◉論 文

STB2강의 고온피로강도 특성에 미치는 열처리의 영향+

오 세 규*·김 연 호**·이 상 국***·이 종 두****

(1989년 10월 10일 접수)

Effect of Heat Treatment on High Temperature Fatigue Strength Characteristics of STB2 Bearing Steel

Sae-Kyoo Oh*, Yeon-Ho Kim**, Sang-Guk Lee*** and Jong-Doo Lee****

Key Words : High Temperature Fatigue Strength(고온피로강도), STB2(고탄소 고크롬 베어링강), Quenching(담금질), Cycle of Tempering(뜨임처리 회수), Hardness(경도), Impact Value(충격치), Micro-Structure(미시조직)

Abstract

It has been very important in various industry fields to improve the fatigue strength characteristics of bearings such as bearing life, fatigue limit, etc., because such poor properties could result in shortening the machinery life as well as in decreasing the accuracy. However, no successful heat treatment criterion seems to be available at present.

In this study, the effect of the 170℃ ×120*min* tempering cycles repeated after 830℃ ×30 *min* oil quenching for 800℃ spheroidizing-annealed bearing steel (STB2) as base metal on the 120℃ high temperature rotary bending fatigue strength characteristics were investigated, including the effects on hardness, Charpy impact value and micro-structure, in order to seek for the best heat treatment condition finally. The important results obtained are as follows :

1) The optimal cycle of tempering so that the fatigue strength σ could become the highest was the 4th cycle. And it is confirmed that this σ_F is about 6 times more increased than that of base metal, and about 1.3 times more increased than the case of the 1 *cycle* tempered.

2) As a result of the investigation for the effects of tempering cycles on hardness, the hardness at the tempering number of 2 thru 5 *cycles* was not decreased severely ; only about 10% decrease from those of the quenched and 1 *cycle* tempered case. Such hardness is

+ 1988년도 한국해양공학회 춘계학술대회 발표(1988년 6월)

* 정회원, 부산수산대학 공학부 박용기계공학과
** 한국베어링(주)
*** 한국해기연수원
**** 부산공업대학 금형과

equivalent to $H_RC61\sim62$ with no bad effect on anti-abrasion of bearing steel.

3) In the case of 2 thru 5 *cycle* tempering as well as 1 *cycle* tempering, the impact value was not so improved comparing with the case of quenching, but an increase of 5 to 10% could be expected at least.

4) It was experimentally confirmed that the control of the mechanical properties improvement such as fatigue strength and fatigue life for bearing steels could be possible by the number of tempering cycles.

1. 서 론

최근 산업의 발달에 따라 베어링강의 피로강도와 피로수명의 향상 및 그 안정성과 신뢰성 향상이 중요한 과제로 되어 베어링강의 열처리 최적화 개발이 중요시 되고 있다[1)-5)]. 그 예로서 해양기계나 항공기및 우주기기용 베어링이 만일 손상되면 그 인적 물적 피해는 막대할 것이므로 베어링 수명에 대한 높은 신뢰성이 요구된다. 또한 일반용도의 베어링에서도 최근 고온 고속 고하중에 적합한 베어링이 요구되고 있는 실정이다.

베어링 수명에 큰 영향을 미치는 인자는 열처리와 재료이다. 구름 베어링의 회전한계를 정하는 것은 베어링의 온도이며 사용온도가 120℃를 넘으면 일반적인 베어링 재료의 경도 저하와 윤활제의 산화피막 때문에 구름베어링의 성능이 저하되므로, 고탄소 크롬베어링강을 사용하여 최대 사용온도 120℃를 기준으로 열처리와 고온 피로 강도 제특성과의 관계를 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 고온 회전 굽힘 피로 강도 특성의 향상[6)-10)]을 위한 열처리 최적화를 최종목적으로 하여 구상화 풀림처리된 수입품 베어링강을 현장에서 현재 쓰이고 있는 열처리조건(quenching-tempering)에서 열처리 하였고, 이때 담금질 및 뜨임처리 회수가 120℃ 고온 회전굽힘 피로강도, 10^6사이클 베어링 수명에서의 피로한도, 경도, 충격치 및 미시조직검사에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고, S−N 곡선의 실험식을 전산한 후 모델화를 완성시켜, 베어링의 국산화 개발을 위한 기본 설계 자료에 기여하고져 한 것이다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 일제 고탄소 고크롬 베어링강(KS D3525 : STB2, JIS G4805 : SUJ2)으로서 지름이 15*mm*이며 800℃ 구상화 풀림(spheroidizing annealing)처리하여 쾌삭성과 담금질성을 양호하게 한 것이다. 그 기계적 성질 및 화학조성은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of base metal STB2

