

보론 첨가강(AISI 51B20재)의 피로특성에 관한 연구

이종형*, 이경모**, 윤성훈***

A study on the Fatigue Properties of Boron Steel(AISI 51B20)

Jong Hyung Lee*, Kyung Mo Lee**, and Sung Hun Yoon***

ABSTRACT

Chrome-molybden steel or chrome steel for machine structures has been shown to excellent hardenability adding boron of a small amount at low carbon steel. These days, boron steel has been used high strength bolt and wear resistant components of construction equipment. SEM results showed classical fatigue fractures, consist with surface crack initiation. The specimens were tested repeatedly(9 times) under controlled load rotary bending fatigue tests. In the study, the fatigue crack initiation as well as fatigue crack growth behavior and the fracture mechanism were investigated through observations of fracture of boron steel surface(AISI 51B20).

Key Words : Fatigue (피로), Boron Steel (보론강), Fatigue Limit (피로한도), Crack (균열), Crack growth(균열 성장), Hardenability (경화능)

1. 서론

기계 구조용으로 사용되는 크롬 몰리브덴강(SCM)이나 크롬강(SCR)의 대치강재로 저 탄소강에 소량의 보론을 첨가하여 우수한 경화능을 발휘하는 보론 첨가강은 국내 80년대 이후 건설 중장비의 내마모부품이나 건설 현장에서 고장력 볼트 등으로 점차 널리 사용되어지고 있다. 그러나 현장에서는 자원 절약형 강재로 인식하고 있지만 신뢰성에 대한 보고가 미흡하여 중요 기계부품에는 사용을 꺼리는 실정이다.^[1,2]

일반적으로 냉간 압조용선재는 탄소의 양이나 합금원소의 첨가 등에 따라 다르지만 기본적으로는 wire rod 제조 후 구상화 소둔처리 등의 열처리 등을 통하여 소재의 연성을 확보하는 것이 중

요하다고 보고되고 있다.

같은 보론 첨가강인 SBSC재는 0.21%저탄소강에 붕소를 0.0022%선 첨가하고도 SCM 420의 764MPa 급힘 피로강도보다 높은 값 911MPa의 급힘피로강도로 나타내고 있다.

이는 보론의 B가 강중에서 우수한 경화능을 가지게 되는 것은 오스테나이트 중에 고용된 B가 결정립계에 몰려 오스테나이트 변태에 영향을 주기 때문이며 B는 O₂ 및 N₂와 친화력이 대단히 강하기 때문에 용강에 B를 첨가할 때에는 정련시에 Al, Ti, Zr 등을 첨가하여 충분히 탈산, 탈질소 처리를 해야 하는 것으로 알려져 있다.^[3]

본 연구에서는 마찰접합용 고장력 볼트로 사용되고 있는 AISI 51B20재의 피로 특성을 연구하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2001년 6월 15일 접수

* 금오공과대학교 기계공학부

** 거창기능대학 기계설계공학과

*** 금오공과대학교 생산기계공학과

2.1 시험편

본 실험에서 사용한 재료는 AISI 51B20으로 국내 철강회사인 P사에서 제조되었으며, 주로 건설중장비 부품의 고장력 볼트나 지하철 건설 현장구조물의 조임용 고장력 볼트로 많이 사용되고 있는 재료이다. 실험에 사용된 시험편에 대한 기계적 성질은 Table 1에 나타내었고 그 화학적 성분은 Table 2와 같으며 화학적 특성을 보다 고가인 SCM420의 재료와 비교하였다.

Table 1 Mechanical properties of specimens

symbols	Ø	Tensile strength (MPa)	Elongation	Hardness (HrB)
wire rod	23	541	22.5	78.2
drawing	21.65	636	10.5	91.0

Table 2 Chemical composition of specimens(wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	B
51B20	0.21	0.22	0.78	0.012	0.007	0.75	0.03	0.01	0.018	0.002
SCM 420	0.18 ~ 0.23	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.85	0.03 <	0.03 <	0.90 ~ 1.20	-	-	-	-

시험편의 형상 및 가공치수는 Fig.1과 같으며 선반을 이용하여 시험편을 가공하였다. 또한 시험편의 관찰부분을 사포(sand paper) #100~#2000으로 연마한 후 산화크롬으로 래핑 가공하여 경면 연마를 하였다.

