

C계 유도경화 베어링강의 회전접촉 피로거동에 미치는 Mn 첨가의 영향

정 경 조 · 윤 기 봉* · 최 병 영

전북대학교 공과대학 금속공학과

* 한국표준과학연구원 소재특성평가센터

Effect of Mn Addition on Rolling Contact Fatigue of
C-Base Induction Hardened Bearing Steels

Kyung-Jo Jung, Kee-Bong Yoon*, Byung-Young Choi

Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 560-756, Korea

*Korean Research Institute of Standards and Science, Materials Evaluation Center, Taejon
305-606, Korea

ABSTRACT

Effect of Mn addition on rolling contact fatigue of C-base induction hardened bearing steels has been investigated to develop inexpensive surface-hardened bearing steels with improved resistance to rolling contact fatigue. Fatigue tests were conducted in elasto-hydrodynamic lubricating conditions at a shaft speed of 5,000 rpm, under max. Hertzian stress of 492kg/mm^2 .

It was found in the C-Mn steels that effective depth of induction hardened layer and amount of retained austenite were slightly increased in comparison with those of C-base steels. Finer interlamellar spacing of pearlite in the C-Mn steels was also observed using TEM. Decomposition of retained austenite during rolling contact fatigue was smaller in quantity in the C-Mn steels than C-base steels. This might be associated with enhanced mechanical stability of retained austenite with addition of Mn. Statistical analysis of fatigue life for C-Mn steels using Weibull distribution indicated that improved resistance to rolling contact fatigue was mainly attributed to transformation induced plasticity and mechanical stability of retained austenite.

1. 서 론

베어링은 회전하는 축을 지지하고 하중에 견디는 동시

에 윤활조건하에서 회전운동을 전달하는 기계요소이며 작동 중에 궤도면에서 받은 반복적인 접촉응력에 의해 회전접촉 피로가 일어난 후 생성된 균열이 전파하여 궤

도면에 박리가 발생하게 된다¹⁾.

자동차와 철도차량 및 각종 기계의 고속화에 따라 베어링의 회전접촉 피로가 매우 빠르게 진행되므로 베어링 소재의 회전접촉 피로저항을 더욱 높여야 할 필요가 생기게 되었으며 이를 위해 침탄²⁾ 등 표면경화한 베어링강을 소재로 사용하였으나 침탄시간이 길고 제조비용이 많이 드는 단점이 있다. 최근에 시도되고 있는 이온주입³⁾은 이온의 침투깊이가 표면적하 0.5 μm 이하로 매우 얇기 때문에 트라이볼러지(tribology) 측면에서 윤회상태가 극히 양호한 경우로 그 적용이 제한된다. 반면 유도경화⁴⁾는 표면만 급속히 가열 후 급냉하므로 짧은 시간에 처리할 수 있고 열처리변형이 적으며 제조비용이 적게 들 뿐만 아니라 자동화 생산이 용이하여 저비용 표면경화 베어링을 제조하는 데 매우 적합할 것으로 기대된다.

합금원소를 첨가하지 않은 경우, 유도경화에 적합한 강은 중탄소강이므로 본 연구에서는 중탄소강을 유도경화 후 회전접촉 피로시험을 실시하여 피로거동을 조사하고 경화능 중대에 효과적인 Mn을 첨가한 중탄소강과 비교검토하여 회전접촉 피로저항이 높은 유도경화 베어링강을 개발하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 또한 C와 Mn⁵⁾은 Ms온도를 낮추고 오스테나이트를 안정화하는 역할을 하므로 유도경화 후 잔류 오스테나이트가 생성되어 회전접촉 피로시험 중에 중탄소강과 Mn을 첨가한 중탄소강에서 각각 다른 잔류 오스테나이트 거동이 나타날 것이다. 따라서 본 연구에서는 이를 비교분석하여 중탄소강과 Mn을 첨가한 중탄소강의 회전접촉 피로저항과의 상호 관계를 규명하려고 한다.

2. 실험방법

전기로에서 용해한 후 진공탈가스 처리한 다음 열간압연하여 환봉으로 제조된 C계 시편과 Mn을 첨가한 시편의 화학성분을 분석한 결과 Table 1과 같이 나타났다. C계 시편의 C조성과 Mn을 첨가한 시편의 Mn조성은 유도경화에 적합하고 유도경화 후 회전접촉 피로저항이 높

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

구분	원소	C	Si	Mn	P	S	Fe
C계		0.44	0.23	0.67	0.008	0.004	bal.
C-Mn계		0.44	0.31	1.71	0.018	0.011	bal.

