한 파단(fracture)과 응력 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. 시험편 및 실험방법

2.1 실험기 및 시험편의 형상

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 실험에 사용된 시험편의 화학성분은 Table 1과 같다.

본 논문에서 사용한 시험기⁵⁾는 Fig. 1의 비틀림 시험기를 사용하였으며, 각도 θ 의 시험편 표면에 서 최대인장 응력은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{Gr\theta}{l} \dots \dots \dots (1)$$

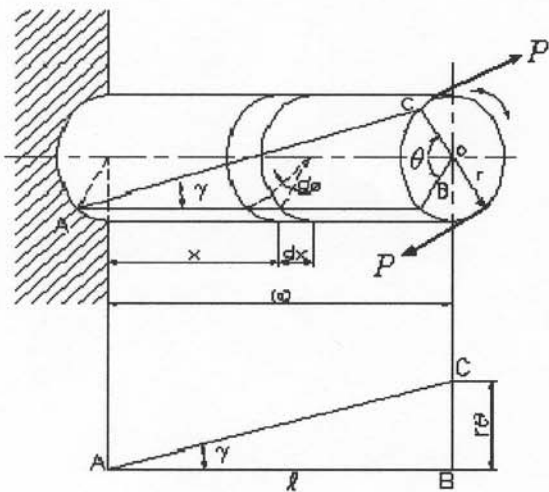


Fig 1 Schematic diagram of torsion fatigue test.

2.2 실험조건

본 실험에서는 시험기의 전단 응력을 일정하게 주었으며, 비틀림을 부가시킬 때 충격이나 편심 하중이 걸리지 않도록 했으며, 시험편의 평행부와 라운드부분의 노치현상을 없애기 위해 R15로 라운드 처리를 행하였다.

본 실험에 사용한 시험편의 모양 및 치수는 Fig. 2에 도시하였으며, Photo.1은 실제시험편의 사진이다. 시험에 사용된 시험편은 Wohler의 시험편을 근거로 하여 제작하였다¹⁾.

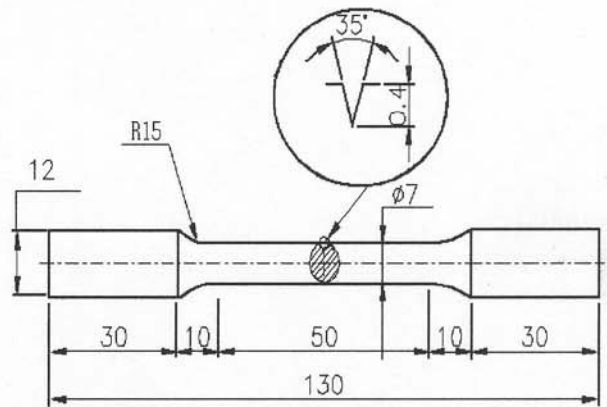


Fig. 2 Profile of torsion fatigue test specimen.

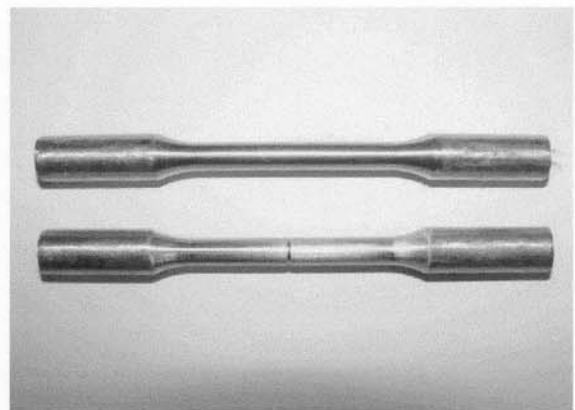


Photo. 1 Photograph of fatigue test smooth and notch specimens.