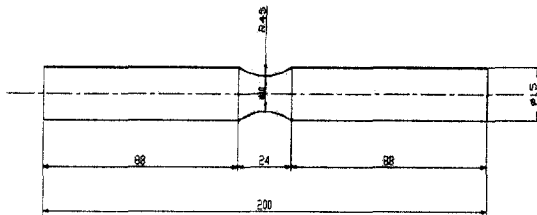


Fig.1 Configuration of test specimen

시험편은 균열의 발생장소를 한정하기 위하여 모래시계형(Hourglass Type Specimen)으로서 형상 계수가 a=1이고 실험에서는 이것을 평할재로 하였다.

$$a=kt=1 + \frac{1}{\sqrt{A\left(\frac{2r}{D-d}\right) + B\frac{2r(1+2r/d)^2}{d}}}$$

D는 시험편의 외경 또는 폭

d는 노치의 직경 또는 폭

A,B는 응력 형식에 의해 다른 parameter로서

A=0.25, B=1.8로 하였다.

$$a= 1 + \frac{1}{\sqrt{0.25\left(\frac{2 \times 50}{15-10}\right) + 1.8 \frac{2 \times 50(1+2 \times 50/10)^2}{10}}}$$

$$= 1.02$$

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 회전 굽힘 피로시험기는 오노식으로 균일 굽힘 모멘트형이고 시험기 용량은 98N·m, 3600rpm이다. 보통 피로시험기는 일정한 응력진폭 상태에서(R=1)시험편을 회전시키면서 반복 굽힘 피로실험을 수행한다.

외팔보 형태의 경우 최대굽힘응력은 시험편의 감소된 단면부위에서 발생하는데, 그 결과들은 최대 응력 S와 응력반복수 N으로 표시된다.

굽힘 하중에 의한 캔틸레버 시험편의 축 방향 응력은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3}$$

여기서 M은 적용된 하중에 대한 시험편의 최소 직경에서 발생한 모멘트이며, d는 버어니어 캘리퍼스로 측정된 시험편의 최소직경을 나타낸다.

실험에서 각각 9개의 시험편의 작용응력과 하중, 파괴에 대한 회전수는 Table.3에 나타내었다. Table.3에서 보는 바와 같이 보론강이 일정한 무게 감소에 따라 일정한 회전수에 파괴되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 보론강의 미세한 크랙에 의한 재료의 결함으로 사료된다. 또한 하중 294MPa로 부터 235MPa까지 단계적으로 감소시키며 파단회전수를 측정했다.

Table 3 Fatigue test results

	Diameter (mm)	Bending stress (MPa)	Load (MPa)	Number of cycles(N)
1	10.02	294	290	4.7×10^5
2	9.98	274	268	4.85×10^5
3	9.97	265	257	1.18×10^6
4	10.05	260	259	1.27×10^7
5	10.03	247	252	1.01×10^7
6	10.00	247	250	1.72×10^7
7	9.95	245	238	1.02×10^7
8	10.03	245	243	1.25×10^6
9	9.99	235	230	1.03×10^7

파괴는 시편이 두 개의 부분으로 완전히 분리되었을 경우로 정의할 수 있으며, 실험결과는 Fig.2에서 보는 바와 같이 S-N곡선으로 정리하여 나타내었다. 여기서 S는 시편에 대한 응력진폭이며 N은 시편이 파괴 될 때까지 적용된 회전 사이클 수를 나타낸다. 또한 S축을 따라 파괴가 이루어진 데이터 점들을 통과하는 선은 선형회귀분석을 사용하여 도시하였다.

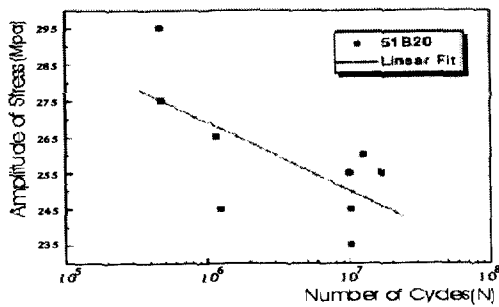


Fig. 2 Linear regression of S-N

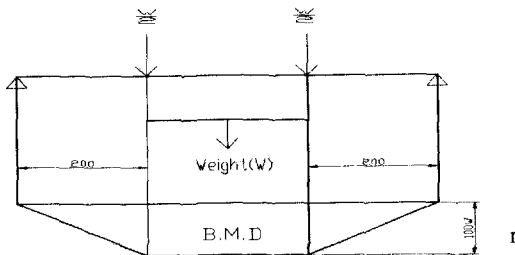


Fig. 3 Ono's type rotary bending fatigue test loading method

본 실험에서 나타낸 S-N곡선은 Origin 5.0 프로그램에서 하였다. 하중부하방법은 Fig.3과 같으며 시험편에 가해지는 일정응력에 대한 하중식은 다음과 같다.

$$M = \frac{W \times L}{2} \text{ (양단 지지인 경우)} = 100 W(N - m)$$

$$M = \sigma_b Z$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{100w}{Z} \text{ (MPa)}$$

$$W = \frac{\sigma_b Z}{100} \text{ (N)}$$

2.3 피로균열 성장 거동 및 파면관찰

미세조직은 경면 연마후 Nital을 사용하여 10초간 부식시킨후 금속현미경으로 관찰하였다.