게 나타날 수 있는 조성을 택하였고 시편별로 미세조직을 관찰하였다.

회전접촉 피로시험용 시편을 기계가공과 연삭가공에 의해 직경 9.525mm, 길이 100mm의 봉상으로 만들어 제작하였다.

이 시편을 progressive hardening 방법으로 고주파 유도경화장치에서 유도코일로 가열한 후 냉각수를 분사하여 표면경화하였다. 유도경화 후 템퍼링한 다음 마무리 정밀연마한 후 시편의 표면조도를 측정 한 결과 0.171~0.242 μm , Ra로 나타났다.

유도경화한 시편의 표면에서부터 수직방향으로 깊이에 따른 경도분포를 100 μm 깊이마다 마이크로 비커스 경도계로 하중 300g을 가하며 연속적으로 측정하여 조사하였으며 시편별 유도경화층 깊이를 경도분포곡선으로부터 구하였다⁶⁾.

회전접촉 피로시험은 Fig. 1에 주요부위를 도식적으로 나타낸 Polymet RCF-1 시험기에서 윤활유 Shell Tellus Oil 37을 시편에 공급하면서 하중 296kgf, 회전속도 5,000rpm의 조건으로 시편별로 각각 10회씩 실시하였다. Fig. 1의 시편 양쪽에 접하여 위치한 디스크에 의해 시편에 하중이 가해지며 시편과 연결된 모터에 의

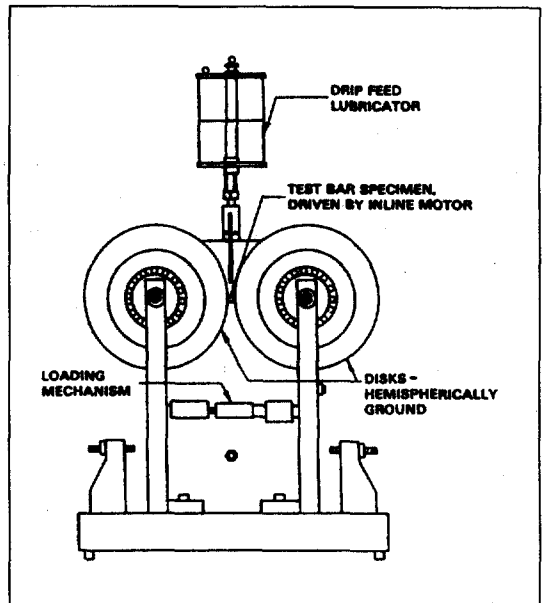


Fig. 1 Schematic diagram of front view of RCF tester.

해 시편이 회전하면서 시편에 접촉한 디스크도 회전하도록 되어 있다. 이 때 시편에 가해지는 하중은 로드셀(load cell)에 스트레인 지시기(strain indicator, HW1-D)를 연결하여 측정한다. 시험 중에 시편에 박리가 발생하면 디스크와 시편 사이에 발생한 진동이 진동감지장치에 전달되어 시험기의 작동이 멈추며 회전계에 나타난 수치를 그 시편의 회전접촉 피로수명으로 기록하였다.

본 실험에서 시편에 가해진 하중을 Hertz응력으로 환산한 결과⁷⁾ 492kg/mm²으로 나타났다.

C계 시편과 Mn을 첨가한 시편의 회전접촉 피로수명을 와이블 분포(Weibull distribution)의 통계적 해석방법으로⁸⁾ 나타내어 비교검토했다.

회전접촉 피로시험시 반복응력을 받는 궤도면 직하의 경도변화도 유도경화한 시편과 같은 방법으로 궤도면에서 수직방향으로 깊이에 따라 연속적으로 측정하여 경도 분포곡선으로 나타내었다.

유도경화한 C계 시편과 Mn을 첨가한 시편의 표면경화층의 미세조직과 회전접촉 피로시험시 시편의 궤도면 영역에서 발생한 피로균열의 생성 및 전파를 관찰하고 이를 피로수명과 각각 비교하여 고찰하였다.

