

《 論 文 》

침질탄화처리한 고탄소 크롬 베어링강의 회전접촉 피로거동에 미치는 잔류오스테나이트의 영향

최병영 · 김동건 · 김창석* · 진재관**

전북대학교 공과대학 신소재공학부

*기아특수강(주)

**한화기계(주)

Effect of Retained Austenite on Rolling Contact Fatigue
 of Nitrocarburized High-Carbon Chromium Bearing Steel

Byung Young Choi · Dong Keon Kim · Chang Seok Kim* and Jai Koan Jin**

School of Advanced Materials Engineering,

Research Institute of Advanced Materials Development,

Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea

Kia Steel Co*

Hanwha Machinery Co**

ABSTRACT

Effect of retained austenite on rolling contact fatigue of nitrocarburized high-carbon chromium bearing steel has been investigated to develop surface-hardened bearing steel with improved resistance to rolling contact fatigue. Fatigue tests were conducted in elasto-hydrodynamic lubricating conditions at a shaft speed of 5,000rpm, under max. hertzian stress of $492\text{kg}/\text{mm}^2$.

Volume fraction of retained austenite in austenitic nitrocarburized STB2 steel was controlled by tempering at various temperature, 200~250℃. It was observed using TEM that decomposition of retained austenite during tempering at 250℃ was the highest in quantity, resulted in formation of lower bainite.

Rolling contact fatigue life of the specimens with lower bainite, formed by decomposition of retained austenite, was improved in comparison with there of specimens with more amount of retained austenite.

1. 서 론

침질탄화(nitrocarburizing)는 침탄표면에 암모니아 가스의 분해에 의해 발생하는 질소를 침투시켜 표면경화하는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 내마모성과 피로강도를 증가시키는 침탄(carburizing)보다 저온에서 짧은 시간 동안 실시하기 때문에 열처리 변형이 적고 표면경화층이 얇게 형성된다. 따라서 소형 베어링의 제조에 적합한 표면경화법이라고 생각된다.

베어링은 회전하는 축(shaft)을 지지하고 하중에 견디는 동시에 주로 탄성유체윤활(elesto-hydrodynamic lubrication)조건에서 회전운동을 전달하는 기계요소이며 작동 중에 궤도면에서 받는 반복적인 접촉응력에 의해 회전접촉 피로가 일어난 후 생성된 균열이 전파하여 궤도면에 박리가 발생하게 된다. 그러나 베어링은 작동 중에 윤활부족이나 이물질 또는 먼지로 인한 오염된 윤활(contaminated lubrication) 상태가 되어 표면기점 피로파괴가 일어날 때도 있다.⁽¹⁾

오염된 윤활조건에서 특수표면경화처리한 베어링을 수명시험한 결과⁽²⁾ 표면기점 피로파괴에 대한 저항성이 증가하였음을 밝힌 보고가 있었다. 그런데 특수표면경화를 어떠한 방법으로 실시하였는지 또한 표면기점 피로파괴에 대한 저항성의 증가원인이 구체적으로 무엇인지 밝혀지지 않고 있으며 조직 내에 잔류 오스테나이트가 분포하여 인성이 증가하기 때문에 균열전파를 억제한다고 언급하였다. 이 잔류오스테나이트는 베어링의 제조공정중 오스테나이트화와 템퍼링에 있어서 각각 그 온도를 변화시켜 조절할 수 있다. 그러나 오스테나이트화 온도가 변하면 잔류오스테나이트 뿐만 아니라 잔류 탄화물의 크기 및 분포도 동시에 변화되므로 잔류오스테나이트의 영향을 알아보려면 오스테나이트화 온도는 일정하게 하고 템퍼링 온도만을 변화시켜 분석하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 베어링이 주로 탄성유체 윤활조건에서 작동되는 점을 고려하여 베어링 소재로 가장 많이 사용되고 있는 고탄소 크롬 베어링강을 침질탄화한 후 템퍼링 온도를 변화시켜 템퍼링처리한

다음 탄성유체 윤활조건에서 회전접촉 피로시험을 실시하였다.