Mechanical properties	Tensile strength kgf/mm^2	Yield strength kgf/mm^2	Elongation %	Charpy impact value $kgf\cdot m/cm^2$
	70.2	56.7	25	13.9*

Chemical composition wt%	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
	0.99	0.20	0.29	0.15	0.015	0.07	1.31	0.03	0.12

* Specimen with U-notch of 1*mm* R and 2*mm* depth

회전 굽힘 피로 시험편과 충격시험편을 위하여 모재를 Fig. 1 및 Fig. 2의 형상과 치수로 기계가공하여 열처리후 연삭하였고, 평행부에 에머리 페이퍼(emery paper) #0/4까지 연마하고 산화크롬으로 버핑(buffing)하여 고온 피로강도와 충격치에 대한 시험편의 표면 거칠기의 영향을 최소로 하였다. 그리고 현미경 조직의 관찰을 위하여 알콜(alcohol) 95%, 질산 5% 조성의 부식액을 사용하였다.

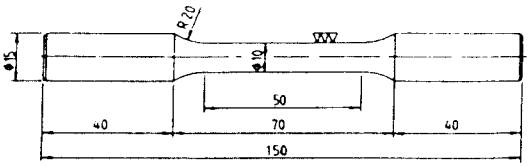

Fig. 1 Specimen of rotary bending fatigue test

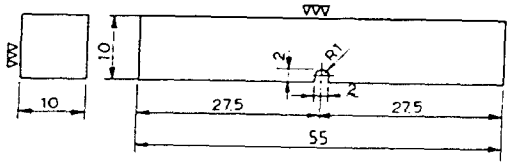

Fig. 2 Specimen of Charpy's impact test

2.2 실험장치

본 실험에 사용한 고온 회전굽힘 피로 시험기는 Ono형 고온회전굽힘 피로시험기이고, 그 능력은 최대굽힘 모멘트 $20kgf \cdot m$이고, 매분 회전수는 3,500rpm (60Hz의 경우)이며, 온도 조절장치를 가진 가열로(heating furnace)가 부착되어 있다. 그 기구는 Fig. 3과 같으며 부하방식이 2점 지지 2점 하중식의 중추직가식인 균일 굽힘 모멘트형이다.

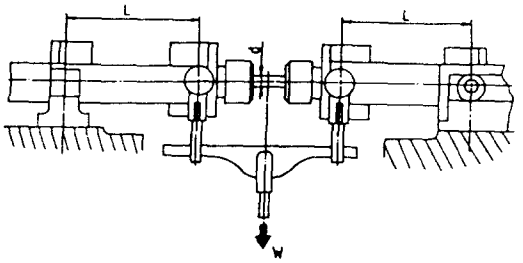

Fig. 3 Mechanism of $20kgf \cdot m$ Ono-type high temperature rotary bending fatigue testing machine (Model FTO-20H-01)

2.3 담금질 조건

담금질(quenching)의 영향을 조사하기 위하여 Table 1에 표시한 재료를 메시벨트식 연속(mesh belt type continual furnace)내에서 상용 열처리 조건인 830℃에서 30분간 가열한 후 기름에서 담금질하였다. 이때 담금질 기름의 온도는 110℃이다. 담금질 온도를 위해 가열시 표면 산화와 탈탄을 방지하기 위하여 제어분위기를 사용하였고, 제어분위기는 일반적으로 노의 외부에 가스 발생기를 가지며 일정한 조성을 갖는 분위기 가스를 노에 공급한다. 본 실험에는 RX분위기 가스[11),12)] 속에서 가열하였고 온도 변화는 ±5℃ 이내로 관리하였다.

RX 가스의 조성은 Table 2와 같고, 담금질 사이클(quenching cycle)은 Fig. 4와 같다.

