

SNCM220 강 권축의 열처리를 통한 기계적성질 향상

이 호 성*, 김 현 철**, 임 경 빈***, 임 병 수****

The Improvement of SNCM220 Winding Shaft in Mechanical Properties by Heat Treatment

H. S. Lee*, H. C. Kim**, K. B. Yim***, B. S. Lim****

Abstract

To find out the reason of fracture, specimens were made from the fractured winding shaft and the mechanical properties as well as their microstructures were investigated. Several heat treatments, including carburizing and tempering, were carried out to improve the microstructure, mechanical properties, fatigue crack propagation and rotating bending fatigue characteristics. Through these experiments, following conclusions were obtained. (1) Carburized and tempered specimens showed greatly improved mechanical properties including impact energy, hardness and strength. (2) The fatigue strength of the carburized and tempered specimens increased more than twice than that of the original fractured winding shaft. (3) Crack propagation of the carburized and tempered specimens were faster than that of the original fractured specimens under the same ΔK . However, it is believed that, in the early stage, the fatigue crack initiation and growth for the carburized and tempered specimen is more difficult.

Keywords : Winding Shaft(권축), Fatigue Limit(피로한도), Fatigue Crack Propagation(피로균열전파), Rotating Bending Fatigue(회전굽힘피로), ΔK (응력확대계수)

* 성균관대학교 산업과학대학원

** 두원공업전문대학 기계과

*** 국립대전산업대학교 기계설계학과 특성화사업단 초빙교수

**** 성균관대학교 기계공학부

1. 서 론

폴리에스테르 필름(polyester film) 핵심 제조설비의 하나인 권취기는 두개의 권축으로 구성되어 있으며, 하나의 권축이 1.1톤 중량의 코어(Core)를 장착하고 제품 권취를 시작하여 약 6톤의 제품을 권취하면 자동으로 정지하면서 다른 또 하나의 권축이 기동되어 권취를 시작하는 설비이다. 따라서, 권축은 하루에도 7~8회의 기동과 정지를 반복하기 때문에 내 충격성, 내 피로성질이 요구되며, 강도와 인성의 균형이 필요한 설비이다. 권축은 그간 미국에서 제작된 것을 수입하여 왔으나, 수년 전부터는 동일 소재(SNCM220 강)의 동일형상으로 국내 제작하여 사용을 시도하고 있다. 수입한 권축의 경우, 10년 이상 된 것도 별다른 문제점이 발견되지 않으나, 국내 제작의 경우 평균 6~8개월 사용 후 파괴가 발생하였다. 파괴된 권축의 파면을 거시적으로 관찰하여 보면, 반복하중에 의한 피로파괴임을 나타내는 해안무늬(beach markings)가 나타나고 있다⁽¹⁾. 균열은 권축의 표면으로부터 시작되어 내부로 이어졌으며, 파면은 대체로 평할 하였으나 최종 파괴된 부분은 요철 형상으로 뜯긴 모양을 하고 있어 회전 굽힘 하중에 의해 연성 파괴되었음을 보여주고 있다.

SNCM220 강은 침탄 표면경화 처리가 가능한 소재이다. 침탄 표면경화 처리가 피로한도(fatigue limit)에 영향을 주는 인자로는 침탄 후 표면의 잔류응력, 침탄층의 깊이, 잔류 오스테나이트 량, 불완전 침탄층, 템퍼링온도, 결정립크기 등이며, 이 중 탄소가 강 중에 침입하는 과정에서 표면 근방의 Si, Mn, Cr 등 Fe보다 고온산화하기 쉬운 원소의 산화물이 입계에 다량 형성되면, 불완전담금질이 되어 피로강도가 크게 저하한다고 보고^(2, 3) 되어 있으며, 입계 산화물 생성에 의해 피로강도가 감소하는 것을 막는 방법으로는 냉각속도를 증가시키거나, 표면을 연마하여 불완전한 층을 제거하는 것이 효과적이라고 보고 되어 있다⁽⁴⁾. 한편, 피로균열전파(fatigue crack propagation)에 미치는 미세조직의 영향에 대한 연구결과로는 결정립이 미세하면 피로한도는 증가하지만 균열의 시작에는 영향을 거의 주지 않는다는 보고⁽⁵⁾가 있으며, 결정립의 크기와 피로균열전파속도와는 무관하다는 보고⁽⁶⁾가 있다. 따라서 본 연구에서는 그동안 이와 같이 수차례 파괴가 발생되었던 SNCM220 강 권축의 파괴방지를 위하여 파괴원인을 분석하고, 피로수명과 내 충격성을 높이기 위한 인성의 향상을 위하여 최적의 열처리방법을 알아내고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편 제작

본 연구에서 사용한 재료는 (주)기아특수강 에서 열간 압연에 의하여 생산 된 침탄 표면경화 처리가 가능한 SNCM220 강으로 그 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt. %)

Comp.	C	Si	Mn	P	S
Wt. %	0.18	0.23	0.77	0.009	0.009
Comp.	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
Wt. %	0.07	0.43	0.45	0.16	bal.