이때 회전접촉면 사이에 유막(oil film)이 형성되어 있는지 확인하고 회전접촉에 의한 역회전 전단응력(reversing shear stress)이 최대가 되는 영역에서 나타나는 미세조직의 변화와 피로균열의 생성 및 전파과정을 관찰하고 잔류오스테나이트 함량과 피로수명의 관계를 밝히려고 한다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

본 실험에 사용된 시편은 고탄소 크롬 베어링강(STB2)이며 화학성분을 분석한 결과 table 1과 같이 나타났다. 압연방향에 평행하게 절단하여 $\phi 9.525mm \times 100mm$ 규격의 봉상으로 기계가공과 정밀연삭가공하여 회전접촉 피로시험용 시편을 제작하였다. 또한 분석용 시편을 $\phi 20mm \times 10mm$ 의 크기로 제작하였다.

Table 1. Chemical composition of specimen (wt.%)

Elements Nomenclature	C	Si	Mn	P	S
STB2	1.02	0.25	0.31	0.02	0.015
Elements Nomenclature	Cr	Ni	Al	Ti	O
STB2	1.53	0.20	0.026	0.001	7ppm

2.2 열처리

그림 1에 나타난 바와 같이 회전접촉 피로시험용 시편과 분석용 시편을 850℃에서 4시간 동안 RX가스 60%와 NH₃가스 40%의 분위기로 가열하여 침질탄화처리한 후 80℃로 유지된 기름에 급냉한 후 200℃, 225℃ 및 250℃에서 2시간 각각 유지하여 템퍼링 하였다.

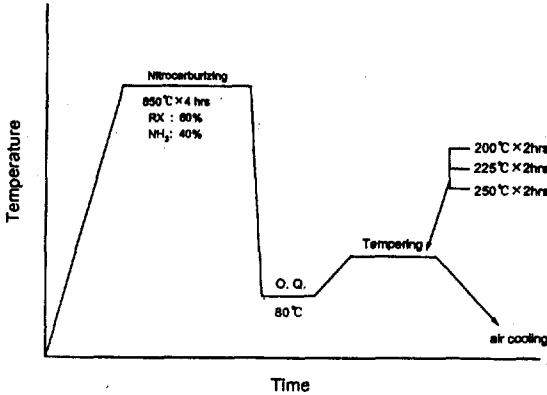
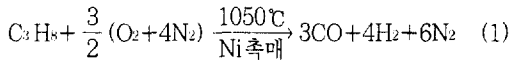


Fig. 1 Heat treatment cycle of nitrocarburizing

침질탄화처리에 사용된 분위기 가스는 다음 식 (1) 과 같은 반응을 통해 10m/hr의 유속으로 노내에 유 입시켰고 분위기 조절은 이슬점(dew point)이 -10°C 되도록 하였으며 질소 포텐셜은 표준 암모니아 피펫 을 사용하여 측정된 미분해 암모니아량이 22%가 되 도록 조절하였다.



현재 베어링 제조에 적용되고 있는 전경화(full hardening) 열처리한 경우와 침질탄화처리한 시편 과 비교검토하기 위해 그림 2와 같은 방법으로 전경 화처리를 실시하였다.

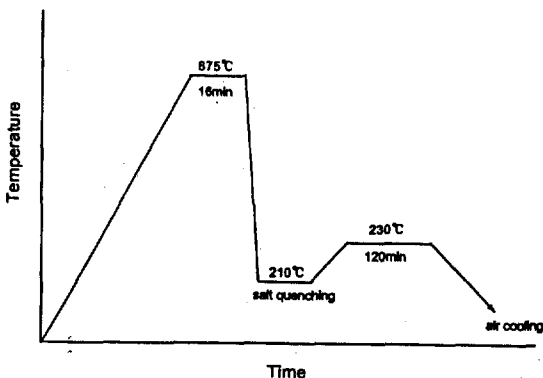


Fig. 2 Heat treatment cycle of full hardening

2.3 조직 관찰

열처리 후 시편의 미세조직을 주사 전자현미경과 투과 전자현미경으로 관찰하였고 회전접촉 피로시험 시 반복응력을 받는 궤도면 직하의 미세조직과 피로 균열의 생성 및 전파거동을 같은 방법으로 관찰하였 다.

