

고탄소 크롬 베어링 강에서의 잔류 오스테나이트 변화에 따른 회전접촉 피로거동

陳 載 寬 · 金 東 健

전북대학교 공과대학 금속공학과

A Behavior of Rolling Contact Fatigue on Retained Austenite in
 High-Carbon Chromium Bearing Steel

Jai Koan Jin and Dong Keon Kim

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

ABSTRACT

In order to study the effect of retained austenite on rolling contact fatigue in high-carbon chromium bearing steel, retained austenite was controlled by only tempering temperature, individually 200, 220 and 240°C. Among various microstructural alteration during rolling contact fatigue test, plate-like carbide most related to the flaking at sub-surface of contact pressure.

The plate-like carbides formed during rolling contact fatigue test decrease with increasing tempering temperature, and fatigue life is much more improved.

The retained austenite was decreased with the tempering temperature, and that decreased plate-like carbide formation. Therefore fatigue life is much more improved with decreasing retained austenite.

1. 서 론

산업발전에 따라 베어링을 사용하는 각종 기계 및 기구들의 사용조건이 가혹하고 내구수명에 대한 신뢰도는 더욱 더 크게 요구되고 있다.

베어링의 내구수명 및 안전도는 베어링의 설치조건, 베어링 형태, 가공 정밀도, 내부 클리어런스, 윤활조건 및 소재특성 등에 따라 크게 다르지만 베어링 소재의

특성은 근본적으로 중요한 인자로써 작용한다. 베어링 소재의 내구수명을 증대시키기 위하여 고품위 청정강의 제조와^{1, 2)} 합금원소 조정^{3, 4)} 및 열처리 조직 변화^{5, 6)} 등에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 또한 베어링의 전동피로 파손의 원인을 규명함으로써 내구 수명을 향상시킬 수 있는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

회전 접촉 피로 시험(rolling contact fatigue test) 중에 발생하는 피로 파손 기구는 크게 두 가지로 분류

되고 있다. 첫째, 전동체와 윤활케도의 표면에 비금속 개재물 및 마멸 부스러기 등에 의해서 응력 집중이 발생되어 표면기점 파괴가 발생하는 것과 둘째, 국부적인 반복하중에 따라 Hertz 응력이 최대가 되는 케도면 직하에서 미세조직의 변화가 이루어져 피로 파손이 이루어지는 내부기점 파괴로 나누어지고 있다.

최대 Hertzian 응력이 작용하는 케도면 직하에 발생하는 조직변화는 Butterfly, Dark Etching Constituent(D. E. C.), White Etching Constituent(W. E. C.), Lenticular carbide(L. C.) 및 판상탄화물(plate-like carbide) 등이 있는데 피로 파손에 가장 직접적으로 영향을 미치는 조직변화는 판상탄화물이다.⁷⁾

고탄소 크롬 베어링 강을 열처리 했을 때 일반적으로 5% 내외의 잔류 오스테나이트가 생성되는데 이때 생성된 잔류 오스테나이트는 피로 거동뿐만 아니라 베어링 치수 안정화에 크게 영향을 미치므로 베어링 품질에 중요한 인자가 된다. 잔류 오스테나이트량은 오스테나이트화 온도와 템퍼링 온도에 따라서 제어할 수 있으나 오스테나이트화 온도 변화는 잔류 오스테나이트 뿐만 아니라 잔류 카바이드 및 마르텐사이트 등의 미세조직이 동시에 크게 변한다.

따라서 본 연구에서는 템퍼링 온도만을 200°C, 220°C 및 240°C로 변화시켜 잔류 오스테나이트량을 미세조정하여 회전 접촉 피로 수명을 비교 분석하고 국부적인 접촉응력에 의한 조직변화를 관찰하여 피로 파괴의 직접적인 원인으로 작용하는 판상탄화물과의 관계를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

본 실험에 사용한 시편은 일본 SANYO special steel co.산 SUJ-2이며, 시편의 화학 조성은 표1과 같다.

베어링의 피로 특성에서 비금속 개재물의 영향이 지대하므로 특히 Ti-(C,N) 및 산화물성 개재물을 극소화시킬 수 있도록 Ti과 O의 함량을 특별관리하였다. 또한 용해법 및 주조방법이 미치는 영향을 고려하여 진공탈가스 처리한 후 ingot 주조를 한 소재를 시험편으로 사용하였다. 피로 시편의 제작 공정 및 실험의

전 과정은 그림 1에 도식적으로 표시한 바와 같으며 구상화 열처리된 봉재를 $\phi 30\text{mm} \times \text{두께 } 8\text{mm}$ 의 원판 상태로 가공하였다.