Table 2 Fatigue test data between stress and number of cycle.

no.	Stress, τ (M Pa)	Number of Cycle	Stress, τ (M Pa)	Number of Cycle
Notched		Round		
1	103.4	112	103.9	1907
2	103.0	152	103.6	2084
3	102.8	168	102.0	2304
4	78.0	325	102.3	1440
5	77.8	256	79.897	6808
6	77.4	320	79.238	8064
7	52.1	736	78.798	10216
8	51.8	640	78.469	7616
9			53.655	44320
10			51.524	37120
11			51.303	33504
12			51.230	13088

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비틀림피로에 미치는 노치의 영향

Fig. 3은 비틀림 피로시험에서의 평활재와 노치재의 피로시험에서 비교한 것으로서 시편을 각도($\theta=12^\circ, 9^\circ, 6^\circ$)에서 각각의 다른 전단 응력하에서 실험 하였을 때 전단응력에 따른 cycle의 변화를 나타내었다.

실험에 따른 결과는 Table 2에 나타내었으며, 또한 노치재의 피로 시험은 작용 비틀림 각이 $\theta=6^\circ$ 부터 소정의 비틀림 각 까지 증가 시켜서 시험 하였다.

실험에서 홈의 깊이를 $t=0.40$, 홈저의 곡률 반경 $\rho=0.2R$ 이며, 굽힘 응력집중계수 $a^8)$ 이다.

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}} = 1 + 2\sqrt{\frac{0.40}{0.2}} = 3.819 \dots \dots (2)$$

홈의 깊이 t 가 감소할수록 t 는 0에 가까워진다. 만약, $t = 0$ 이면 응력집중계수 a 는 1이 된다.

$a=1$ 은 평활재의 시험편과 같다. 따라서, t 가 작아질수록 수명이 길어짐을 알 수 있다.

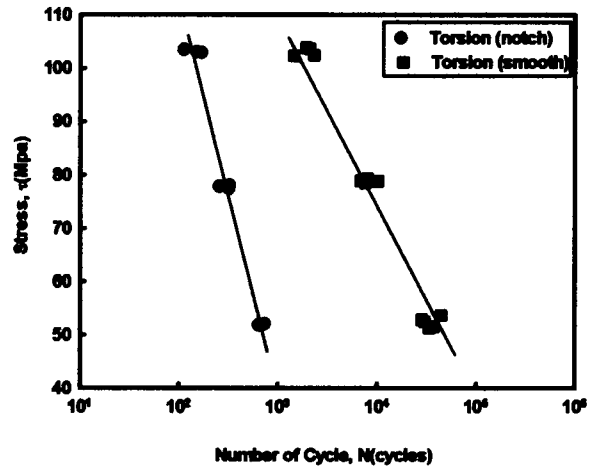


Fig. 3 Relationship between smoothed and notch specimen.

그리고 파단까지의 cycle은 전단응력이 감소할수록 길어짐을 알 수 있다.

Fig. 6는 비틀림 피로시험에서의 노치실험과 외팔보형 굽힘 피로시험 하였을 때 응력에 따른 cycle 변화를 나타내었다.

3.2 P-S-N 곡선

Fig. 4에 나타낸 P-S-N곡선은 S-N시험법에 의한 Table 2의 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 같

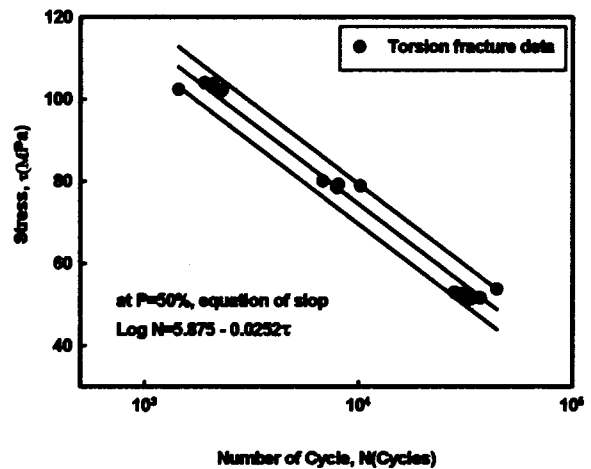


Fig. 4 P-S-N curve of smooth specimen.