2.4 경도 시험

마이크로 비커스 경도계를 사용하여 열처리한 시편 과 회전접촉 피로시험한 시편을 표면에서부터 수직방 향으로 50μm까지는 20g의 하중으로 측정하였고 그 이상 깊이 600μm까지는 200g의 하중으로 측정하여 회전접촉 피로시험에 의한 경도변화를 깊이에 따라 조사하였다.

2.5 잔류오스테나이트 측정

템퍼링 온도별로 나타나는 잔류오스테나이트량의 변화는 X-선 디프랙토미터를 사용하여 시편의 표면 에서부터 수직방향으로 깊이 50μm 간격으로 연속적 으로 300μm 깊이까지 측정하였다. 이때 사용한 X-선 은 CoKa이며 (200)_a, (211)_a와 (220)_γ, (311)_γ의 적 분강도를 측정하여 R. L. Miller의 직접비교법으로 부피분율을 계산하였다.

2.6 잔류응력 측정

침질탄화 및 전경화처리 후 시편의 표면으로부터 수직방향으로 깊이 500μm까지 100μm 간격으로 ASME E 915-85 방법으로 잔류응력을 측정하였다. X-선 타겟은 Cr을 사용하였으며 X-선 튜브의 전압과 전류는 각각 25kV와 5mA였다.

2.7 회전접촉 피로시험

그림 3에 주요부위를 도식적으로 나타낸 Polymet RCF-1 시험기에서 회전접촉 피로시험을 탄성유체 윤활조건으로 실시하였다. 시편에 가해지는 하중은 load cell에 strain indicator(HW1-D)를 연결하여

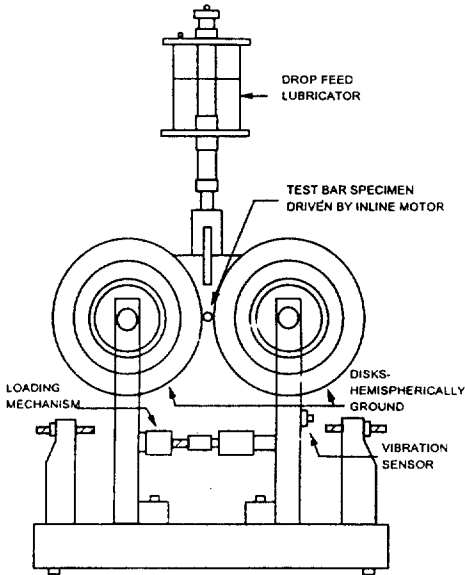


Fig. 3 Schematic diagram of front view of RCF tester

측정하였으며 296kgf의 하중과 회전속도 5,000rpm의 조건으로 Shell Tellus Oil 37 윤활유를 실온에서 분당 20방울의 속도로 시편에 공급하면서 회전접촉 피로시험을 실시하였다. 시험 중에 시편에 박리가 발생하면 시편 양쪽의 디스크와 시편의 접촉면에서 발생한 진동이 진동감지장치에 전달되어 시험기의 작동이 정지되며 이때 회전계에 나타난 회전수를 기록하였다. 본 실험에서 가해진 하중을 Hertz 응력으로 환산한 결과⁽³⁾ 492kg/mm²으로 나타났다.

3. 실험 결과

그림 4는 템퍼링 온도별로 전경화처리한 경우와 비교하여 각각 측정된 경도변화를 시편의 표면에서부터 깊이로 따라 나타낸 것이다. 템퍼링 온도가 증가함에 따라 경도가 감소하고 표면의 경도가 내부보다 낮게 나타났으며 전경화처리한 경우에 비해 침질탄화 후 템퍼링 했을 때 경도가 높게 나타났다.

