

고주파 유도경화처리한 중탄소강의 회전접촉 피로거동에 미치는 탄소함량의 영향

최병영 · 이동민

전북대학교 공과대학 금속공학과 및 신소재개발연구소

Influence of Carbon Content on Rolling Contact Fatigue of High Frequency Induction-Hardened Medium Carbon Steels

Byung Young Choi and Dong Min Lee

Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756

(1997년 5월 6일 받음, 1997년 7월 21일 최종수정본 받음.)

초 록 본 연구에서는 고주파 유도경화처리한 중탄소강의 회전접촉 피로거동을 0.44wt.%C 강과 0.55wt.%C 강을 사용하여 조사하였다. 회전접촉 피로시험은 Polymet RCF-1 시험기에서 탄성유체 윤활 조건으로 회전속도 8,000 rpm, 최대 Hertz 응력 492kg/mm²을 가하면서 실시하였다. 미세한 lath 마르텐사이트가 고주파 유도경화한 0.44wt.%C 강과 0.55wt.%C 강의 표면경화층에 형성되었고 소량의 페라이트가 일부 형성되었으며 0.44wt.%C 강이 0.55wt.%C 강에 비해 비교적 큰 페라이트가 나타났다. 회전접촉 피로시험 후 표면경도가 거의 유지되는 표면경화층에서 회전접촉 피로시험전에 비해 경도가 상승하였다. 이 경도증가량의 최대치(ΔHv_{max})와 피로수명과 관계를 조사한 결과 0.55wt.%C 강이 0.44wt.%C 강에 비해 회전접촉 피로중에 일어나는 소성변형에 대한 높은 저항성에 주로 기인하여 ΔHv_{max} 값은 낮게 나타나고 피로수명은 높게 나타났다.

Abstract It has been investigated on rolling contact fatigue of high frequency induction-hardened medium carbon steels using 0.44wt.%C and 0.55wt.%C steels in this study. Rolling contact fatigue tests were performed in Polymet RCF-1 tester under elasto-hydrodynamic lubricating conditions at a shaft speed of 8,000 rpm and applied maximum Hertzian contact stress of 492kg/mm².

Fine lath martensite was formed in the surface hardened layer of high frequency induction-hardened 0.44wt.%C and 0.55wt.%C steels. It was also observed in the layer that small quantity of ferrite was formed and its size was larger in the 0.44wt.%C than 0.55wt.%C steels. Microhardness of the surface hardened layer with nearly constant surface hardness in the rolling contact fatigued steels was increased in comparison with that of induction-hardened steels. Relationship between the maximum amount of microhardness increase(ΔHv_{max}) and fatigue life indicated that the value of ΔHv_{max} was lower and fatigue life was longer in the 0.55wt.%C than 0.44wt.%C steels, resulting from mainly higher resistance to plastic deformation during rolling contact fatigue.

1. 서 론

베어링은 상대적으로 움직이는 기계요소 사이에서 진동체가 내륜 및 외륜의 궤도면을 따라 회전하면서 반복적인 접촉응력 즉 Hertz응력이 궤도면 영역에 가해져 국부적인 소성변형 및 회전접촉 피로균열을 생성시켜 pitting 또는 flaking을 일으키게 된다. 따라서 내구성있는 베어링을 만들기 위해서는 회전접촉 피로저항이 높은 베어링 소재를 사용하는 것이 중요하다. 최근 자동차 배기가스로 인한 대기오염이 문제점으로 대두됨에 따라 자동차의 경량화가 추진되고 있어 자동차의 베어링은 소형화 및 유니트화가 진행되고 있으며 저비용 소재로 베어링을 제조하여 원가절감을 위한 노력이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 요구에 부응하여 합금소스를 첨가하지 않은 탄소강을 자동차의 베어링에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

탄소강을 베어링 소재로 활용하려면 탄소강의 경화능이 낮기 때문에 through hardening 보다 표면경화하여 회전

접촉 피로저항을 높이는 것이 필요한 과제이다. 표면경화방법중 유도경화가 표면만 급속히 짧은 시간 가열 후 급냉하므로 변형이 적고 소요시간과 비용이 적게 들기때문에 베어링용 탄소강의 제조에 적합하다고 판단된다.