은 최종식이 도출 되었다.

$$\text{Log}N = 5.875 - 0.0252\tau \dots\dots\dots (3)$$

S-N곡선법에 의한 시험데이터에서 결정되어진 Fig.7의 P-S-N곡선은 P=10~90%의 범위에 한계는 응력과 수명의 관계가 나타났다.

3.3 비틀림 피로가 정적강도에 미치는 영향

Table. 3 식(4)을 이용하여 각각의 전단응력 하에서 비틀림 피로 실험하여 최종 파단수명의 50%와 80%를 소비한 후 인장실험 한 결과를 나타낸 표이다.

Table. 3 Tensile test deta.

Shear stress, τ (MPa)	Life consumption	Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)
0	0%	648	36	79
0		682	34	77
103.28	80%	631	24	47
102.70		632	25	48
102.58		618	24	45
102.58		603	24	47
77.58		635	28	56
77.47		637	25	62
77.37		653	26	67
53.28		664	27	75
52.00		679	34	76
51.70		695	35	75
51.45		682	34	78
104.90	50%	572	31	61
103.14		628	27	59
103.14		628	28	60
102.11		637	26	69
77.90		631	27	68
77.47		636	30	69
77.47		635	31	71
77.14		645	34	74
52.18		651	35	79
52.18		646	35	79
51.67		662	36	78
49.76		661	37	78

3.3.1 최대강도의 영향

Fig. 5는 비틀림 피로 파단수명의 80%, 50%에서 인장실험 하였을 때 최대인장강도를 나타내

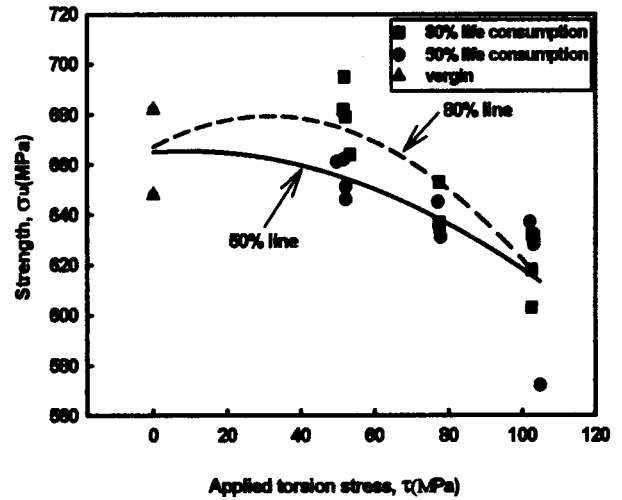


Fig. 5 Relation between applied torsion stress and strength.

었다. 전반적으로 최대인장 강도는 피로 수명 50%일 때 보다 80%일 때 가 높은 것으로 나타내었다. 특히 비틀림 각 약 6°(50MPa)에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났다. 이것은 비틀림 피로에 의하여 재료경화가 일어나 인장강도가 높아진 것으로 사료된다.

3.3.2 연신율의 영향

Fig. 6은 비틀림 피로 파단수명의 80%, 50%를 소비하여 인장실험 하였을 때 연신율과 전단응력의 관계를 나타내었다.

여기서, 피로수명의 80%일 때 보다 50%일 때 연신율이 높은 것으로 나타났다.

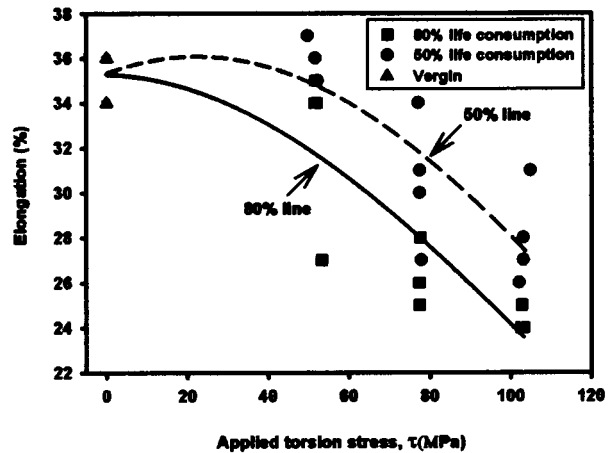


Fig. 6 Relation between applied torsion stress and elongation.