그림 5는 동일 시편을 회전접촉 피로시험 후 케도

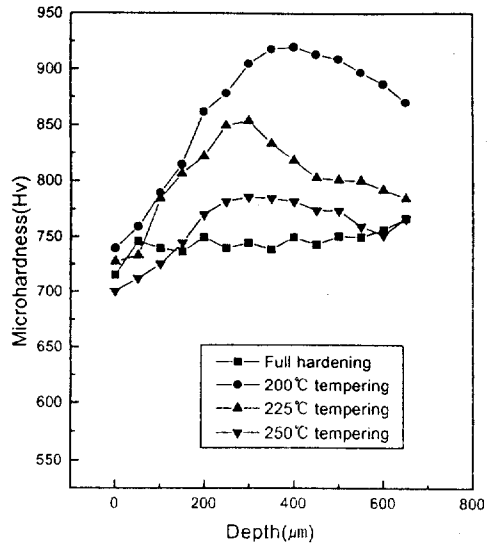


Fig. 4 Variation in hardness of surface layer as a function of depth from surface in the various heat-treated specimens

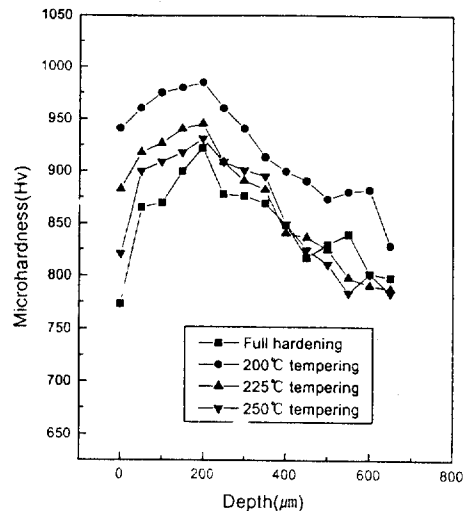


Fig. 5 Variation in hardness of surface layer rolling contact fatigued specimens as a function of depth from surface in the various heat-treated.

면의 경도변화를 나타낸 것이며 회전접촉 피로시험 후 경도가 증가하였고 표면에서부터 수직방향으로 200μm 깊이에서 최대경도가 나타남을 알 수 있다.

침질탄화 후 급냉한 시편과 템퍼링한 시편의 잔류 오스테나이트 함량을 표면에서부터 수직방향으로 50

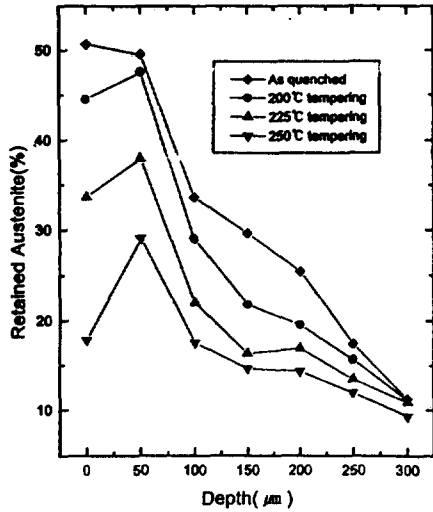


Fig. 6 Variation in amount of retained austenite as a function of depth from surface in the various heat-treated specimens

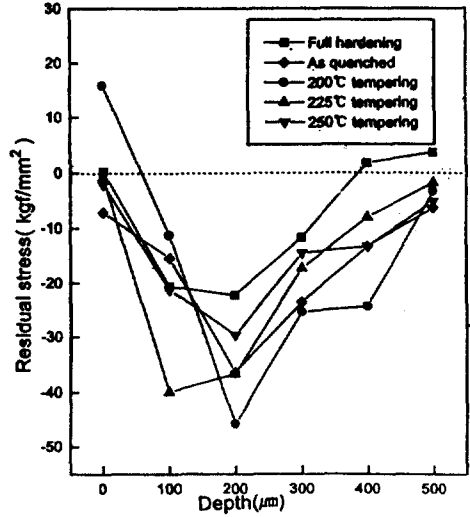


Fig. 7 Changes of the residual stress as a function of depth from surface in the various heat-treated specimens

μm 간격으로 연속적으로 측정된 결과 그림 6과 같이 나타났다. 급냉한 경우 잔류오스테나이트량이 표면에서 약 50%를 나타내고 있으며 수직방향으로 깊이가 증가함에 따라 감소하여 $300\mu\text{m}$ 깊이에서는 약 12%를 보여 주고 있다. 한편, 템퍼링 온도가 200°C 에서 250°C 로 증가함에 따라 잔류오스테나이트량이 점차적으로 감소하였으며 $50\mu\text{m}$ 깊이에서 템퍼링 온도가 200°C , 225°C 및 250°C 일 때 각각 잔류오스테나이트량이 약 47%, 38% 및 29%를 나타내어 최대값을 보이다가 깊이가 증가할수록 급냉한 경우와 같이 점차적으로 감소하였다.