Table 2 Rx-gas chemical composition

Kinds of gas	Gas composition (vol%)				
	Co_2	Co	H_2	CH_4	N_2
Rx-gas	0.3	24.0	33.4	0.4	41.9

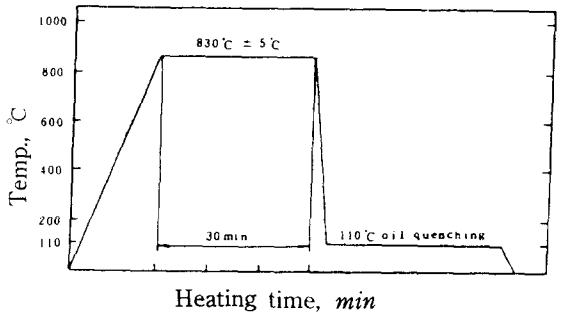

Fig. 4 Heating cycle of quenching

2.4 뜨임처리 조건

뜨임처리(tempering)조건은 830℃에서 30분 가열후 110℃ 기름에서 담금질한 후에, 170℃에서 120분간 가열하는 뜨임처리이며, 뜨임처리 회수를 1~5회까지 수행하여 그 회수가 피로수명, 경도, 충격치, 미시조직등에 미치는 영향을 조사하였다. 뜨임처리를 위한 가열사이클은 Fig. 5와 같다.

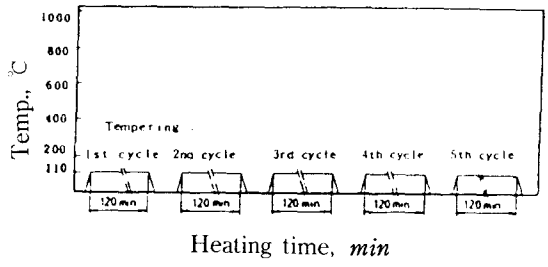

Fig. 5 Heating cycle of tempering after oil quenching

2.5 실험방법

고온 회전 굽힘 피로 시험기에 시험편을 고정할 때 고속회전에 의한 진동의 영향을 무시할 수 없으므로 편심이 안 되도록 1μm단위의 다이얼 게이지를 사용하였다. 피로시험은, 시험편을 Fig. 1과 같은 형상과 치수로 가공하여 Ono형 고온 회전

굽힘 피로시험기에서 피로 시험 하였으며, 이때 시험편이 척에 고정되어 있는 노내의 온도는 120℃, 응력반복 속도는 3,500*rpm*으로 지속 시키면서 가급적 정지시간을 주지 않고 계속 작동시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 담금질이 피로강도에 미치는 영향

Fig. 6은 모재와 830℃ ×30분 기름담금질한 시험편을 고온회전 굽힘 피로시험기에서 노내 온도가 120℃인 상태에서 피로시험한 결과로 얻은 S-N곡선이다.

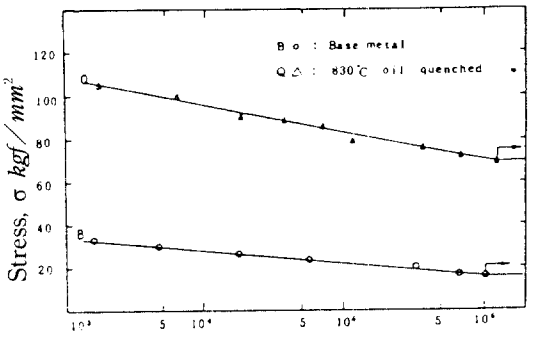

Fig. 6 S-N diagrams of base metal and 830℃ quenched specimens at 120℃ rotary bending fatigue test

Fig. 6에서 알 수 있듯이 담금질한 시험편이 모재에 비해 그 피로강도가 훨씬 높게 나타났다. 즉, 구상화 풀림 처리한 고탄소 크롬 베어링강 모재(B. M.)를 830℃ ×30분 기름 담금질을 하였을 때 베어링 수명 $N = 10^6$ 사이클 때의 피로강도(피로한도) σ_F는 71*kgf/mm*²로서 모재의 경우 (16*kgf/mm*²)보다 약 4.4배나 증가하였으며, 이때 피로강도 σ (*kgf/mm*²)와 피로수명 N(*cycles*)과의 사이에 실험치들의 분포가 semi-log 좌표평면상에서 즉 σ-logN 좌표평면에서 직선적 정량관계가 성립함을 알 수 있다.