이것은 80%일 때 시료가 피로에 의하여 그 내부에서 50%일 때 보다 손상이 많이 일어나 재료의 연성이 감소한 것으로 사료된다.

3.3.3 단면수축률의 영향

Fig. 7은 비틀림 피로 파단수명의 80%, 50%를 소비하여 인장실험 하였을 때 단면수축률과 전단응력의 관계를 나타내었다.

여기서 단면수축률도 연신율과 마찬가지로 80%의 수명을 소비한경우가 50%의 수명을 소비한 경우가 단면수축이 작게 일어난 것을 볼 수 있었다.

이것은 비틀림 피로에 의하여 재료가 경화되어 단면 수축은 비틀림 각이 커질수록 단면수축률이 적어지는 것으로 사료된다.

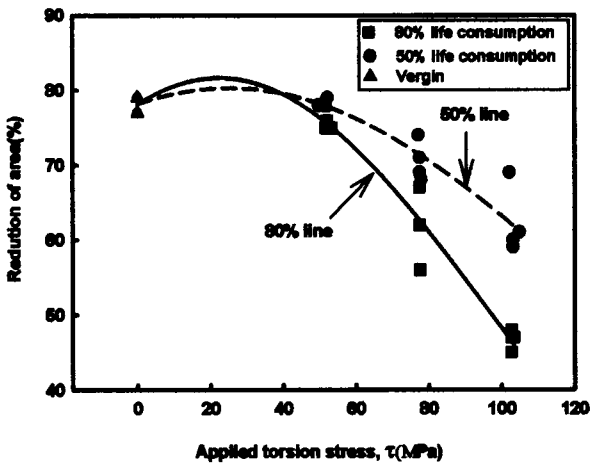


Fig. 7 Relation between applied torsion stress and reduction of area.

3.4 Weibull분포의 구간추정

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

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 1.5×10^3 의 경우 90%의 신뢰구간은 파괴확률 약 22~67%로 나타났다. 그리고 50% weibull 분포식은 다음과 같이 나타났다.

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{2.048 \times 10^4}\right)^{1.548711}} \dots \dots \dots (4)$$

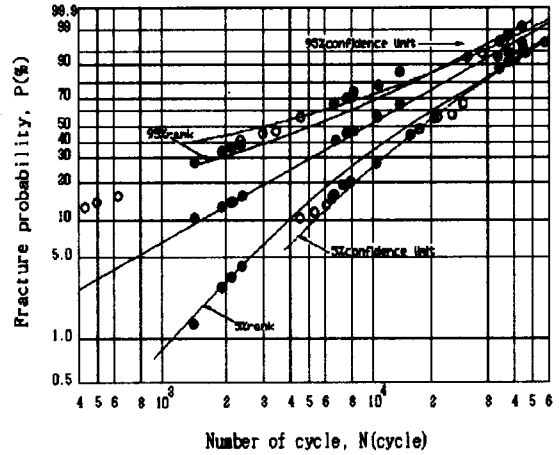


Fig. 8 2-Parameter Weibull distribution.

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{1.3059 \times 10^4}\right)^{0.99412}} \dots \dots \dots (5)$$

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{5.843 \times 10^3}\right)^{0.774872}} \dots \dots \dots (6)$$

3.5 파단면 조사

Photo. 2는 비틀림 피로시험의 파단 된 시험편의 사진이다. 여기서 (c) 12°, (b) 9°는 응력 집중으로 인하여 그 파단이 직각으로 일어났고, (c) 12°일 때 보다 (b) 9°일 때가 파면이 더 거칠어진 것을 볼 수 있다.

(a) 6°는 그 파면이 거칠고 불규칙하게 일어나 전형적인 비틀림 파괴의 형상인 스타(star) 파단이 일어난 것을 볼 수 있다.

따라서 비틀림 실험결과 비틀림 전단응력이 높아질수록 그 파단은 직각에 가깝게 일어났고, 파면이 매끄러운 것으로 나타났다.