그림 7은 잔류응력을 표면에서부터 수직방향으로 깊이에 따라 측정된 결과이며 표면에서 부터 수직방향으로 깊이 $500\mu\text{m}$ 까지 대부분 압축잔류응력이 열처리 후 형성되어 나타났다. 표면에서 부터 수직방향으로 $200\mu\text{m}$ 깊이에서 가장 큰 압축응력, 즉, 약 46kgf/mm^2 이 템퍼링 온도가 200°C 일 때 형성되었음을 일 수 있다.

사진 1은 템퍼링 온도가 각각 200°C , 225°C 및 250°C 일 때의 시편의 미세조직을 투과 전자현미경으로 관찰한 것이다. 200°C 에서는 템퍼드 마르텐사이트

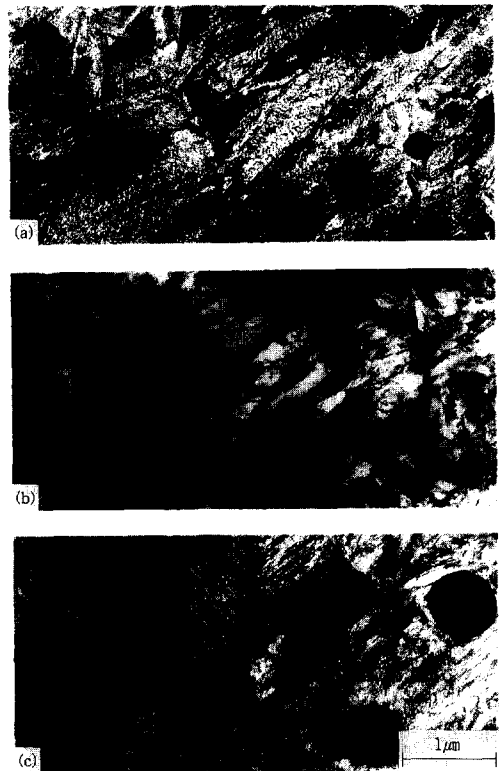


Photo. 1 TEM micrographs showing microstructural changes with tempering temperature (a) 200°C (b) 225°C (c) 250°C

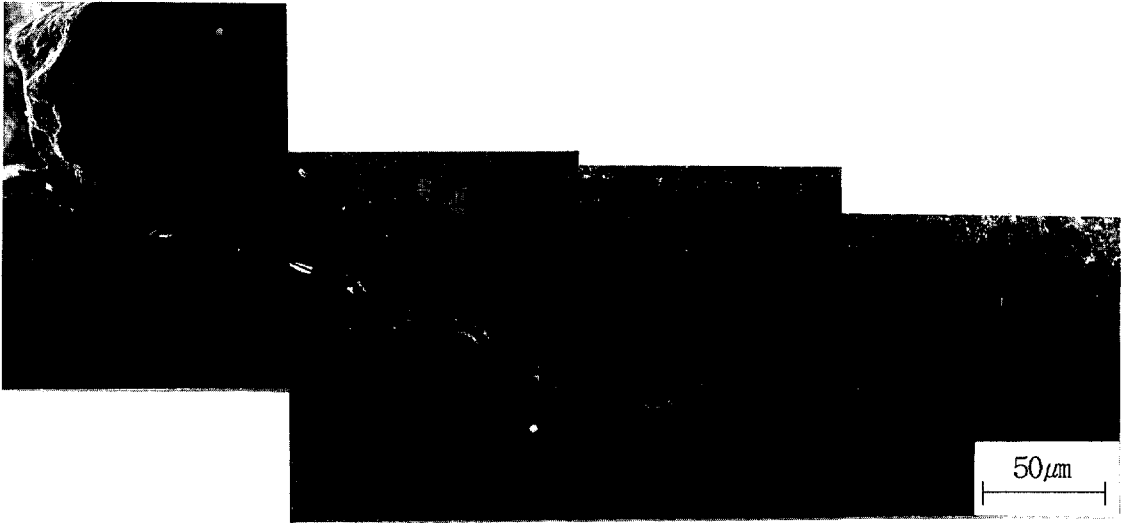


Photo.2 SEM micrograph showing a type of flaking after rolling contact fatigue test