3.2 뜨임처리가 피로강도에 미치는 영향

Fig. 7은 170℃ ×120분의 뜨임처리를 1~5회까지 수행한 시험편을 회전굽힘 피로시험기의 노내의 온도가 120℃ 상태에서 유지되도록 하여 피로시험한 결과로 부터 얻은 S-N 곡선이다. 본 실험에서는 구름 베어링의 설계수명[13]으로서 10^6을 기준으로하여 즉 $N = 10^6$ *cycles*때의 피로강도 σ를 피로한도 σ_F로 정하였으므로, 본 연구에서는 σ_F를 Pantereb[14]의 피로한도 결정식에 의해 따로 구하지 않았다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 830℃ ×30분 기름 담금질 후에 170℃ ×120분의 뜨임처리를 1회로부터 5회까지 시행하였을 때 그 피로한도 (σ_F) 및 피로수명(N)은 담금질의 경우보다 더욱 증가하다가 피크(peak)에 달한 후 다시 감소하는 특성이 존재함을 알 수 있다(Fig. 8참조). Fig. 7에서와 마찬가지로 σ와 N과의 사이에 있어서의 모든 실험치들의 상관 관계는 직선적 상관 관계가 존재함을 예측할 수 있다.

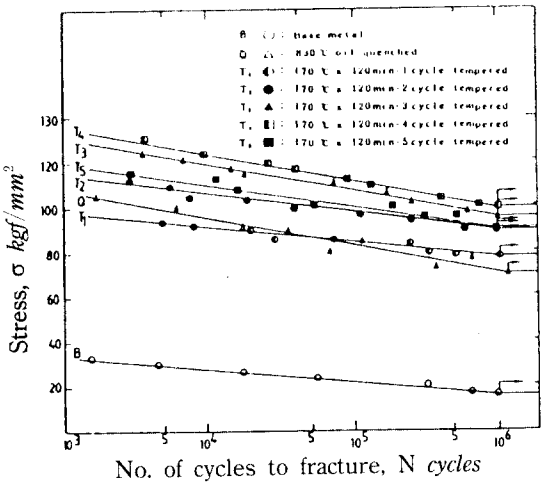

Fig. 7 S-N diagrams of 170℃ -1 thru5 cycle tempered specimens at 120℃ rotary bending fatigue test

3.3 S-N곡선의 실험식과 모델화

Fig. 6 및 Fig. 7의 S-N곡선에 관한 실험식을 구하기 위하여 모든 실험치로 부터 최소자승법을 이용한 회구해석법에 의하여 전산한 결과는 식 (2)~(8)과 같다.

$$B\ ;\ \sigma = 52.8 - 6.12\ \log N\ (R^2 = 99\%) \cdots (2)$$

$$\sigma_F \text{ at } 10^6\ cycles = 16.0\ kgf/mm^2$$

$Q ; \sigma = 144.5 - 12.29 \log N$ ($R^2 = 99\%$)

σ_F at 10^6 *cycles* $= 70.8$ *kgf/mm²* ..... (3)

$T_1 ; \sigma = 118.2 - 6.74 \log N$ ($R^2 = 97\%$)

σ_F at 10^6 *cycles* $= 77.8$ *kgf/mm²* ..... (4)

$T_2 ; \sigma = 150.9 - 10.50 \log N$ ($R^2 = 92\%$)

σ_F at 10^6 *cycles* $= 87.9$ *kgf/mm²* ..... (5)

$T_3 ; \sigma = 166.8 - 11.74 \log N$ ($R^2 = 97\%$)

σ_F at 10^6 *cycles* $= 96.3$ *kgf/mm²* ..... (6)

$T_4 ; \sigma = 174.3 - 12.56 \log N$ ($R^2 = 100\%$)

σ_F at 10^6 *cycles* $= 98.9$ *kgf/mm²* ..... (7)

$T_5 ; \sigma = 145.9 - 9.07 \log N$ ($R^2 = 92\%$)

σ_F at 10^6 *cycles* $= 91.5$ *kgf/mm²* ..... (8)

이들 실험식 (2)~(8)로 부터 다음과 같이 모델화 시킬 수 있다.

$$\sigma = a - b \log N \quad \cdots\cdots (9)$$

여기서, a, b는 재료와 시험온도 상수이다.