또한 회전접촉 피로시험시 C계 시편과 Mn을 첨가한 시편의 잔류 오스테나이트의 분해량을 시편별로 알아보기 위해 반복응력을 받지 않은 영역과 반복응력을 받은 영역을 모노크로메이터를 사용한 X-선 회절시험에 의해 주사하여 얻어진 회절선의 적분강도를 측정하여 R. L.

Miller에 의한 직접비교법으로 잔류 오스테나이트의 부피분율을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

유도경화한 C계 시편과 Mn을 첨가한 시편의 미세조직을 시편의 표면에서부터 수직방향으로 깊이에 따라 연속적으로 관찰한 결과 각각 Photo 1 및 Photo 2와 같이 나타났고 경도분포를 측정한 결과 각각 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 나타났다.

Fig. 2로부터 C계 시편을 유도경화했을 때 유효경화층이 표면에서부터 수직방향으로 깊이가 약 1.7mm가 형성되었음을 알 수 있고 Mn을 첨가한 시편에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 유효경화층의 깊이가 약 2.0mm이었다. 동일한 방법으로 모든 시편을 측정한 결과 C계 시편은 유효경화층 깊이가 약 1.7~1.8mm, Mn을 첨가한 시편은 약 1.9~2.0mm로 나타나 Mn을 첨가했을 때 유효경화층 깊이가 최대 0.3mm 만큼 더 깊게 형성되었다. 이 결과는 Mn이 C계 시편에 첨가됨에 따라 유도경화능(induction hardenability)이 증대되는 데 기인한 것이며 그 경화층 깊이의 정량적 증가가 일반 열처리에 비해 적은 것은 유도가열시간이 짧은 데 기인한 것이라고 판단된다. 반면 경화층의 경도값은 C계 시편과 Mn 첨가시편 공히 약 Hv 700으로 나타나 거의 같았으며 이는 C계 시편과 Mn 첨가시편의 탄소함량이 같기 때문이다. 즉,

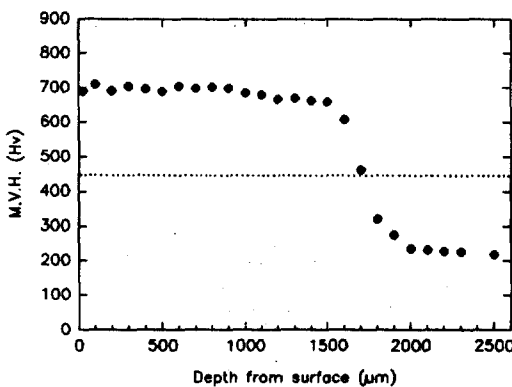


Fig. 2 Microhardness variation as a function of depth from surface in the C base induction-hardened specimen.

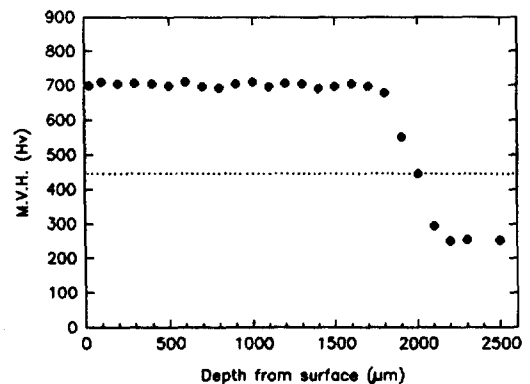


Fig. 3 Microhardness variation as a function of depth from surface in the C-Mn base induction-hardened specimen.