Tabal 1. Chemical composition of specimen used (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
1.02	0.25	0.31	0.02	0.015
Cr	Ni	Al	Ti	0
1.53	0.2	0.026	0.0010	7ppm

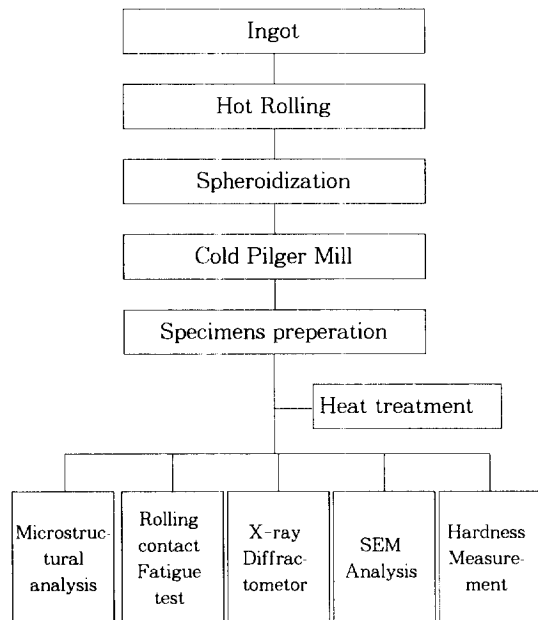


Fig. 1 Schematic diagram of experimental procedure

2.2 열처리

일반적인 볼 베어링의 대량생산 공정에서 쿨칭/템퍼링에 의한 템퍼드 마르텐사이트 조직은 오스테나이트화 온도와 템퍼링 온도의 변화에 따라 잔류 오스테나이트와 잔류 탄화물의 양적 및 질적인 변화가 이루어지며 피로 강도에 크게 영향을 미치고 있다.

오스테나이트화 온도가 감소함에 따라 잔류 오스테나이트는 감소하지만 동시에 잔류 탄화물의 크기 및 분포에 영향을 미치므로 본 실험에서는 잔류 카바이드

의 영향을 극소화시키도록 오스테나이트화 온도를 875°C로 고정시키고 템퍼링 온도만을 200°C, 220°C 및 240°C로 변화시켜 잔류 오스테나이트 변화량에 따른 피로 강도 및 피로 거동을 분석하였다.

2.3 조직관찰

피로 시험 전과 피로 시험 후의 조직을 광학 현미경과 주사전자 현미경을 사용하여 조사하였다. 피로시험 전의 템퍼링 온도에 따른 미세조직을 2% Nital로 에칭하여 마르텐사이트의 길이, 형상 등을 관찰하였고 피로 시험후 그림2와 같이 조직시편을 채취하여 크랙의 생성과 전파 및 피로 거동을 관찰하였다. 이때 잔류 카바이드의 변화는 피크린산 4%로 에칭하였다.

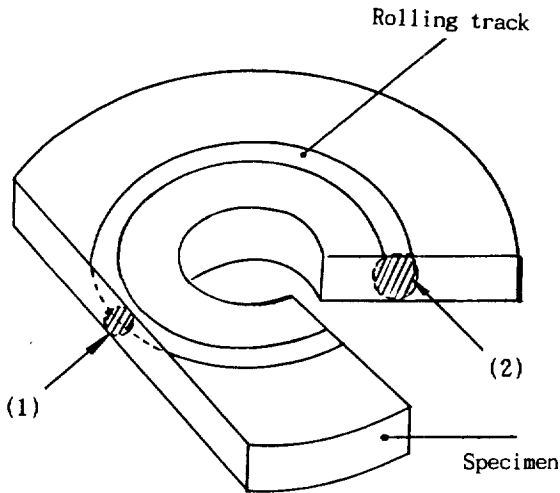


Fig. 2 Position of microscopic specimen section

- (1) Cutting off in about the middle of rolling track tangential to the track and perpendicular to the rolling surface.
- (2) Cutting off perpendicular both to the rolling direction and rolling surface.

2.4 잔류 오스테나이트 측정

잔류 오스테나이트의 체적분율을 측정하기 위하여 X-선 디프레토미터를 사용하였으며, 이때 사용한 X-선은 Co K α 이며, 2 θ 의 범위를 20°~120°로 하여 (200) α , (211) α 와 (220) γ , (311) γ 의 적분 강도를 측정하여 체적분율을 계산하였다.

2.5 회전 접촉 피로 시험

피로 강도는 시편의 형태, 시편의 운동 방법, 표면 거칠기, 윤활유의 종류, 속도, 온도, 하중 및 접촉상태 등에 따라 커다란 영향을 받는다. 피로 수명을 측정하기 위해 사용된 시험기는 thrust type 회전접촉 피로 시험기를 이용하였으며, 시험 조건은 표2와 같다.