또한, 베어링강이 회전접촉 피로시험중에 반복적으로 가해지는 Hertz 응력으로 인해 국부적인 소성변형이 일어남에 따라 경도 및 미세조직의 변화가 나타날 것으로 예측되며 이는 내구성있는 베어링을 만드는데 필요한 주인자에 해당하는 회전접촉 피로수명에 중요한 영향을 미칠 것이다. 고탄소 크롬 베어링강을 through hardening한 후 회전접촉 피로시험했을 때 판상탄화물이 생성되고¹⁾ 마모시험했을 때에는 국부적으로 비정질 구조를 가진 마모생성물이 나타난다고²⁾ 보고하였다. 그러나 아직 유도경화한 중탄소강을 회전접촉 피로시험했을 때 나타난 미세조직 및 경도변화를 조사한 연구보고가 거의 없는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 0.44wt.%C, 0.55wt.%C 함량의 탄소강을 제작하여 유도경화 후 quenching crack발생 여부를 조사

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

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
steel A	0.55	0.25	0.76	0.015	0.017	bal.
steel B	0.44	0.26	0.72	0.014	0.014	bal

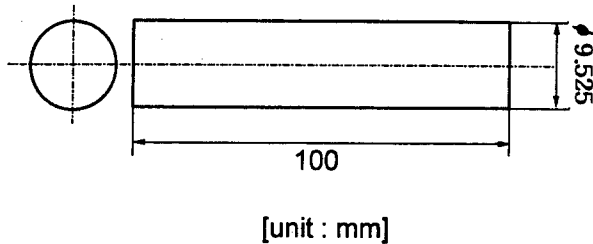


Fig. 1. Dimension of specimen for rolling contact fatigue test.

하고 회전접촉 피로시험한 다음 회전접촉 피로수명을 탄소 함량 별로 비교하였다. 아울러 회전접촉 피로시험했을 때 나타난 미세조직 및 경도변화를 조사하고 그 결과를 회전접촉 피로수명과 연관지어 검토하였다. 또한, 최종 flaking을 일으키는 피로균열과 그때 나타나는 파단면을 관찰 및 고찰 하여 아직 구체적으로 밝혀지지 않고 있는 유도경화한 중탄소강의 회전접촉 피로거동을 규명하고자 하며 유도경화에 적합하고 회전접촉 피로저항이 높은 적정 탄소함량을 가진 자동차용 베어링 소재를 만들고자 시도하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 유도경화에 적합하도록 시편의 탄소함량을 중탄소강으로 함급설계하고 전기로에서 용해한 후 진공 탈가스처리하여 열간압연한 다음 기계가공과 정밀연삭가공에 의해 그림 1에 도시한 바와같이 직경 9.525mm, 길이 100mm의 회전접촉 피로시험편을 제작하였다.

표 1은 시편의 화학성분을 분석한 결과이다.

유도경화처리는 유도코일을 시편의 외부에서 이동식으로 가열할 수 있도록 설계하여 제작한 후 출력 50kw, 주파수 200kHz의 고주파 유도경화 장치에서 유도코일로 시편을 가열한 다음 수용성냉매에 급냉하는 progressive hardening 방법으로 유도경화한 후 시편의 균열 및 변형여부를 조사한 다음 템퍼링하였다. 이 시편을 정밀연마한 후 피로시험전 표면조도를 측정한 결과 0.22~0.25 μ m, Ra로 나타났다.

회전접촉 피로시험은 그림2에 주요부위를 도식적으로 나타낸 Polymet RCF-1시험기에서 윤활유 Shell Tellus Oil 37을 실온에서 분당 20방울을 시편과 디스크의 접촉면에 공급하면서 회전속도 8,000rpm, 최대 Hertz 응력 492kg/mm²을 가하면서 탄성유체 윤활조건하에서 시편별로 각각 10회씩 실시하였다. 시험중에 시편에 박리가 발생하면 디스크와 시편사이에 발생한 진동이 진동감지장치에 전달되어 시험기의 작동이 정지된다. 이때 회전계에 나타난 수치를 그 시편의 피로수명으로 기록하였다.