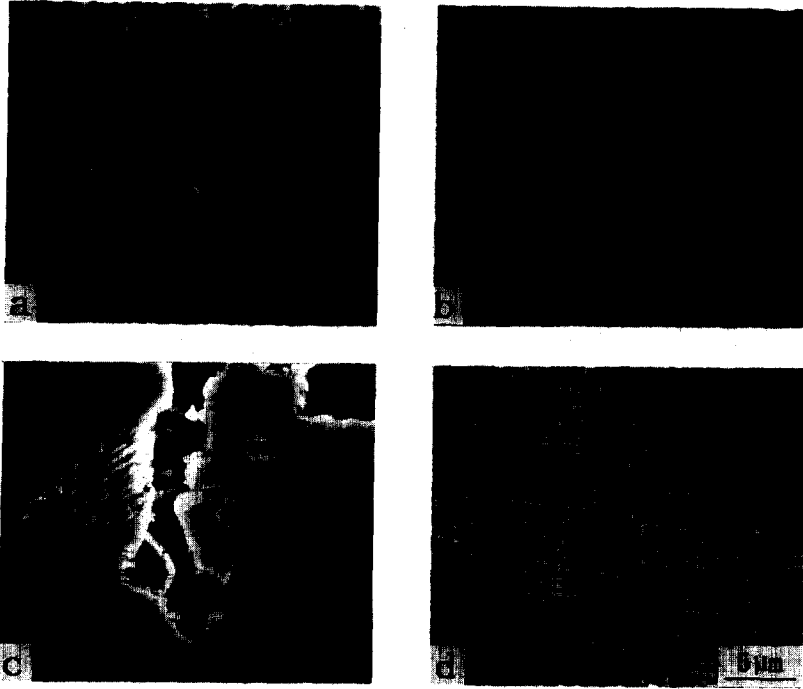


Photo 1. Microstructural changes with depth from surface in the C base induction-hardened specimen.
(a) surface (b) subsurface (c) region of effective depth (d) interior region

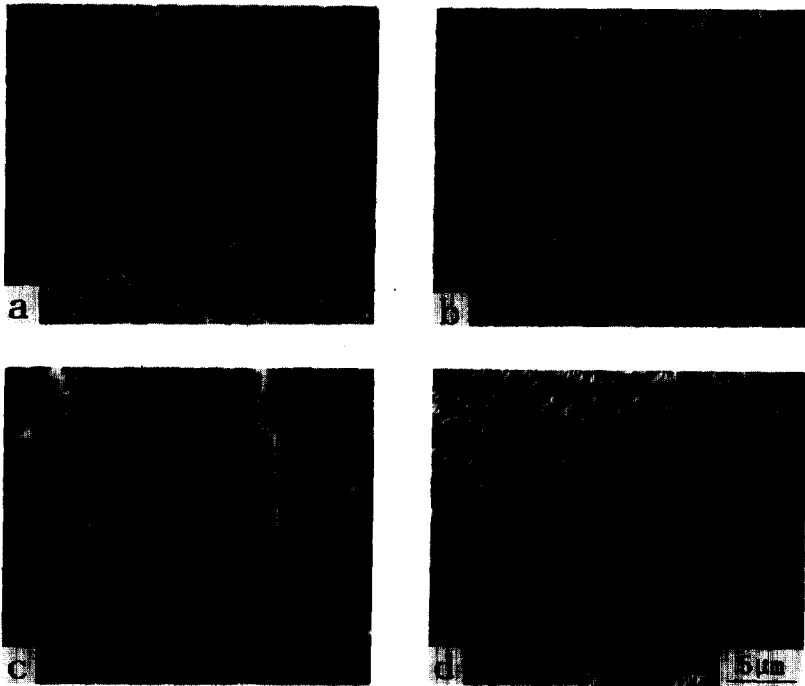


Photo 2. Microstructural changes with depth from surface in the C-Mn base induction-hardened specimen.
(a) surface (b) subsurface (c) region of effective depth (d) interior region

유도경화시 경화층의 경도값은 주로 탄소량에 의해 결정되며 Mn의 첨가영향은 미미한 것으로 나타났다.

Photo 1 (a)~(d)는 각각 유도경화한 C계 시편의 표면, 표면직하, 유효경화층 깊이에 해당하는 경계영역 및 내부영역의 미세조직이다. Photo 1 (a), (b)의 표면경화층에는 마르텐사이트가 형성되었고 조대한 마르텐사이트와 미세한 마르텐사이트가 혼합하여 분포하였다. Photo 1 (c)의 경계영역은 마르텐사이트와 펄라이트 및 페라이트의 혼합조직이 형성되었고 내부영역에는 유도경화 전 조직인 펄라이트와 페라이트가 Photo 1 (d)와 같이 분포하였다. Photo 2 (a)~(d)는 각각 유도경화한 Mn 첨가시편의 표면, 표면직하, 유효경화층 깊이에 해당하는 경계영역 및 내부영역의 미세조직이며 Photo 1의 C계 시편의 경우와 다른 점은 내부영역의 펄라이트 층상조직이고 그 외는 거의 같게 나타났다. Photo 1 (d)와 Photo 2 (d)의 내부영역의 미세조직을 투과전자현미경에 의해 확대관찰한 결과 Photo 3에 나타난 바와 같이 Mn 첨가시편의 펄라이트 층상 간격이 C계 시편에 비해 미세하게 나타나므로 Mn 첨가시편의 펄라이트가 C계 시편보다 낮은 온도에서 형성되었음을 알 수 있다⁹⁾. 다시 말해서 Mn 첨가로 인해 공석온도가 낮아져 결과적으로 C계 시편보다 낮은 온도영역까지 오스테나이트상이 안정하게 된다.