그리고 비틀림 전단응력이 낮아질수록 그 파면이 불규칙적이고 날카롭게 일어난 것을 알 수 있다. 여기서 (c) 12°의 경우 미소균열이 시험편 표면으로부터 진전하여 정중앙부에서 약 10%떨어진 지점에서 전단응력이 0가되어 최종 파단이 일어났고, (b) 9°의 경우 중앙부에서 약 20%떨어진 지점에서 전단응력이 0가되어 그 최종 파단이 일어난 것을 볼 수 있었다. (d) 노치제의 경우는 정중앙부에서 전단응력이 0가되어 파단이 일어났다.

이것으로서 응력집중계수가 높을수록 최종파단은 중앙부에 근접함을 알 수 있었다.

(a) 6°의 경우는 균열이 어느 한 점에서부터 진

전하여 전체적으로 갑작스럽게 그 파단이 일어난 것을 볼 수 있었다.

Photo. 2를 2000배율로 확대하여본 결과 6°는 경화에 의한 벽계파괴가 일어났으며, 매우 불규칙하여 균열이 진전하는 것을 확인할 수 있었다. 9°, 6°노치재의 경우는 경화와 연화현상이 비슷하게 나타났다. 12°의 경우는 연화현상에 의해 파단된 것이 나타났다. 여기서 9°는 1 cycle 에 균열이 약 23 μ m씩 진전하고 12°의 경우 균열이 약 30 μ m정도 진전하는 것을 볼 수 있었다.

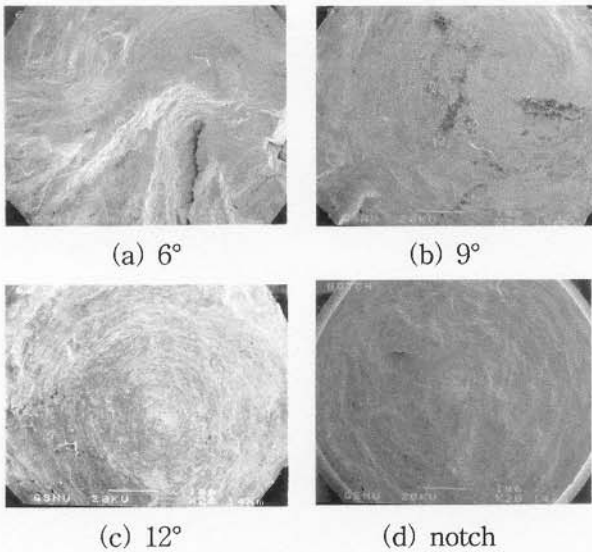


Photo.2 SEM of STS304 steel torsion specimen.

4. 결론

STS 304스테인리스강의 비틀림 피로시험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 노치재가 평활재보다 응력집중으로 인하여 피로수명이 짧게 나타났으며, 비틀림 전단응력이 높을수록 수명이 짧게 나타났다.

2) Weibull 분포에 의한 통계적 구간추정이 가능하였으며, 5%, 50%, 90% 파괴확률 상관관계식은 다음과 같이 나타났다.

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{2.048 \times 10^4}\right)^{1.568711}}$$

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{1.3059 \times 10^4}\right)^{0.99412}}$$

$$F(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{5.843 \times 10^3}\right)^{0.7716372}}$$

3) P-S-N곡선에서 응력 변화에 따라 에 의한 파괴확률 선도가 정량적으로 나타났으며,

50%P-S-N상관관계식은 다음과 같다.

$$\text{Log}N = 5.875 - 0.0252\tau$$

4) 비틀림 실험결과 비틀림 전단응력이 높아질수록 그 파단은 연성파면이 증가하여 비틀림을 받지 않은 단순인장파괴 현상에 접근함을 알 수 있었다.

후기

이 논문은 2002학년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Felbeck, David K, 1996, "Notch brittleness and toughness/Strength ratios", Strength and fracture of engineering solids, Prentice Hall, pp, 339~340
- (2) 오세욱, 오환섭, 김상태, 오환교, 1994, "피로 시험", 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, "피로", 재료역학, 동명사, pp. 440~451
- (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) 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