충격시험용 시험편은 KS B0809⁽⁷⁾에 의해, 인장시험용 시험편은 ASTM E8M-91⁽⁸⁾에 의해, 균열진전속도 측정용 시험편은 ASTM E647-93⁽⁹⁾에 의해 표준 CT(compact tension)시험편으로 제작하였고, 회전굽힘 피로시험용 시험편은 JIS Z2274⁽¹⁰⁾에 준하여 제작하였다. 그 치수 및 형상은 각각 Fig. 1, 2와 같다.

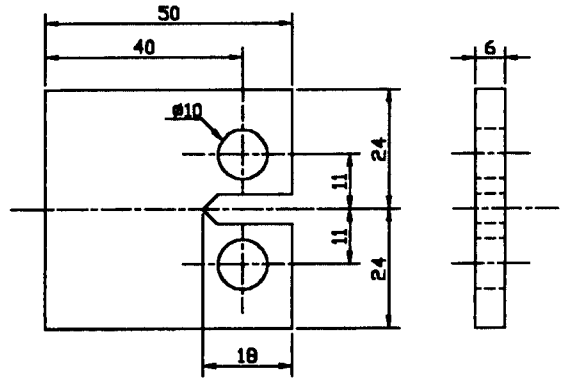


Fig. 1 Geometry of compact tension specimen

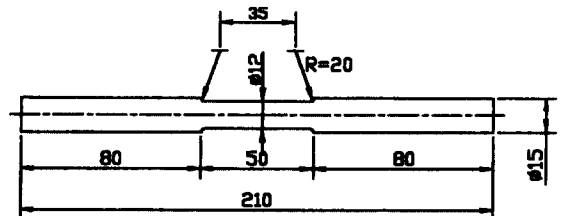


Fig. 2 Geometry of rotating bending fatigue specimen

2.2. 실험방법

파괴원인을 파악하기 위하여 파괴된 권축에서 시편을 채취하여 현미경조직 및 기계적성질을 조사하였다. 또한 권축의 기계적성질의 향상을 위해, 즉 열처리방법에 따른 미세조직 및 기계적성질의 변화를 조사하기 위하여 다수의 시편을 제작하여 각각 (a)노멀라이징 (b)침탄 (c)노멀라이징+침탄+템퍼링 등 3가지 서로 다른 열처리를 수행하였다. 열처리 중 산화를 방지하기 위하여 노내 분위기를 조절이 가능한 전기로를 사용하였으며, 노내 온도계가 장착되어 있어 온도를 펜 레코더(pen recorder)로 기록하면서 열처리를 수행하였고, 각 시편은 노가 충분히 열평형을 이루도록 노를 작동시킨 다음 원하는 온도와 시간 만큼 열처리를 수행하였다. 노멀라이징, 침탄 그리고 템퍼링 열처리에 대한 온도 및 시간은 Fig. 3과 같다.