Table 2. Testing condition for rolling contact fatigue

Load	1000kgf
Speed of motor	1500rpm
Lubricant	shell tellus oil 37
Roughness of ball(Ra)	0.004 ± 0.002 (μ m)
Roughness of specimen	0.003 ± 0.001 (μ m)
Used bearing	thrust ball bearing 51202

피로 수명의 결정은 시험기 레버에 진동계 센서를 부착하여 구름접촉에 의한 윤활 궤도에서 피팅 또는 균열이 발생할 때 자동으로 정지되며 이 때까지의 회전수를 피로 수명의 값으로 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 비금속 개재물 및 미세조직 관찰

회전 접촉 피로에서 비금속 개재물은 피로 수명에 크게 영향을 미치므로 시험편으로 사용하기 전에 비금속 개재물의 함량을 KS D 0204 방법에 의해서 측정하였다. 본 실험에 사용한 시편은 표3에 표기한 바와 같이 Sulfide 개재물이 약간 함유되었으나 피로 특성에 미치는 노치(notch) 효과는 거의 없는 미세한 정도의 크기이며, 산화물계 개재물은 존재하지 않아 본 연구를 수행하는 데 적합하다고 판단되었다.

시편을 경화 열처리하기 전의 구상화 열처리 상태의 초기조직을 4% picral로 부식한 후 광학 및 주사전자 현미경으로 관찰하여 사진1에 나타냈다. 페라이트 기지조직에 구상탄화물이 약 17% 함유되어 있으며 구상탄화물의 입도 크기는 1.5~2 μ m임을 확인하였다. 베어링 레슨(race)을 선삭가공(turning process)으로 대량 생산하는 공법을 채택하였을 때 구상탄화물의 입도 크기 및 분포는 선삭가공에 크게 영향을 미치고 있

Table 3. Contents of non-metallic inclusions.

inclusion type	A	B	C
standard	max. 0.10%	max. 0.15%	max. 0.20%
results	0%	0.015%	0.005%

* inclusion properties

A type inclusion : Sulfide(MnS, CaS) : streaky

B type inclusion : oxide(Al_2O_3) : Local accumulation of small foreign particles

C type inclusion : globular oxide(MnO, CaO) : globular

다. 구상탄화물의 입도가 불균일하고 조밀한 경우는 가공성의 악화로 생산성 저하를 초래하고⁸⁾ 구상탄화물의 입도가 조대한 경우는 경화열처리시 마르텐사이트 입자를 크게 하여 구름 피로 수명을 낮추는 효과를 가져온다⁹⁾. 일반적으로 볼베어링 제조업체에서 구상탄화물의 크기를 0.5~2.0 μm , 구상탄화물의 양을 15~25%로 관리하고 있다.

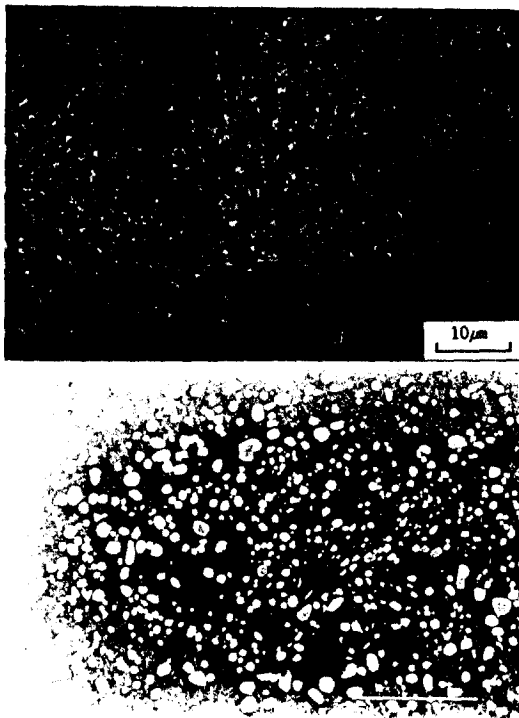


Photo. 1 Microstructure showing spheroidized carbide

사진2는 템퍼링 온도에 따른 조직변화를 나타내고 있다. 템퍼링 온도를 200 $^{\circ}C$, 220 $^{\circ}C$ 및 240 $^{\circ}C$ 로 증가시키면서 침상 마르텐사이트의 크기와 형상이 작아지면서 마르텐사이트 plate가 둔화되는 템퍼드 마르텐사이트를 나타내고 있다.