또한 정확한 입자경계 (grain boundary) 와 boron 석출물양상, 페라이트상을 구분하기 위하여 전자주사현미경(SEM Phillips515, Holland)를 사용하여 표면 처리된 시편의 반경방향에 대한 표면과 파면(fracture surface)을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

51B20의 원재료와 구상화 열처리를 한 시편을 4% 나이탈 용액에 5~10초 동안 부식시켜 금속현미경으로 관찰한 미세조직을 Fig.4에 나타내었다.

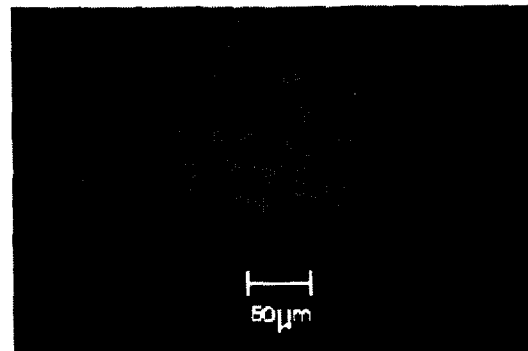


Fig. 4 Photographs of Wire rod



Fig. 5 Cleavage facet and cleavage step of SEM

그림에서 나타난바와 같이 보론강의 경우 구상화율이 낮는데 이는 boron 첨가시 시멘타이트 입자들을 분산시켜 내부식성과 가공성을 높이는 한편 입계에 물린 boron의 입자들이 입계의 확산을 방지하여 구상화를 저해하는 것으로 사료되며 흑연의 모양은 뚜렷 하지 않고 축 방향으로 길게 배치 되어있다.

열처리된 시편은 880℃에서 온도를 고정시키고 50분간 열처리한후 60~80℃로 유냉한후 460℃에서 60분간 뜨임하였다. 표면경도는 HRC 32~36으로 나타났다. 보통 보론강^[4]에서는 인장강도와 경도가 공정에 따라 크게 변화지 않으며 구상화 열처리 후에도 큰 변화가 없다고 보고되고 있는데 이는 보론이 첨가가된 경우 미세구조가 변화하기 어렵다는 것을 의미하며 조대 해지는 입자크기(Grain size) 막고 입자경계(Grain boundary)에 자유 에너지를 낮춤으로써 경화능을 향상시키는 효과를 가져오게 한다.^[5]

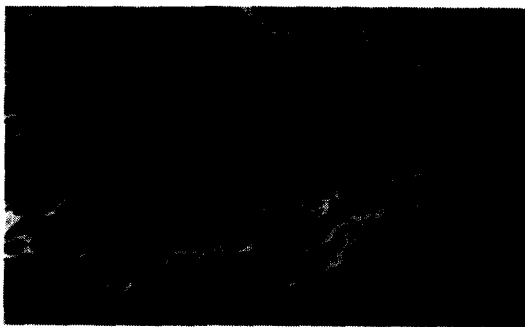


Fig. 6 Dimple of SEM

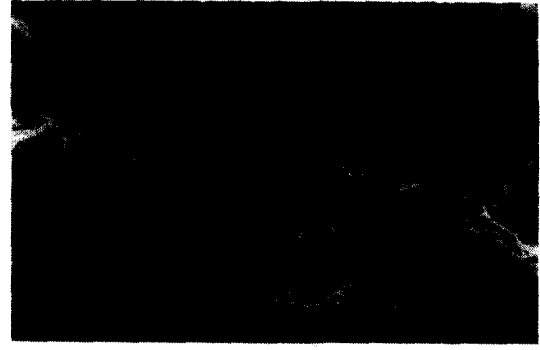


Fig. 7 Photographs of SEM of fracture surface

본시험에서 보론강의 초기크랙은 반복회전수 1×10^5 에서 발견되었으며 크랙의 형태는 크랙의 성장이 커져서 반원의 모양이 되기 까지는 조직내의 침상형태로 존재하며 2×10^5 까지 성장하다가 멈췄으며 4.5×10^5 이후 급격히 성장하여 반원모양의 크랙이 발생하면서 파단되었으며 피로한도는 247MPa 로 나타났다.