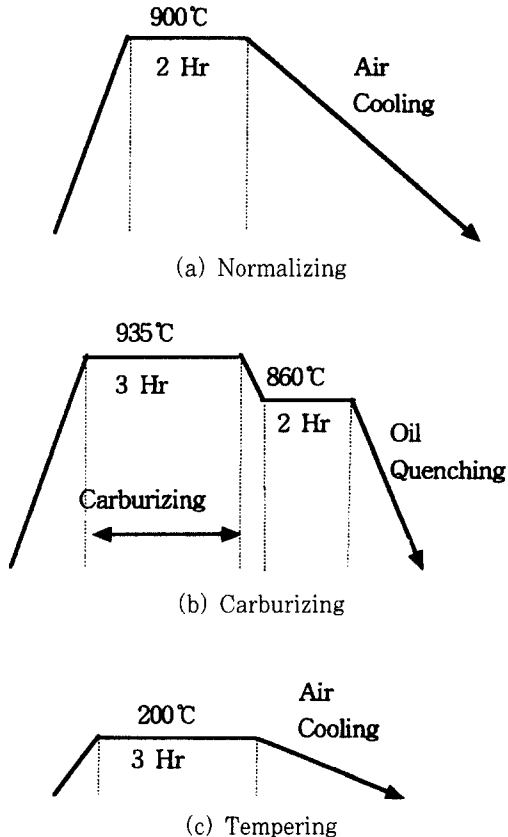


Fig. 3 Condition of heat treatment

열처리후의 미세조직은 nikon inverted microscope 를 이용하여 현미경조직을 관찰하였고, 500배의 배율로 촬영을 하였다. 경도실험은 mitutoyo사의 MVK-H2를, 충격실험은 olsen식 복합시험기를, 인장실험은 ± 10 톤 용량의 instron dynamic system을 사용하여 파괴된 권축, 원소재 및 상기 3가지 열처리를 수행한 5종의 시편에 대해 각각 수행하였다.

열처리후 개선된 기계적 성질을 갖는 소재에 대하여 피로실험을 수행하였다. 후의 3. 2절에 나타낸대로 기계적 성질은 노멀라이징, 침탄, 그리고 템퍼링 열처리를 모두 거친 시편이 제일 우수한 것으로 나타나, 피로실험은 파괴된 권축에서 채취한 시편(A)와, 노멀라이징, 침탄, 템퍼링 열처리를 순차적으로 수행한 시편(B)에 대하여만 수행하였다. 피로실험은 S-N곡선을 얻는 것과, 균열전파속도를 측정하는 두가지 실험을 수행하였다.

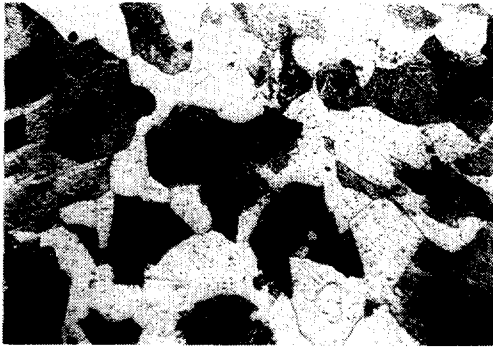
우선, 피로수명과 직접 관련되는 피로한도의 열처리에 따른 변화를 조사하기 위해 회전굽힘피로실험을 수행하였으며, 사용한 시험기는 부하능력 98 N-M인 일본 shimadzu사의 회전굽힘피로시험기 이었다. 실험은 실온에서 3,000 rpm의 속도로 수행하여 S-N 곡선을 얻었다. S-N 곡선을 얻은 다음에는, CT시편을 사용하여 피로균열전파 특성을 조사하였으며, 사용한 시험기는 일본 saginomiya사의 ± 10 톤 용량의 동적서보시험기 이었다. 피로실험 조건은 응력비 $R=0.1$ 에서 하중 반복속도가 30Hz인 sine파형으로, ASTM standard E647-93에 제시된 ΔP 일정 피로시험법에 따라 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 현미경 조직의 변화

Fig.4(a)의 현미경조직 사진은 사용 중 파괴된 권축으로부터 채취한 시편으로 결정립이 매우 거친 것을 보여 주고 있다. Fig.4(b)의 현미경조직 사진은 (주)기아특수강에서 열간 압연된 상태이다. 현미경조직 사진 (a)와 (b)를 비교하여 보면, 파괴된 권축(a)의 현미경조직은 그 제작과정과 후속 열처리과정을 자세히 알 수 없지만, 제작과정 중 장시간 고온에 노출되어 결정립이 상당히 거칠어진 것을 알 수 있다. 이와 같은 거칠어지는 현상은 기계적성질을 크게 저하시킨 요인이 되었을 것으로 생각된다. Fig.4(c)의 현미경조직 사진은 노멀라이징 열처리된 것으로 결정립이 미세하여졌으며, Fig.4(d)의 현미경조직

사진은 원소재를 침탄열처리만 한 것으로 침상의 마르텐사이트 조직을 보여주고 있다. Fig.4(e)에 대한 현미경 조직 사진의 열처리 과정은 노멀라이징 열처리 한 시편을 침탄 담금질 한 후 다시 200℃에서 저온 템퍼링 한 것이다. 사진에서 보는 것과 같이 침상조직이 없어지면서 전형적인 tempered martensite조직을 나타내고 있다.