이 모델은 Oh의 내열강 및 마찰 용접재의 700℃ 고온 회전굽힘 피로시험에서의 S-N곡선 모델[7]과는 다르다. 이는 시험온도 차이 때문이라고 생각된다. 그러나 $\sigma - \log N$ 좌표평면에서 S-N 상관성을 직선으로 보고 피로강도 σ와 반복수 N과의 상관 실험식을 구한 모델[6]과는 일치한다. 여기서, 식 (2)~(8)의 평균 기여도 R^2은 약 97%로서 매우 신뢰도가 높음을 보여준다.

3.4 열처리가 피로강도, 경도 및 충격치에 미치는 영향

Fig. 8은 각 열처리 조건과 수명 10^6*cycles*때의 피로한도와의 관계를 비교할 수 있도록 표시한 것으로서 뜨임처리 1회에서 4회까지는 피로한도가 증가 추세이나 5회에서는 피로한도가 감소하는 것을 알 수 있다. 뜨임처리 4회 한것의 피로한도가 뜨임처리 1회 한 것보다 약 21% 증가하고 있다.

Fig. 9는 각 열처리 조건과 경도와의 관계를 비교할 수 있도록 표시한 것으로서, 170℃ ×120분의 뜨임처리 1회의 경우는 담금질 경우보다 경도치의

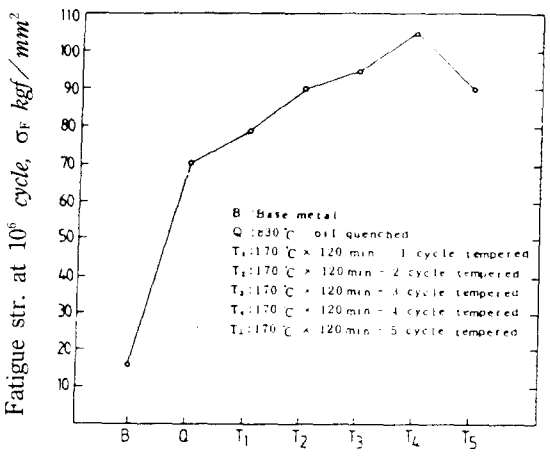

Fig. 8 Rotary bending fatigue strength at $N = 10^6$ *cycles* according to each heat treatment condition

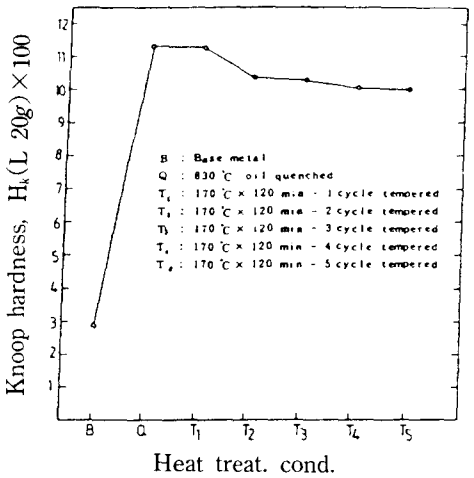

Fig. 9 Tempering cycle effects on surface hardness according to heat teatment conditions

저하 경향이 미소하여 인성회복이 거의 불가능하며, 따라서 피로수명 향상을 기대할 수 없고, 이는 170℃ 뜨임처리 온도가 대체로 낮은 것으로 생각된다.

따라서 뜨임처리 회수 2~5회의 경우는 담금질과 1회 담금질의 경우보다 경도치 저하가 10%정도로서 현저하지는 않지만 다소 인성회복과 수명향상을 예측할 수 있고, 그러나 베어링 실용상의

내마모성에 영향이 없을 정도인 H_RC 61~62 정도임이 확인된다.

Fig. 10은 각 열처리 조건과 충격치와의 관계를 비교할 수 있도록 표시한 것으로서 담금질한 후 170℃ ×120분의 뜨임처리를 1~5회로 회수를 증가할 수록 충격치가 약간씩 증가하는 경향이 있다. 다시 말하면, 뜨임처리 회수 2~5회의 경우는 회수 1회의 경우와 마찬가지로 충격치의 향상이 현저하지는 않으나 담금질의 경우보다 약 5~10%의 증가를 기대할 수 있음을 보여준다.