Fig.5의 SEM사진에서 보는바와 같이 벽개 파괴가 일어난 현상을 볼수 있는데 51B20 소재에서 일부 소성변형을 거의 수반하지 않고 특정의 저지 수면에서 원자간의 결합이 파괴되어 인장 분리 된 것이다.

몇 개의 벽개 파세트(cleavage facet)와 벽개단(cleavage step)이 보인다. 이 단은 파괴가 평행한 몇 개의 벽개면에 걸치기 때문에 만들어 진다. 또 단은 에너지 관계로부터 균열의 진행에 따라 합쳐하여 가며 리버 패턴(river pattern)으로 변하였다.^[6,7]

이는 소량의 B를 첨가한 Boron 강이 고강도강이 되어 고강도 강에서 흔히 나타나는 명확하지 않은 벽개면과 파괴강도와와의 관계로 보여진다. 또한 Fig.6의 SEM사진에서와 같이 재료의 개재물이나 석출물이 제2상 입자를 핵으로 하여 미소 공동이 발생하여 마침내 그들이 성장하여 파괴에 이르게는데 딩플(dimple)이라고 불리는 흔적들을 볼 수 있다.^[8,9] 이 형상은 작용응력의 방향과 공동이 만들어 지는 면과 이루는 각도에 의존하고 있는데 단축 인장하중에서 균일한 하중을 받을 때 나타나는 원형을 한 딩플들이 만들어 졌다.

3.2 피로과정에 있어서 기지조직의 역할

SEM에 의해 재료의 균열발생 부위에 대한 기지조직의 형상에 대해 검토하였다. 재료의 피로한도 부근에서 파단한 시험편에 대해 파면을 조사하기 위하여 균열발생부의 SEM사진을 촬영하였으며 결과는 Fig.7과 같다. Fig.7의 SEM사진에서 나타난 바와 같이 탈산, 탈질산 처리를 하지 않아 발생한 기공이나 편석에서 페라이트가 피로균열의 성장경로가 되어 있는 것을 알 수 있다.^[10]

4. 결론

1. 보론강의 초기크랙은 반복회전수 1×10^5 에서 발견되었으며 크랙의 형태는 크랙의 성장이 커져서 반원의 모양이 되기까지는 조직내의 침상형태로 존재하며 2×10^5 까지 성장하다가 멈췄으며 4.5×10^5 이후 급 격히 성장하여 반원모양의 크랙이 발생하면서 파단하게 된다.
2. 본재의 피로한도는 247Mpa로 나타났다. 이는 충분히 고급소재인 SCM420에 대체재료로 사용될 수 있음을 보여준다.
3. 20PPm의 보론이 기계적 성질에 미치는 효과는 피로파괴에서도 피로균열저항성이 향상됨을 알 수 있었다.
4. 보론의 조직 분석에 있어 흑연의 구체적 모양은 뚜렷하지 않으며 축방향과 평행방향으로 길게 배치하고 있다.

후기

본 연구는 2000년도 금오공과대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구된 논문으로 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 지용권, 침탄기어용 보론첨가강에 대한 연구, 삼성중공업, pp. 55~59, 1990.
2. 박일부, 조수연, 이웅열, 냉간압조용 Boron첨가강의 구상화 열처리시 구상화 및 기계적성질에 관한 연구, 산업기술교육훈련학회지, 제4권, 제1호, 2월 pp. 59~67, 1999.

3. 윤명진, 이경모, 구조용 탄소강의 표면결함 크기가 피로강도에 미치는 영향평가, 경일대학교, pp. 97~102, 1997.
4. Boron강의 성질 및 특성, 동보제강주식회사, 1994.
5. Moral J. E. and Camirom T .B. "Boron Hardenability Mechhanism" TMS-AIME pp. 19-32, 1979.
6. Czyryca, E. J., Fatigue Crack Initiation," The Materials Handbook, Vol. 8, 1978.
7. Rolef, S. T. and Barson, J. M., "Fracture and Fatigue Control in Structures," Prentice Hall INC., pp. 1~27, 1982.
8. David Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics," Sijthoff & Noordhoff, pp. 3~23, 1978.
9. Kiagawa, H., Takahashi, S., Suh, C.M. and Miyashita, S., "Quantitative Analysis of Fatigue Process-Micro Crack and Slip-Lines under Cycle Strains," ASTM STP 675, pp. 420~449, 1979.
10. Landgraf, R.W., Morrow J. and Endo, T. "Determination of the Cyclic Stress Strain Curve," J. Mater, 4, pp. 176~188, 1969.