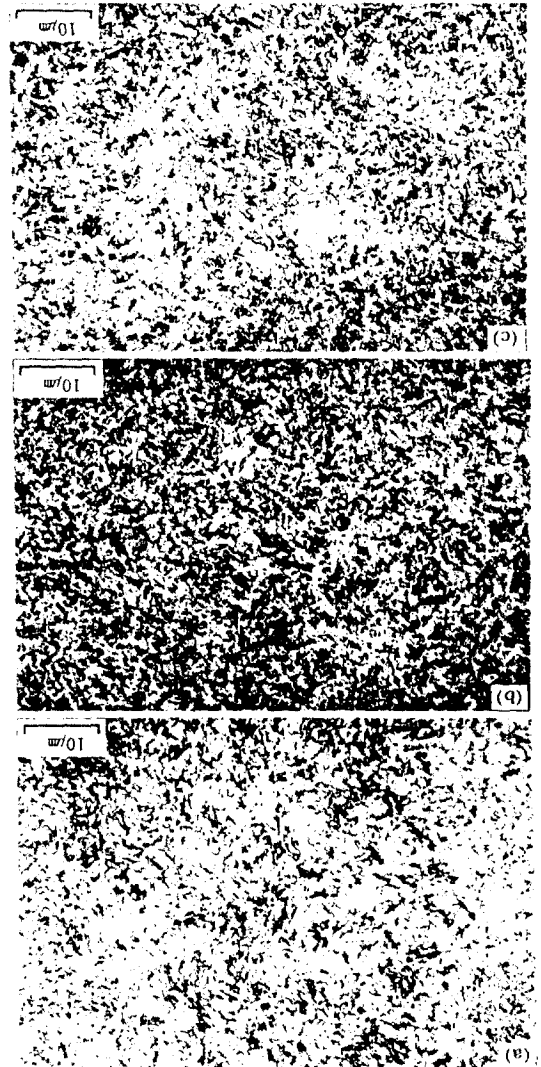


Photo. 2. Microstructure showing quenching and tempering
 (a) tempered at 200 $^{\circ}C$
 (b) tempered at 220 $^{\circ}C$
 (c) tempered at 240 $^{\circ}C$

3. 2 템퍼링 온도에 따른 경도와 잔류 오스테나이트의 변화

대량 생산하고 있는 베어링 공정에서 전경화 열처리를 시행하는 경우 오스테나이트화 온도와 템퍼링 온도의 조합으로 인하여 최고의 피로강도를 갖도록 재료와 열처리를 최적화 시키는 일은 매우 중요한 과제이다.

일반적으로 볼베어링에서의 경도 범위는 58~65HRc로 규정하고 있으며, 오스테나이트화 온도와 템퍼링 온도의 조합에 따라 동일한 경도를 갖게 할 수 있지만 베어링에서의 경도값이 수명에 영향을 미치는 효과는 단정할 수 없고 열처리 조합에 따른 내부조직 변화에 크게 영향을 받는다. Hans-Werner Zoch⁹⁾는 오스테나이트화 온도와 템퍼링 온도에 따른 경도, 잔류 오스테나이트 및 미세 변형 항복 한계(micro strain yield limit)의 추이를 보고하였다. 여기에서 오스테나이트화 온도가 증가할수록 잔류 오스테나이트량과 경도가 증가하고 템퍼링 온도가 증가할수록 경도와 잔류 오스테나이트는 감소하지만 미세 변형 항복 한계는 증가한다고 하였다. 베어링의 치수 안정화를 고려하여 오스테나이트화 온도를 낮게, 템퍼링 온도는 높게 설정하는 경우가 있지만 고강도 베어링 소재에서의 피로 수명은 미세 변형 항복 한계가 중요한 인자가 된다. 위와 같은 영향들을 고려하여 오스테나이트화 온도를 875°C로 하고 템퍼링 온도를 200°C, 220°C 및

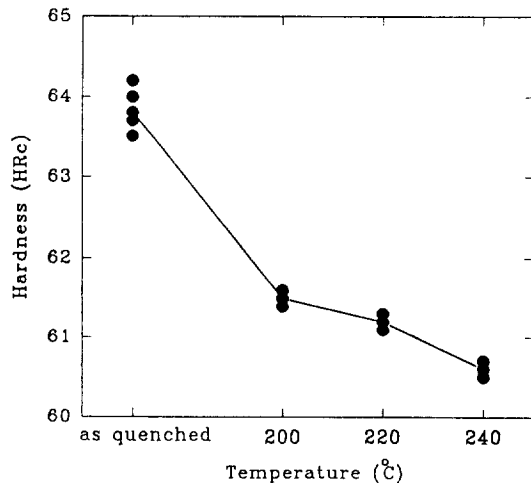


Fig. 3 Hardness as a function of tempering temperature

240°C로 변화시켜 경도 및 잔류 오스테나이트량을 측정하였다.