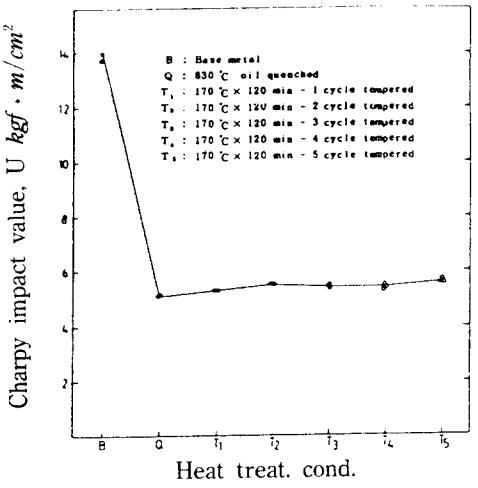

Fig. 10 Charpy impact values according to each heat treatment

3.5 열처리가 미시조직에 미치는 영향

Fig. 11은 각 열처리에서의 조직을 금속 현미경으로 1,000배 확대한 사진이다.

사진 B는 모재로서 피절삭정을 향상시키기 위해 800℃ 풀림처리를 한 구상화 탄화물 조직을 나타내며 기지는 페라이트(ferrite)이다.

사진 Q는 기름담금질×30분에 의해 구상 시멘타이트(cementite) (그 지름은 수 μm정도)가 마르텐사이트(martensite)기지에 분포되어 있으나 잔류오스테나이트(austenite)가 보인다.

사진 T_4는 뜨임처리 4회의 경우로서 뜨임처리 회수를 증가하므로 인하여 잔류 오스테나이트가 완전히 분해하게 되어 최소화 되고 마르텐사이트 기지에 미세한 구상 시멘타이트가 가장 균일 분포된 안정화 조직임이 확인되며, 이것이 피로수명 향상의 원인이 된다고 생각된다.

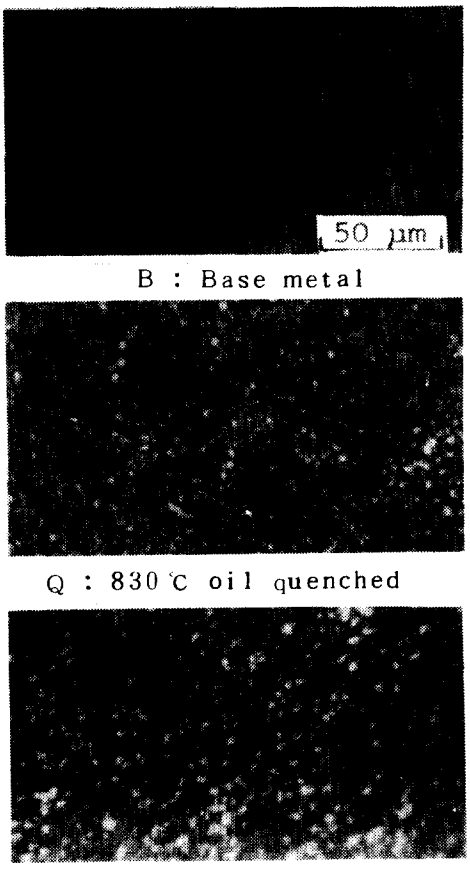

Fig. 11 Micro-structures according to each heat treatment

4. 결 론

고탄소 고크롬 베어링강(STB2)이 120℃ 고온회전굽힘 피로 강도 특성에 미치는 열처리의 영향에 관하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1) 800℃ 구상화 풀림 처리한 고탄소 고크롬 베어링강 모재를 830℃ ×30분 기름 담금질을 하였을 때 베어링 수명 $10^6 cycles$ 때의 피로강도(피로한도)는 $71 kgf/mm^2$로서 모재의 경우보다 약 4.4배 증가하였다.

2) 830℃ ×30분 기름 담금질한 후에 170℃ ×120분의 뜨임처리 1회로 부터 5회까지 시행하였을 때 그 피로한도및 피로수명은 기름 담금질의 경우보다 더욱 증가하다가 피크에 달한 후 감소하는 특

성이 존재한다.

3) 피로강도가 가장 높게 나타나는 최적 뜨임처리 회수는 4회의 경우였으며, 이때의 피로한도는 모재의 경우보다 약 6배로 증가했으며 1회 뜨임처리때 보다는 약 1.3배로 증가하였음이 확인되었다.