Photo 1 (a), (b)와 Photo 2 (a), (b)의 표면경화층에 조대한 마르텐사이트와 미세한 마르텐사이트가 혼합하여 분포한 것은 짧은 유도가열 중에 생기는 오스테나이트화 온도구배에 기인한 것이라고 생각되며 경도값의 차이는 거의 없었다.

Fig. 4는 유도경화한 C계 시편의 회전접촉 피로시험

전후에 나타난 표면경화층의 X-선 회절패턴이다. 마르텐사이트상의 회절 피이크인 (200) α , (211) α , (220) α 와 잔류 오스테나이트상의 회절피이크인 (200) γ , (220) γ , (311) γ 가 나타나고 잔류 오스테나이트의 부피분율은 Fig. 4의 윗부분의 회전접촉 피로시험 전에 14.2%이다. 회전접촉 피로시험 중에 레도면에서 반복적으로 작용하는 최대전단응력으로 인한 변태유기소성에 의해 이 잔류 오스테나이트가 분해되어 Fig. 4의 아랫부분에 나타난 바와 같이 회전접촉 피로시험 후에 6.4%로 잔류 오스테나이트의 부피분율이 감소하였다. Fig. 5는 유도경화한 Mn 첨가시편의 회전접촉 피로시험 전후에 나타난 표면경화층의 X-선 회절패턴이며 잔류 오스테나이트의 부피분율이 회전접촉 피로시험 전에 17.5%가 피로시험 후에 9.1%로 감소하였다. 잔류 오스테나이트의 분해량을 계산한 결과 유도경화한 C계 시편은 54.9%이고 Mn 첨가시편은 48.0%로 나타났다. 모든 시편을 같은 방법으로 X-선 회절시험 후 분석한 결과 회전접촉 피로시험 전, 즉 유도경화시 잔류 오스테나이트의 생성량은 C계 시편이 14.2%~15.4%였으며 Mn 첨가시편은 16.6%~18.2%로 나타났고 회전접촉 피로시험 후 잔류 오스테나이트의 분해량은 C계 시편이 48.3%~60.9%, Mn 첨가시편이 42.8%~53.7%이었다. 이 결과로부터 알 수 있는 것은 Mn 첨가로 인해 유도경화시 잔류 오스테나이트의 생성량은 최대 4.0% 증가하였으나 회전접촉 피로시험에 의한 잔류 오스테나이트의 변태유기소성에 기인한 잔류 오스테나이트의 분해량은 유도경화시 생성된 잔류 오스테나이트량에 비례하여 증가하지 않고 오히려 C계 시편에서 대부분 높게 나타난 것이다. 즉, 유도경화한 C계 시편에 Mn이 첨가되어 잔류 오스테나이트의 열적

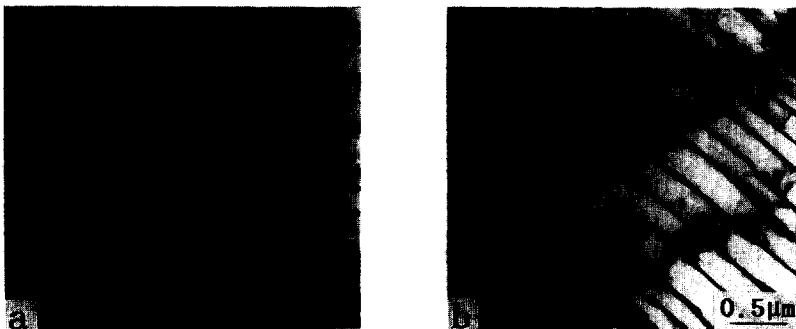


Photo 3. TEM micrographs showing pearlite lamellar in the interior of (a) C base and (b) C-Mn base induction-hardened steels.

안정성(thermal stability)은 물론 회전접촉 피로에 의한 변태유기소성을 억제하는 기계적 안정성(mechanical stability)도¹⁰⁾ 증가하게 되는 것을 본 실험을 통해 밝히게 되었다.