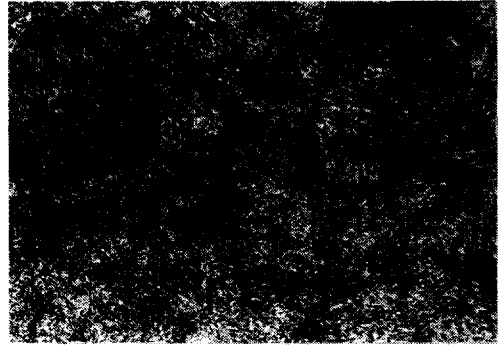
(a)



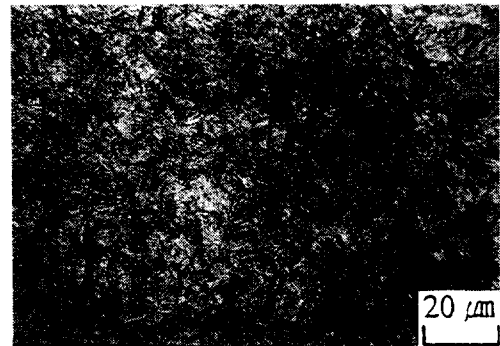
(b)



(c)



(d)



(e)

- (a) Original fractured specimens
- (b) As hot rolled
- (c) Normalized specimen
- (d) Carburized specimen
- (e) Normalized, Carburized and Tempered specimen

Fig. 4 Microstructure of each specimen after heat treatment

3.2. 기계적성질의 변화

각종 열처리 후의 기계적성질은 Table 2와 같다. 충격 실험 결과는 Fig.4(c)의 노멀라이징 한 시편이 100.6 N-m로서 가장 우수하였으며, Fig.4(a)의 파괴된 시편은 47.1 N-m로 낮은 충격 값을 보여 주고 있다. 또한 Fig.4(e)의 침탄 후 템퍼링 한 시편은 침탄열처리만 한 경우의 충격값 50.3N-m 보다 35.5 N-m상승한 85.8

+N-m가 되었다. 경도실험결과는 노멀라이징 한 시편의 경도값은 약간 높게 나타났지만, 침탄 및 침탄 후 템퍼링 한 시편을 원소재와 비교할 때 약 4배 정도 경도값이 높게 나타났다. 인장실험 결과는 노멀라이징(c) < 침탄(d) < 노멀라이징+침탄+템퍼링(e) 순으로 항복강도 및 인장강도가 상승하였다. 항복강도 및 인장강도는 침탄열처리를 수행한 경우에 매우 큰 증가를 나타내었으며, Fig.4(a)의 파괴된 권축과 비교해 볼 때 현저히 강도를 상승시킨 결과를 얻을 수 있었다.

Table. 2 Mechanical properties of each specimen after heat treatment

Specimen	Heat Treatment	Mechanical properties				Remark
		Impact (N-m)	Hardness (Hv)	Yield strength (Mpa)	Tensile strength (MPa)	
a	Unknown	47.1	206.4	330.8	639.6	Original fractured
b	As hot rolled	98.3	174.4	341.8	572.1	
c	Normalizing	100.6	191.8	355.5	608.2	
d	Carburizing	50.3	747.8	761.2	886.1	
e	Normalizing +Carburizing +Tempering	85.8	696.2	874.4	902.9	

Fig.4(c)의 노멀라이징 한 시편은 충격 값에서만 Fig.4(e)의 노멀라이징+침탄+템퍼링 시편보다 다소 높았으며, 경도 및 강도에서는 파괴된 시편 재료와 비슷한 정도의 낮은 값을 보여 주고 있다. 충격, 경도 및 강도를 포함한 전체적인 기계적성질은 Fig.4(e)의 침탄 및 템퍼링한 시편이 가장 우수한 것으로 나타났다.

또한 침탄 열처리는 소재의 표면에 압축잔류응력을 야기시켜 피로성질을 향상시킬 것이 예상되며 침탄된 Fig.4(d)와 (e)의 결과를 비교하면, 충격치가 좋은 (e) 열처리가 권축의 소재로 가장 적합한 것으로 생각된다.

3.3. 피로실험 결과

실제 권축의 수명을 개선하기 위한 최적의 열처리조건을 알아내기 위하여는 위 3.1 및 3.2절의 미세조직과 기계적성질의 측정 외에 직접적인 피로수명의 평가가 요구된다 하겠다. 따라서, 파괴된 권축으로부터 채취한 시편(A)와 위의 실험을 통해 최적의 권축 소재로 생각되는 노멀라이징→침탄→템퍼링 열처리를 순차적으로 시행한 시편(B)를 택하여 피로실험을 수행하였다. 시편(B)를 "개선된 시편(improved specimen)"이라고 호칭하기로 한다.