그림3에서 템퍼링 온도가 증가함에 따라 경도가 감소하고 있지만 60.5~61.5HRc 정도를 유지하고 피로 수명에 미치는 경도의 영향은 단정할 수 없다.

템퍼링 온도에 따른 잔류 오스테나이트를 측정할 결과 그림4에 나타난 바와 같이 쿼칭상태의 잔류 오스테나이트는 18%를 함유하고 있다. 200°C에서 2시간 템퍼링 했을 때의 잔류 오스테나이트량은 13%로 줄어들었고 220°C에서 6%, 240°C에서 2~3%로 나타나 240°C 이상에서는 잔류 오스테나이트가 거의 존재하지 않는 Hans-Werner Zoch의 결과와 거의 일치함을 보여 주고 있다. 그림4는 X-선을 20~120 각도로 조사하여 조직을 분석한 결과인데, 마르텐사이트피크는 72.5°~80.5° (200)과 95°~103.5° (211)면에서 나타났고, 잔류 오스테나이트는 86.5°~92.5° (220)과 106.5°~111.5° (311)면에서 나타났다. 이 결과에서 템퍼링 온도에 따라서 경도와 조직상의 변화는 뚜렷하지 않지만 잔류 오스테나이트는 미세조정이 가능함을 보여 주고 있다.

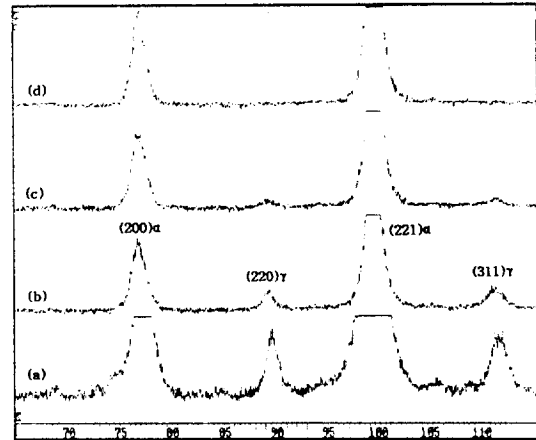


Fig. 4 Measurement of retained austenite by X-ray diffraction method
(a) as quenched (b) 200°C tempering
(c) 220°C tempering (d) 240°C tempering

3. 3 회전접촉 피로 시험편의 조직변화

고탄소 크롬 베어링 강을 피로 시험기에서 시험했을 때 웨도면 직하에 조직변화가 발생되는 것들은

이미 잘 알려져 있으며, 이때 발생된 조직은 일반적으로 butterfly, Dark Etching Constituent(D.E.C), White Etching Constituent(W.E.C), Lenticular Carbide(L.C) 및 판상탄화물들이 있다.

butterfly 조직은 윤활 궤도 표층 직하에 황화물계 개재물(MnS)을 제외한 산화물계 개재물을 중심으로 하여 30~50°의 각도로 양쪽 날개의 형태를 갖는 조직이다. 이 butterfly 조직은 반복응력에 의해서 양쪽 날개가 탄화물계 페라이트의 혼합물로 성장한다¹⁰⁾. 본 시편에서 butterfly 조직은 관찰할 수 없었는데 이것은 작용응력이 높고 산화물계 개재물이 거의 존재하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

사진3은 D.E.C가 표면 직하 0.15~0.25mm 부근에서 관찰된 것을 나타낸 것이다. D.E.C의 생성기구는 명확히 밝혀지지 않았지만 회전접촉응력에 의한 내부 발열로 템퍼링 효과가 발생되어 경도가 저하된다는 설과¹¹⁾ 회전접촉응력에 의해 마르텐사이트가 소성가공되어 가공경화가 이루어진다는 설이 있다¹²⁾. D.E.C는 박리가 발생된 부위나 크랙 주변에서는 관찰할 수 없었고 박리가 발생되지 않은 단면에서 드물게 나타났다. 박리의 표면부에서부터 크랙의 선단부에 이르기까지 판상탄화물이 넓게 형성된 것을 고려할 때 D.E.C는 박리의 원인이 된다고보다는 최대 전단응력이 작용하는 표면하 깊이에서 관찰된 것으로 사료된다. 본 실험에서 D.E.C 부근의 경도는 표면경도 790HV에서 850HV까지 증가하였다.

W.E.C는 회전접촉 피로를 받는 궤도면 직하 최대 전단응력이 작용하는 부위에서 산화물계 개재물이 응



Photo. 3 Dark Etching Constituent

력집중원으로 작용하여 온도가 상승하고 이때 국부적인 용융상태로 된 후 급냉되어 탄소가 과포화 고용된 마르텐사이트라고 한다¹³⁾. 피크랄 등으로 부식시켰을 때 W.E.C는 백색으로 나타나는데, 본 시편에서는 관찰할 수 없었으며 W.E.C 또한 D.E.C와 마찬가지로 박리와는 직접적인 관련이 없다고 생각된다.