4) 응력 반복속도 3,500*rpm*하에서 모재, 담금질재 및 뜨임처리재에 대한 120℃ 고온회전 굽힘 피로시험 결과의 S-N곡선 실험식은 모든 실험치로부터 최소자승법을 이용한 회귀해석법에 의해 전산한 결과는 세미로그(*semi-log*) 좌표평면에서 신뢰성 높게 직선적으로 나타났고, $\sigma = a - b \log N$ (a, b는 재료, 시험온도 상수)으로 모델화 될수 있다.

5) 뜨임처리 회수가 경도에 미치는 영향을 조사한 결과, 기름 담금질 후 2~5회의 뜨임처리 회수인 경우가 1회 뜨임처리의 경우보다 경도치 저하가 10% 정도로 현저하지 않으며, 베어링 실용상의 내마모성에 영향이 없을 정도인 $H_RC61 \sim 62$ 정도임이 확인되었다.

6) 뜨임처리 회수 2~5회의 경우는 회수 1회의 경우와 마찬가지로 충격치의 향상이 현저하지는 않으나 기름 담금질의 경우보다 약 5~10%의 증가를 기대할 수 있다.

7) 뜨임처리 회수가 금속조직에 미치는 영향을 조사한 결과, 회수 4회일 때 잔류 오스테나이트가 완전히 파괴되어 최소화되고 마르텐사이트 기지에 미세한 구상 시멘타이트가 가장 균일 분포된 안정화 조직임이 확인되었으며, 이것이 피로수명 향상의 원인이 된다고 생각된다.

8) 뜨임처리 회수에 의해 베어링강의 피로수명 등 기계적 특성 향상의 조절 가능성이 확인되었다.

참 고 문 헌

1) Bisson, E.E, and W.J. Anderson, "Advanced Bearing Technoogy", NASA Sp-38, 1964

2) 日本熱處理技術協會, "機械部品の熱處理 (I)", P108, p. 112~120, 1970

3) 陳鴻賓, 王世民, 井形直弘, "0.8C-4Cr-4Mo-1V鋼の 熱處理 特性", 鐵と鋼, 68巻7號, p. 837~842, 1982

4) 坪田一一, "軸受鋼のころがり疲勞における板狀炭化物の生成に及ぼす接觸應力と基地炭素量の影響", 鐵と鋼, 69巻 11號, p. 1487~1493, 1983

5) 坪田一一, 大西公雄, 坂上高志, 石原晟好, "軸受鋼の壽命に及ぼす冷間壓延と高溫加熱處理の影響", 鐵と鋼, 70巻 8號, p. 854~860, 1984

6) 吳世奎, 李圭用, "航空機 및 舶用機關部品用異種耐蝕, 耐熱鋼의 摩擦壓接과 壓接部의 疲勞强度에 관한 硏究", 釜山水産大學硏究報告(自然科學), 20卷 2號, p. 49. 87, 1980

7) Oh, S. K., S.D. Han and U.J. Lim, "Effects of Postweld Aging Treatment on Rotary Bending Fatigue Strength of Friction Welded Joints at Elevated Temperature", J. Korea Society of Marine Engineers, Vol., No. 2, p. 36~49, 1983

8) Oh, S.K., K.Y.Lee, H.J. Kim, "A Study on Fatigue Strength of Friction-Welded Heat-Resisting Steels at High Temperature (1)", Proc. KSME June, p. 130~138, 1980

9) Oh, S.W. and Y.H. Yum, "Fatigue Strength and Crack Propagation of Spring Steels on Rotary Bending (1st Report)", Vol. 14, No. 2, p. 1~13, 1974

10) Oh, S.K., "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Technique", Ph. D. Thesis, Keio University, Part I, p. 27~42, p. 73~84, p. 85~98, p. 122~134, 1982

11) 山田新太郎, "金屬", 34, No. 24, 別冊, 1964

12) 河上益夫, "熱處理 7", No. 1, p. 2, 4, 1966, No. 4, p. 31, 1967

13) 鄭善謨, 韓東哲, "標準機械設計學(新版)", 東明社, p. 372~374, 1983

14) Pantereb, B.M., "Fracture of Metal", (V.S. Ivanova), Trans. by T. Yokobori, p. 190, 1970