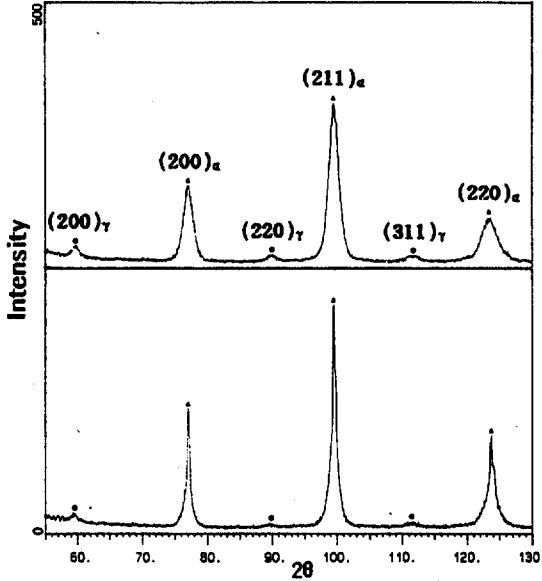


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of induction-hardened and rolling contact fatigued C base specimen respectively.

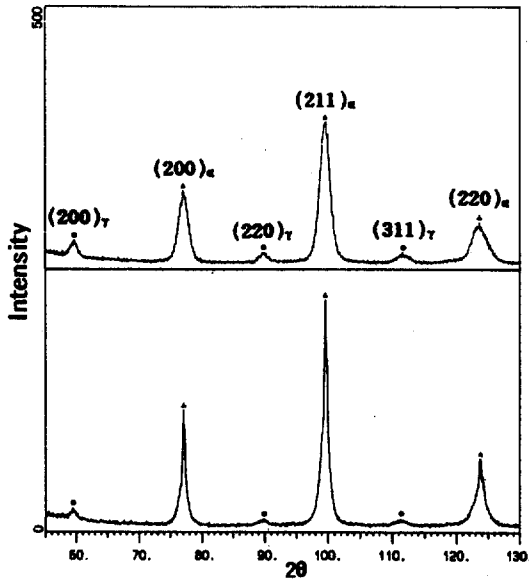


Fig. 5 X-ray diffraction patterns of induction-hardened and rolling contact fatigued C-Mn base specimen respectively.

윤활유를 공급하면서 회전접촉 피로시험을 실시한 후 C계 시편과 Mn 첨가시편의 레도면 직하 수직방향으로 100 μ m 깊이마다 연속적으로 측정한 경도변화를 회전접촉 피로시험 전, 유도경화층의 경도분포와 비교하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. 회전접촉 피로시험 후 C계 시편과 Mn 첨가시편 모두 레도면 직하 약 300 μ m 깊이까지 경도가 증가하였고 약 200 μ m 깊이에서 가장 큰 경도상승이 일어났다. 그러나 경도상승영역에서

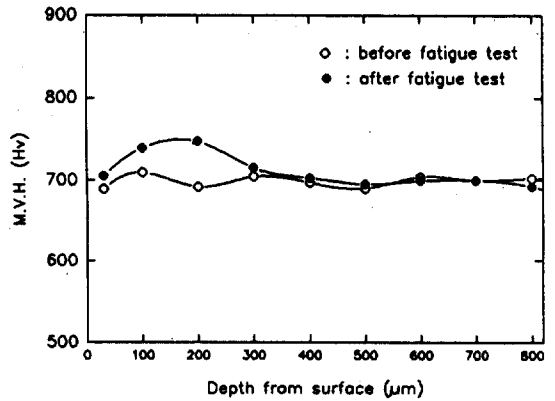


Fig. 6 Microhardness variation as a function of depth from surface in the induction-hardened and rolling contact fatigued C base specimen respectively.

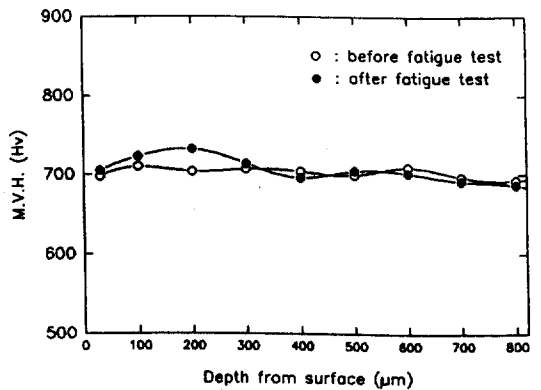


Fig. 7 Microhardness variation as a function of depth from surface in the induction-hardened and rolling contact fatigued C-Mn base specimen respectively.