실험은 우선 회전굽힘피로실험을 수행하여 구한 S-N 선도로부터 피로한도의 개선정도를 비교하였다. 그 후 CT시편을 사용하여 균열이 발생한 후의 피로균열전파속도를 조사하였다.

3.3.1. 피로한도의 변화

파괴된 권축의 시편(A)와 개선된 시편(B)에 대한 회전굽힘피로실험을 각각 수행하였으며, 실험결과를 비교하기 위하여 각각의 S-N 선도를 Fig. 5에 함께 나타내었다.

철강재료와 같은 BCC 재료에서 일반적으로 생각되는 10^6 Cycle 이상에서 파단이 발생하지 않는 굽힘응력을 피로한도로 보면^(11, 12), 파괴된 권축의 시편(A)의 피로한도는 대략 300MPa이며, 개선된 시편(B)는 이보다 약 300MPa 상승된 610MPa이었다. 따라서, 개선된 시편(B)는 피로강도가 2배 가량 개선된 결과를 나타내었다.

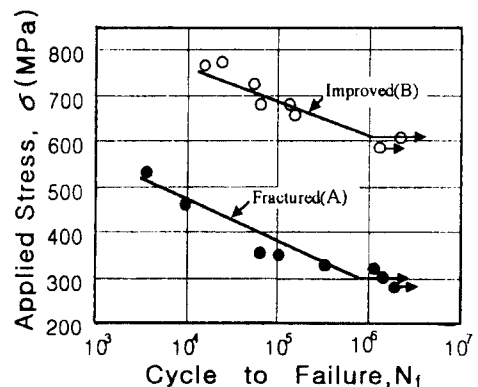


Fig. 5 S-N Diagram of rotating bending fatigue test for fractured specimen(A) and improved specimen(B)

3.3.2. 피로균열전파

열처리에 의하여 피로수명이 Fig. 5의 결과와 같이 증가하였으므로, 그 이유를 좀 더 조사하기 위하여 시편 A 및 B의 피로균열전파속도를 측정하였다.

Fig. 6은 CT시편을 이용하여 ΔP일정 피로실험 결과로 얻어진 a-N 관계로부터 da/dN을 구하고, Srawley⁽¹³⁾에 의하여 제안된 계산식에 의해 ΔK를 구한 da/dN-ΔK관계이다. 그림에 나타난 것과 같이 동일한 ΔK에 있어서 개선된 시편(B)가 원래 파괴된 시편(A)보다 더 큰 da/dN값을 갖고 있으며, 이 차이는 균열이 진전됨에 따라 더욱 커지고 있다. 즉, 개선된 시편이 균열전파속도가

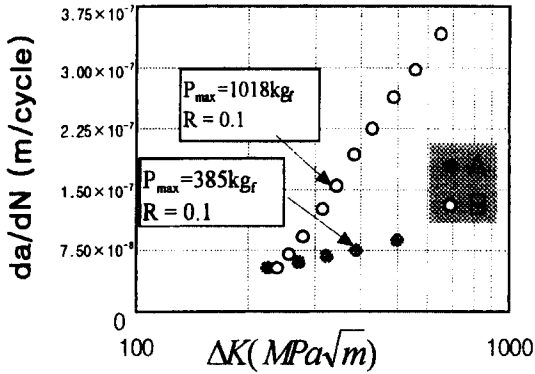


Fig. 6 Fatigue crack propagation rate: da/dN vs. ΔK for fractured specimen (A) and improved specimen(B)

오히려 더 빨라졌지만, 이는 CT시편에 precrack을 낸 다음 조사된 결과로서, 균열이 발생한 후의 전파속도를 나타내는 것이다. 일반적으로, 피로하중에 의해 파괴가 발생하는 경우, 피로균열 발생까지의 시간이 전체적인 피로수명에 큰 비중을 갖는 점을 고려한다면, 균열전파 속도만으로 재료의 피로수명을 특징지을 수는 없다.

이상의 2가지 실험으로부터 개선된 시편(B)가 파괴된 권축의 시편(A)보다 피로균열전파속도 자체는 빨랐으나, 피로수명은 더 길어졌음을 확인할 수 있었다. 이것은 열처리의 결과로써, 개선된 시편(B)가 파괴된 권축의 시편(A)보다 피로균열의 초기 발생 및 성장에 요구되는 시간이 길어졌음을 나타내는 것으로 생각된다.