트기지에 구상 탄화물이 분산되어 나타났다. 225℃에서는 기지조직이 일부 페라이트와 미세한 탄화물로 석출하기 시작하여 분포한 미세조직이다. 250℃에서

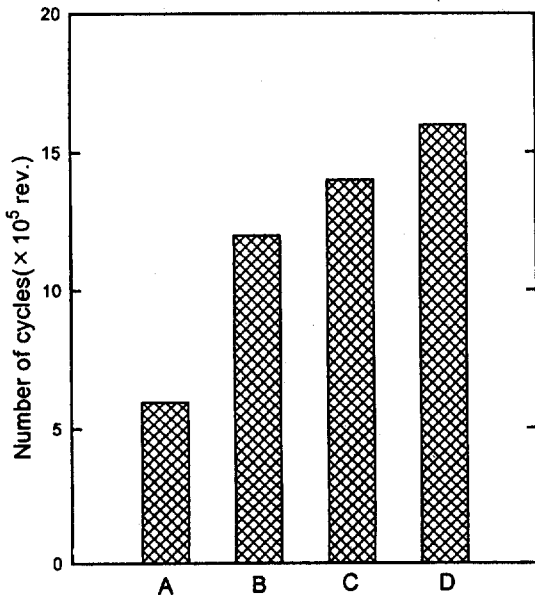


Fig. 8 Relationship between rolling contact fatigue life and heat treatment method

- (a) Full hardening
- (b) 200℃ tempering after nitrocarburizing
- (c) 225℃ tempering after nitrocarburizing
- (d) 250℃ tempering after nitrocarburizing

는 미세한 탄화물이 기지에 현저하게 석출하여 중심 부위에서 하부베이나이트조직이⁽⁴⁾ 형성되어 나타났다. 기지조직이 이와 같이 템퍼링 온도의 변화에 따라 달라지는 반면에 구상 탄화물은 거의 변화없이 기지조직에 분산되어 분포하였다.

사진 2는 회전접촉 피로시험시 바리가 발생한 궤도면 직하의 피로균열의 생성 및 전파를 주사 전자현미경으로 관찰한 미세조직이며 템퍼링 온도가 250℃인 경우이다. 피로균열 성장에 대한 저항이 매우 높아 균열이 휘어져 전파하여 성장이 지연되었음을 나타내 주고 있다.

그림 8은 전경화처리한 경우와 침질탄화 후 200℃, 225℃ 및 250℃에서 템퍼링한 경우 회전접촉 피로수명을 나타낸 것이며 전경화처리에 비해 침질탄화 후 템퍼링한 경우 현저하게 수명이 증가하였고 템퍼링 온도가 증가할수록 수명이 증가하였다.

4. 고찰

고탄소 크롬 베어링강을 침질탄화하면 전경화처리한 경우에 비해 그림 4와 같이 경도가 높게 나타나는 것은 질화물 또는 질탄화물의 화합물이 표면층에 형

성되기 때문이며⁽⁵⁾ 표면의 경도가 그림 4에서 나타난 바와 같이 내부보다 낮게 나타나는 것은 질소 및 탄소 확산에 의한 오스테나이트 안정화 효과로 인한 잔류 오스테나이트량의 변화가 이를 뒷받침해 주고 있다.

회전접촉 피로시험 후 경도가 그림 5와 같이 증가한 것은 시편의 궤도면 영역에 반복적으로 가해지는 Hertz 응력으로 인해 궤도면 영역이 소성변형되면서 가공경화가⁽⁷⁾ 일어나며 잔류오스테나이트의 변태유기소성에 기인한 것이라고⁽⁸⁾ 생각된다. 또한 표면에 서부터 수직방향으로 200 μm 깊이에서 최대경도가 나타난 것은 최대전단응력이 작용하여 가장 높은 경도 상승이 일어났기 때문이라고 판단된다.