L.C는 궤도면에 작용하는 접촉응력에 의해서 W.E.C 등에 과포화 고용된 탄소가 확산하여 마르텐사이트 기지와 W.E.C 경계에 생성한다고 J. Buchwald 등은 보고하였다.¹⁴⁾

회전접촉 피로 시험편에서 박리가 발생된 궤도면 직하의 조직변화 중에서 균열의 생성과 전파에 가장 크게 영향을 미치고 있다고 판단되는 조직은 판상탄화물들이다. 이 판상탄화물은 시편 전체에 분산되어 있는 세멘타이트와 유사하지만 피팅이 발생된 부위와 크랙이 성장한 주변에 크랙을 따라서 또는 독립적으로 생성되어 있다. Tsubota는⁷⁾ 회전접촉면에 수직인 판상탄화물과 평행하게 생성하는 판상탄화물로 크게 분류하였다. 또한 판상탄화물은 궤도면 아래의 산화물계 개재물 직하에서 생성한다고 하였으나 본 실험에서 관찰된 판상탄화물들은 궤도면 표면에서부터 크랙이 전파된 끝부분까지 또한 그 이하에서도 발생되었을 뿐만 아니라 산화물계 개재물이 존재하지 않는 곳에서도 크랙으로 발전되지 않은 판상탄화물들이 생성되어 있음을 확인하였다.