나타난 경도증가량은 Mn 첨가시편이 C계 시편에 비해 최대 약 ΔHv , 50 만큼 적게 나타났다. 이 경도상승영역에서 회전접촉 피로시험 중 최대전단응력이 반복적으로 작용하여 잔류 오스테나이트의 변태유기소성과 변형경화¹¹⁾가 일어나며 Mn 첨가시편이 C계 시편에 비해 경도증가량이 적은 것은 앞에서 언급한 바와 같이 Mn이 첨가되어 회전접촉 피로에 의한 변태유기소성을 억제하는 잔류 오스테나이트의 기계적 안정성의 증가에 기인한 것이라고 생각된다.

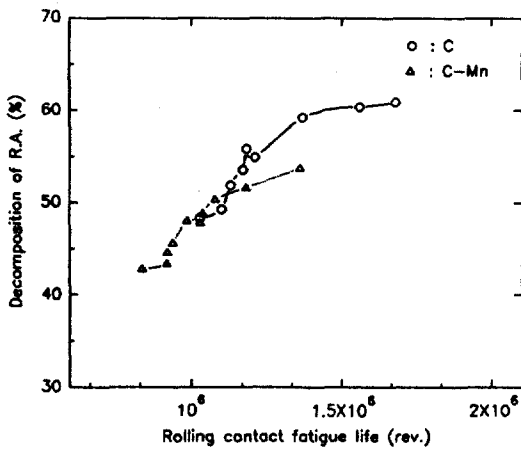


Fig. 8 Relationship between decomposition of retained austenite and the rolling contact fatigue life in the C base and C-Mn base specimens respectively.

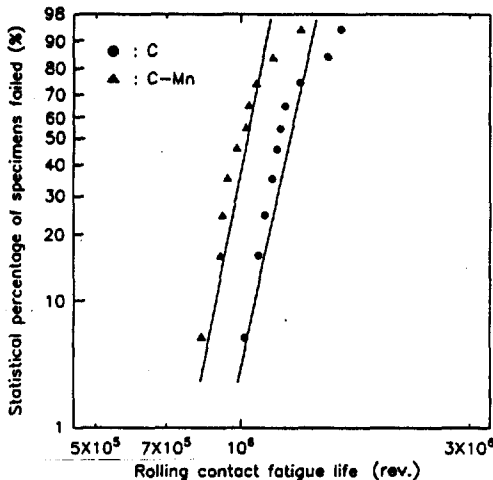


Fig. 9 Weibull analysis of rolling contact fatigue life of C base and C-Mn base specimens respectively.

회전접촉 피로에 의해 일어나는 변태유기소성의 정도를 정량적으로 나타내는, 잔류 오스테나이트의 분해량과 회전접촉 피로수명과의 관계를 시편별로 조사한 결과 Fig. 8과 같이 나타났다. 잔류 오스테나이트의 분해량이 증가함에 따라 거의 비례하여 회전접촉 피로수명이 증가하였고 분해량이 약 50% 이상이 되면 Mn 첨가시편이 C계 시편에 비해 분해량의 증가율은 낮았는데 오히려 피로수명은 급격히 증가하였다. 이 때 피로균열의 관찰을 통해 분해량이 50% 미만으로 낮은 경우에는 거의 직선적으로 전파하였고 50% 이상, 높은 분해율에서는 균열이 휘어져 전파하는 것을 확인하였다. Fig. 8의 C계 시편과 Mn 첨가시편의 회전접촉 피로수명을 와이불 분포의 통계적 해석방법으로 나타내기 위해 다음식, 신뢰도 함수 $R(x)$ 를 사용하였다¹²⁾.

$$R(x) = \exp \left[-\left(\frac{x-x_0}{\theta-x_0} \right)^b \right] \quad x \geq x_0 \quad (1)$$

$$R(x) = \exp \left[-\left(\frac{x}{\theta} \right)^b \right] \quad x \geq 0 \quad (2)$$