3.4. 개선된 열처리로 권축의 제작 및 검증

위의 3. 1~3. 3절의 실험결과 최적의 열처리 방법은 3. 3절의 시편 (B)의 열처리방법, 즉 노멀라이징→침탄→템퍼링 절차를 거치는 것이라고 결론 지을 수 있다. 이에 따라 이러한 열처리를 거친 소재를 이용하여 권축을 다수 제작하여 실제 작업에 사용한 결과, 전과 동일한 조건으로 2년 이상 사용하였으나 파괴가 발생하지 않았으므로 열처리의 효과를 입증할 수 있었다.

4. 결 론

이상의 실험 결과를 통하여 SNCM220강의 열처리에

다른 현미경조직의 변화와 기계적성질에 미치는 영향 및 침탄열처리가 피로균열전파 특성과 피로강도에 미치는 영향에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 각종 열처리 후의 기계적 성질을 비교한 결과 충격값에서는 노멀라이징 한 시편이 100.6 N-m로서 가장 우수하였으며, 침탄후 템퍼링 한 시편은 침탄열처리만 한 경우의 충격값 50.3N-m 보다 35.5 N-m상승한 85.8 N-m가 되었다. 충격, 경도 및 강도를 포함한 전체적인 기계적성질은 노멀라이징, 침탄 및 템퍼링 열처리를 순차적으로 수행 한 시편이 가장 우수한 것으로 나타났다.
- (2) 회전굽힘파로실험 결과 파괴된 권축에서 채취한 시편은 300MPa의 응력에서 1.4×10^6 cycle까지 파단이 발생하지 않았으나, 침탄 및 템퍼링 한 시편은 610MPa의 응력에서도 2.2×10^6 cycle까지 파단이 발생하지 않았다. 따라서 SNCM220강의 침탄 및 템퍼링을 통해 피로강도가 2배 이상으로 개선된 결과를 얻을 수 있었다.
- (3) CT시편을 이용하여 피로균열전파실험을 수행한 결과 일단 균열이 발생한 경우에는, 동일한 ΔK 에서 노멀라이징, 침탄, 템퍼링 열처리를 한 시편이 파괴된 권축 소재 시편보다 피로균열전파속도가 빠르게 나타났다.

후 기

본 연구는 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구 센터(SAFE, ERC)의 부분적인 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Richard W.Hertzberg : "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", 3rd ed., John Wiley and Sons, pp.457~462 and pp.517~604(1989)
2. Shen-Chih Lee and Weio-Youe Ho : "The Effect of Surface Hardening on Fracture Toughness of Carburized Steel", Metall. Trans., Vol. 20A, pp.519~525(1989)
3. D. E. Diesburg and G.T. Eldis : "Fracture

- Resistance of Various Carburized Steels", Metall. Trans., Vol. 9A, pp.1561~1570(1978)
4. Takeshi Naito, Hideo Ueda and Masao Kikuchi : "Fatigue Behavior of Carburized Steel with Internal Oxides and Nonmartensitic Microstructure near the Surface", Metall. Trans., Vol. 15A , pp. 1432~1436(1984)
 5. Keiro Tokaji, Takeshi Ogawa and Yukio Harada: "The Growth of Small Fatigue Cracks in a Low Carbon Steel; the Effect of Linear Elastic Fracture Mechanics", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol. 9 No.3, pp.205~217(1986)
 6. Anthony W. Thompson: "Fatigue Crack Propagation in Austenitic Stainless Steels", Engineering Fracture Mechanics, Vol.7,pp.61~68(1975)
 7. 염영하 : "재료 시험법", 동명사, pp.391~394(1981)
 8. ASTM Standard E8M-91 : "Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials", pp.81~96(1994)
 9. ASTM Standard E647-93 : "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", pp. 679~700(1993)
 10. JIS Z 2274 : "Method of Rotating Bending Fatigue Testing of Metals", pp.176~181(1978)
 11. Robert C. Juvinall: "Fundamentals of Machine Component Design", 2nd ed., John Wiley & Sons , pp.257~296(1991)
 12. Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L.Handrock: "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, pp. 1~31(1990)
 13. J.E. Srawley: "Wide Range Stress Intensity Factor Expression for ASTM E 399 Standard Fracture Toughness Specimens", Int. J. Frac. Mech., Vol.12, p.475(1976)