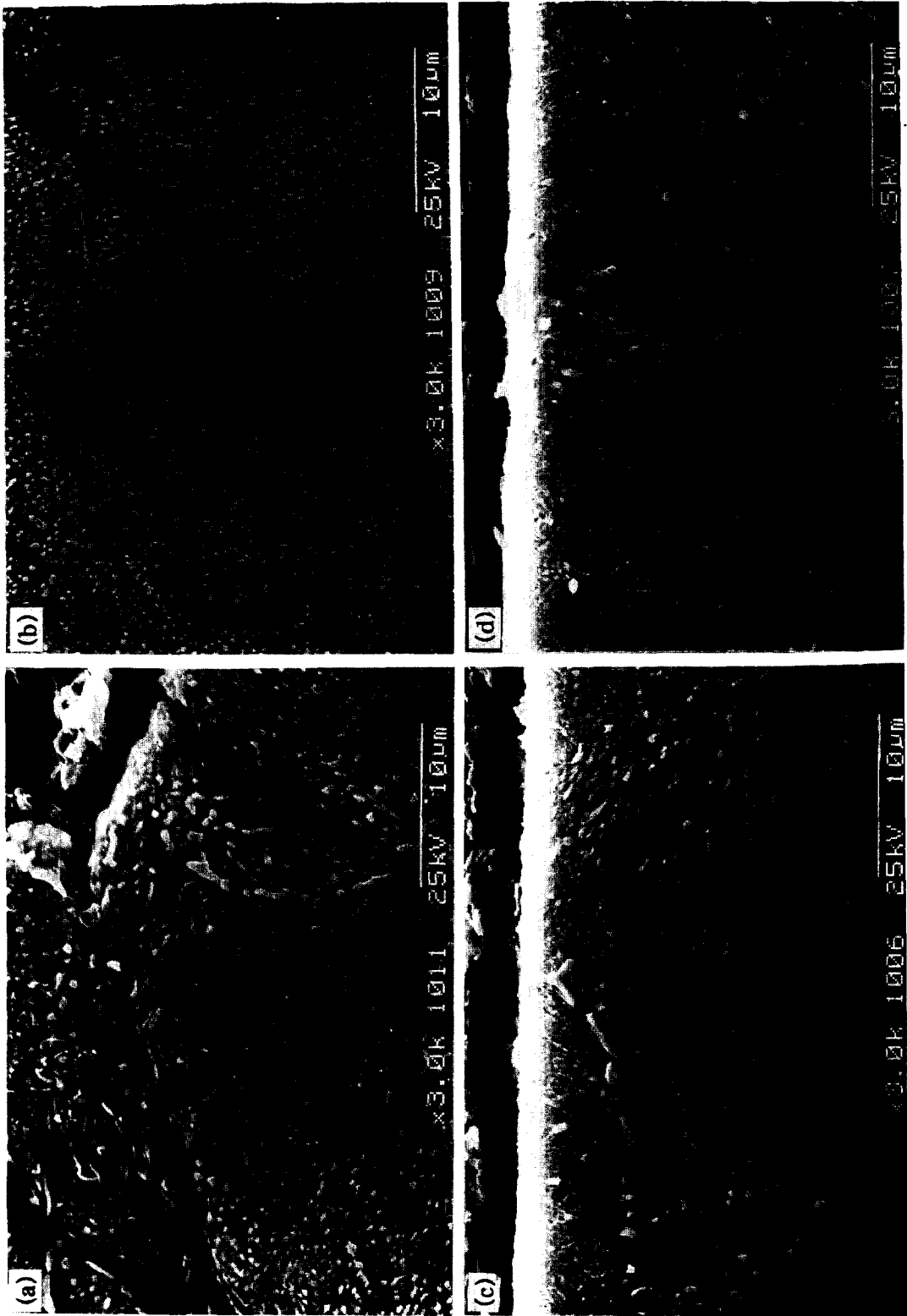
3. 4 박리의 발생과 판상탄화물

박리의 발생과 판상탄화물과의 관계를 관찰하기 위하여 피로 시험편을 그림3의 (2)와 같이 피팅부위에서 회전방향의 접선방향으로 절단하여 피크랄로 부식시켰다.

사진 4는 판상탄화물의 생성형태를 나타낸 것이다.

판상탄화물은 Tsubota가 보고한 것보다는 다양하고 복잡하게 궤도면 아래 전면적으로 발생되었다. 사진4(a)는 박리 표면에 판상탄화물이 형성되어 크랙을 따라 크게 발전되어 있는 것과 크랙으로 진전되지 않은 판상탄화물이 공존하고 있는 것을 나타내고 있다. 사진4(b)는 크랙 끝부분까지 판상탄화물이 생성되어 있음을 보여 주고 있다. 또한 그림4(c)(d)는 궤도면 표

Photo. 3 Various types of plate-like carbides developed during rolling contact fatigue test



면에 45°와 수직으로 판상탄화물이 형성되어 있으나 크랙으로 발전되지는 않았다.

이와 같은 판상탄화물과 크랙의 형성과정을 고려해 볼 때, 반복적인 회전접촉응력에 의해서 궤도면 직하에 탄소의 확산이동이 이루어지며 이때 생성된 판상탄화물은 응력집중원이 된다고 판단된다. 또한 Hertz 응력이 최대가 되는 방향으로 크랙이 진전되며 동시에 판상탄화물의 형성도 최대응력이 작용하는 방향으로 촉진된다고 사료된다.

3.5 잔류 오스테나이트량에 따른 회전접촉 피로 수명

잔류 오스테나이트는 오스테나이트화 온도 및 템퍼링 온도에 따라서 일반적으로 2~20%까지 크게 변화된다. 베어링강은 켈칭, 템퍼링 처리하였을 때 생성되는 잔류 오스테나이트의 양에 따라서 피로 수명에 크게 영향을 받고 있다. 본 실험에서는 템퍼링 온도를 200°C, 220°C 및 240°C로 조정하여 잔류 오스테나이트가 그림4와 같이 13%, 6% 및 2%로 나타났으며, 이때 회전 접촉 피로 시험을 한 결과 표4와 같이 나타났다.

Table 4. Life test results according to retained austenite.

retained austenite(%)	2	6	13
rolling contact fatigue life(rev.)	1,404,383	1,508,750	755,172

회전 접촉 피로 시험 결과 잔류 오스테나이트량이 2%일 때보다 6% 존재할 때 피로한이 약간 상승하였으나 13%일 때는 약 2배 정도 감소한 것을 나타내고 있다. 잔류 오스테나이트는 소성변형시 소성유기 변태(strain induced transforamtion)에 의해서 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하므로 잔류 오스테나이트량에 의해서 피로 강도가 증가한다고 보고되었다^{13, 16)}. 그러나 Zorch⁹⁾에 의하면, 베어링의 피로한은 소재의 미세 변형 항복 한계가 중요한 인자이며, 잔류 오스테나이트가 많으면 미세 변형 항복 한계는 감소한다고 보고하였다.

본 실험에서 크랙의 발생 및 크랙 성장에 판상탄화

물의 역할이 크게 영향을 미치고 있는 것을 감안하여 잔류 오스테나이트 변화에 따른 판상탄화물의 생성을 비교하였다.