잔류오스테나이트량이 급냉상태인 경우에 비해 템퍼링함에 따라 그림 6에 나타난 바와 같이 감소하는 것은 템퍼링시 잔류오스테나이트가 분해되어 페라이트와 탄화물이 생성되는데 기인하며⁽⁹⁾ 수직방향으로 깊이가 증가함에 따라 감소하는 것은 질소 및 탄소 확산영역의 농도구배에 의한 오스테나이트의 화학적 안정화의 차이에 기인한다고 생각된다.

전경화처리한 경우에 비해 침질탄화처리했을 때 그림 8과 같이 회전접촉 피로수명이 현저하게 증가한 것은 그림 4에 나타난 바와 같이 표면층의 경도가 높고 최대전단응력이 작용하는 영역에 해당하는, 표면에서부터 수직방향으로 약 200 μm 깊이에서 그림 7과 같이 더욱 큰 압축응력의 형성에 기인한다고 생각된다.

한편 템퍼링 온도가 200 $^{\circ}\text{C}$ 에서 250 $^{\circ}\text{C}$ 로 증가함에 따라 그림 8에 나타난 바와 같이 회전접촉 피로수명이 증가한 것은 사진 1과 같이 템퍼링 온도가 증가할수록 잔류오스테나이트가 분해하여 250 $^{\circ}\text{C}$ 일 때에는 하부베이나이트가 형성되며 하부베이나이트의 높은 파괴인성으로 인해⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 사진 2와 같이 피로균열이 휘어져 전파하는데 그 주된 원인이 있다고 판단된다.

5. 결론

고탄소 크롬 베어링강을 침질탄화 후 템퍼링 온도를 200 $^{\circ}\text{C}$, 225 $^{\circ}\text{C}$ 및 250 $^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜 잔류오스테

나이트량을 각각 다르게 형성시킨 후 탄성유체 윤활 조건에서 회전접촉 피로시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 침질탄화 후 템퍼링 온도가 증가함에 따라 잔류오스테나이트가 분해하여 기지조직에 페라이트와 미세한 탄화물이 형성되었으며 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 템퍼링한 경우 투과 전자현미경에 의한 하부베이나이트가 형성되었음이 밝혀졌다. 결과적으로 이 경우 잔류오스테나이트가 가장 낮게 나타났다.
2. 침질탄화처리 후 표면에서부터 수직방향으로 깊이가 증가함에 따라 경도와 잔류오스테나이트량의 변화가 나타났으며 이는 오스테나이트의 화학적 안정화 차이에 기인한 것이라고 생각된다.
3. 침질탄화 후 템퍼링온도가 250 $^{\circ}\text{C}$ 인 경우 회전접촉 피로수명이 가장 높게 나타났으며 그 주된 원인은 잔류오스테나이트가 분해하여 하부베이나이트가 형성되어 피로균열 성장에 대한 높은 저항성을 나타내는데 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 1995년도 전북대학교 자동차신기술연구소의 연구지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. A. Lubreeht et al.: Proc. Jpn. Int. Tribology Conf. Nagoya (1990) 185
2. Y. Fujita and T. Hoshino: Koyo Engineering Journal, Vol. 126 (1984) 28
3. E. N. Bamberger and J. C. Clark: Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels, ASTM STP 771 (1982) 85
4. 이영구, 최병영: 대한금속학회지 제 31권 제 4호 (1993) 500

5. 진재관 : 전북대학교 박사학위 논문 (1995)
6. G. Krauss: Principles of Heat Treatment of Steel, ASM (1980) 270
7. N. P. Suh: Wear, Vol. 25 (1973) 111
8. 윤동주, 윤기봉, 최병영: 대한금속학회지 제 32권 제 12호 (1994) 1531
9. G. R. Speich and W. C. Leslie: Metall. Trans. Vol. 3 (1972) 1043
10. S. Tanaka et al.: Trans. ISIJ, Vol. 15 (1975) 19
11. J. P. Naylor and P. R. Krahe: Metall. Trans. A, Vol. 5 (1974) 1699