위 식에서 b : 와이불계수

θ : 특성치 또는 척도값

x_0 : x 의 최소 기대값

x 의 최소 기대값인 $x_0=0$ 일 때 (1)식은 (2)식으로 되며 2매개변수 분포(two-parameter distribution)라 한다. (2)식을 사용하여 와이불 선도에 회전접촉 피로수명을 나타낸 결과 Fig. 9와 같이 C계 시편과 Mn 첨가시편 모두 피로수명의 분산범위가 적어 높은 신뢰도를 보여 주고 있다. 단지 직선에서 많이 벗어난 C계 시편의 가장 수명이 긴 두 점의 데이터는 신뢰도가 비교적 낮고 이는 Fig. 8의 잔류 오스테나이트의 분해량이 60% 이상인 두 C계 시편의 데이터에 해당한다. 따라서 신뢰도를 고려할 경우 Fig. 8의 잔류 오스테나이트의 분해량이 60% 이내에서 가장 높은 피로수명은 C계 시편인 경우 1.4×10^6 이고 Mn 첨가시편에서는 1.4×10^6 으로 나타났고 이 때 잔류 오스테나이트의 분해량은 시편별로 각각 최대치인 59.2%와 53.7%이었다. 이 결과는 신뢰도와 회전접촉 피로저항이 높은 유도경화 베어링강의 개발 가능성을 보여 주고 있다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9의 결과로부터 잔류 오스테나이트의 분해량이 50~60%일 때 C계 유도경화 베어링강에서는 주로 잔류 오스테나이트의 변태유기소성이 회전접촉 피로저항에 기여한 반면 Mn이 첨가된 경우에는 잔류 오스테나이트의 기계적 안정성도 함께 피로

저항에 기여함을 알게 되었다. 정밀 베어링에는 회전접촉 피로저항 이외에 잔류 오스테나이트의 기계적 안정성도 중요하므로 Mn을 첨가한 C계 유도경화 베어링강이 적합한 베어링소재가 될 것으로 예측된다.

4. 결 론

회전접촉 피로저항이 높은 저비용 표면경화 베어링강을 개발하기 위해 C계 유도경화 베어링강과 Mn을 첨가한 C계 유도경화 베어링강을 만든 후 회전접촉 피로시험을 실시하여 피로거동에 미치는 Mn 첨가의 영향을 조사하였다. 탄성유체윤활조건에서 회전속도 5,000rpm과 헤르쯔응력 492kg/mm²을 가하면서 피로시험을 하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Mn이 C계 시편에 첨가됨에 따라 유도경화층의 유효경화층 깊이와 잔류 오스테나이트가 약간 증가하였다. 투과전자현미경에 의한 관찰결과 C-Mn강에서 펄라이트의 층상 간격이 더욱 미세하게 나타났다.

(2) 회전접촉 피로시험 중에 잔류 오스테나이트의 분해가 일어났으며 그 분해량은 Mn이 첨가된 경우 더 적었고 이는 Mn 첨가로 인한 잔류 오스테나이트의 기계적 안정성이 증가하는 데 기인한다고 생각된다.

(3) C-Mn강의 피로수명을 와이블 분포의 통계적 해석방법으로 분석한 결과, 주로 잔류 오스테나이트의 변태유기소성과 기계적 안정성이 회전접촉 피로저항을 증가시키는 데 기여하였음이 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 신소재 분야 연구지원 (Ministry of Education Research Fund for Advanced Materials in 1994)에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이영구, 최병영 : 대한금속학회지 31권 4호 (1993) 500
2. C. A. Stickels and A. M. Janotik : Metall. Trans. A, 11A (1980) 467
3. C. A. Straede : Wear, 130 (1989) 113
4. 大谷 南海男 : 金屬表面工學, 日刊工業 (1965) 271
5. H. Chang and T. Y. Hsu : Acta Metall, 34 (1986) 333
6. JIS Handbook, 鐵鋼, 日本規格協會 (1976) 196
7. E. N. Bamberger and J. C. Clark : Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels, ASTM STP 771 (1982) 85
8. J. E. Shigley and C. R. Mischke : Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill (1989) 165
9. 최병영, 오상엽 : 대한금속학회지 25권 9호 (1987) 657
10. Z. Nishiyama : Martensitic Transformation, Academic Press, New York (1978) 304
11. 윤동주, 신정호, 최병영 : 대한금속학회지 32권 3호 (1994) 329