사진5에서 잔류 오스테나이트량이 많을 때 표면에 Lenticular Carbide가 많이 형성되어 있으며 크랙 주변과 최대전단응력이 작용하는 표면 아래 0.15~0.25

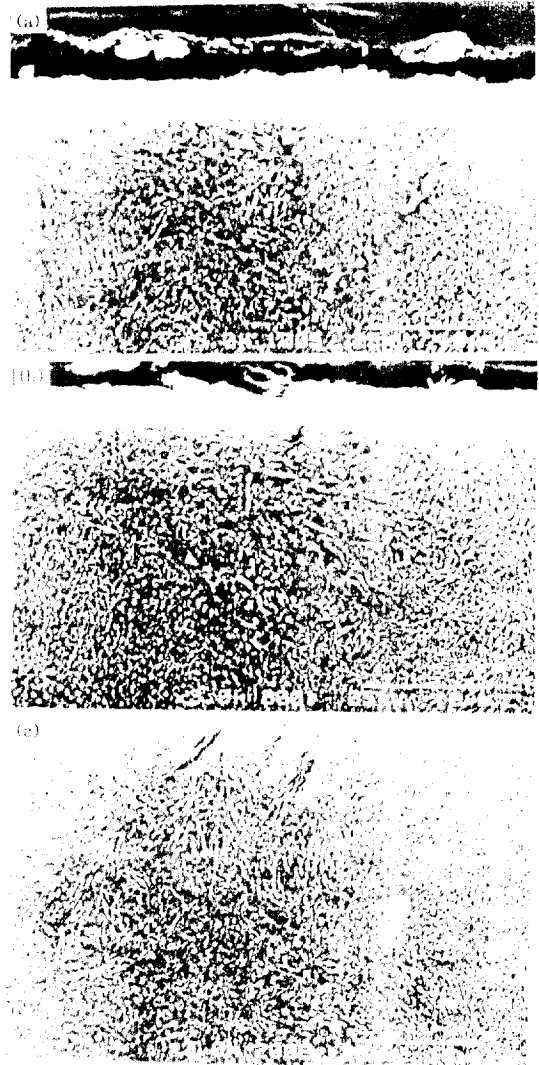


Photo. 5 Plate-like carbide according to retained austenite.

- (a) 2% retained austenite
- (b) 6% retained austenite
- (c) 13% retained austenite

mm 부위에 판상탄화물이 크게 많이 생성되어 있음을 보여 주고 있다. 잔류 오스테나이트가 6% 이하에서는 L.C. 및 판상탄화물의 생성을 및 크기의 차이가 나타나지 않고 있지만 잔류 오스테나이트가 13%일 때는 소성유기 변태에 의한 체적 변화와 거대 판상탄화물의 생성으로 인하여 피로 수명이 크게 감소한다고 판단된다.

4. 결 론

고탄소 크롬 베어링강을 템퍼링 온도에 따라 잔류 오스테나이트량을 변화시켜 회전접촉 피로 시험을 한 후 이때의 조직 변화 및 피로 거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 템퍼링 온도가 증가함에 따라 경도와 잔류 오스테나이트는 감소한다.

2) 회전접촉 응력에 의해서 미세조직은 크게 Butterfly, Dark Etching Constituent(D.E.C.), White Etching Constituent(W.E.C.), Lenticular Carbide(L.C.) 및 판상탄화물들로 미세조직변화가 이루어지는데 박리와 직접적인 영향을 미치는 것은 판상탄화물이다.

3) 잔류 오스테나이트가 6% 미만에서는 그 양이 증가할수록 소성 유기변태에 의하여 피로 강도가 증가했지만 13%일 때는 판상탄화물의 크기와 생성율을 증가시켜 피로 수명이 2배 감소하였다.

參 考 文 獻

1. J. Akesson and T. Lund : SKF steel Tech. Report (1986)
2. S. Enekes : JISI, 2(1972) 83
3. T. Yamamoto and Y. Wakikato : Testo-to-Hagane, 57(1971)1514
4. J. M. Beswick : Metall. trans. A, 18(1987) 1897
5. C. A. Stickels : Metall. Trans. A, Vol. 8A (1977) 63
6. 이영구, 최병영 : 大韓金屬學會誌 Vol.30, No.11, (1992) 1369
7. 坪田 一 : 鐵と鋼 68(1982) 8, p.152
8. 진재관, 김동건 : 전북대학교 공학연구 제23집 (1992) 63
9. Dipl.-Ing. Hans-Werner Zorch : Fa+AG Engineering report(1988) 27
10. P. C. Becker : Met. Tech., (1981) 234
11. 任幸三郎, 岡本 一, 渡邊章三 : 鐵と鋼, 54 (1968) 13, p.1353
12. 黒田昌夫 : 日本機械學會論文集, 26(1968) 169, p.1258
13. H. Schlicht : HTM, 28(1973) 2, p.112
14. J. Buchwald and R. W. Heckel : Trans. ASM, 61(1968) 750
15. 門間改三, 丸田良平等 : 日本金屬學會, 32(1968) 1193
16. 門間改三, 丸田良平等 : 日本金屬學會, 32(1968) 1198