유도경화한 시편의 표면경화층의 경도분포를 표면에서

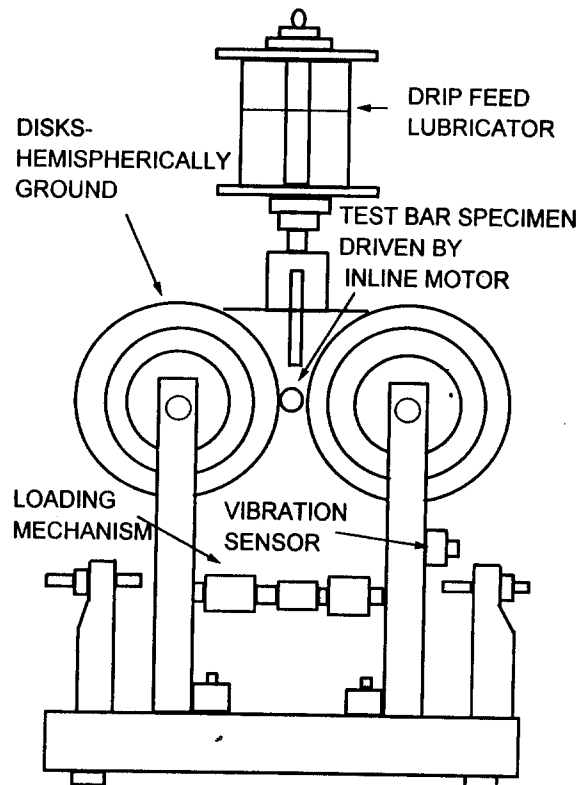


Fig. 2. Schematic diagram of front view of Polymet RCF-1 tester.

부터 수직방향으로 100 μ m 깊이 마다 마이크로 비커스 경도 계로 하중 300g을 가하면서 연속적으로 측정하였으며 각 시편의 유효경화층 깊이를 경도분포곡선으로 부터 구하였다. 회전접촉 피로시험 후 채도면 직하의 경도분포도 같은 방법으로 측정하여 피로시험 전 후의 경도변화의 차이(Δ Hv)를 조사하였으며 각각의 시편에서 경도 변화의 차이가 가장 큰 값(Δ Hv_{max})을 조사한 후 회전접촉 피로수명과 연관지어 분석하였다.

각 시편을 유도경화한 후 표면영역에 형성된 표면경화층의 미세조직과 회전접촉 피로시험 후 표면경화층에 나타난 균열의 생성 및 전파거동을 광학현미경과 주사 및 투과 전자현미경으로 관찰하였다. 또한 flaking이 발생한 영역의 파단면을 아세톤 용액에서 약 15분 동안 초음파 세척한 다음 주사 전자현미경으로 관찰하였다.

3. 실험 결과

표면경화층의 미세조직과 경도분포

사진 1은 0.44wt.%C 와 0.55wt.%C 시편의 표면경화

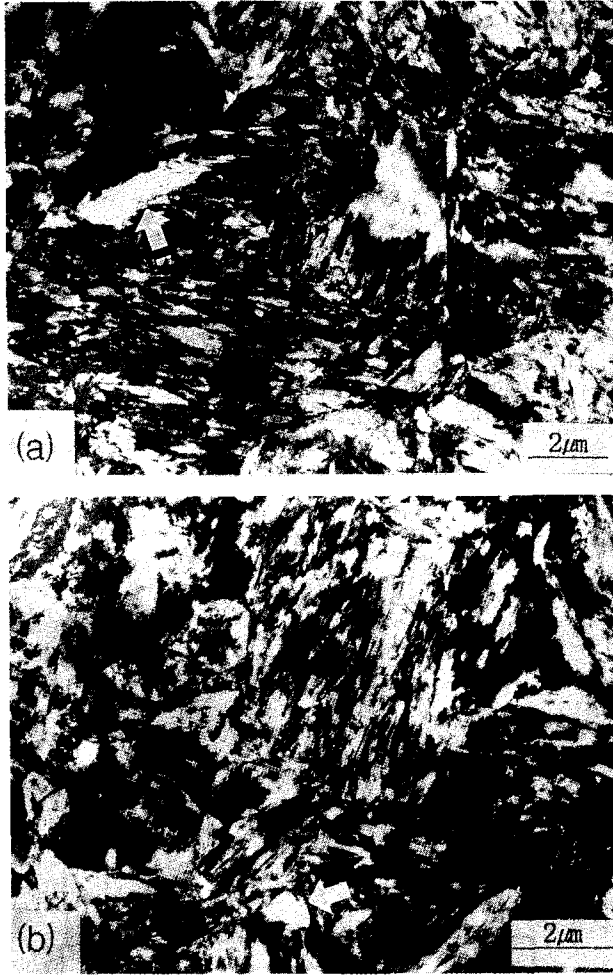


Photo. 1. TEM micrographs showing fine lath martensite formed in the induction-hardened layer of (a) 0.44wt.%C (b) 0.55wt.%C specimens. (arrows indicating ferrite)

층을 투과 전자현미경으로 관찰한 결과이며 매우 미세한 lath 마르텐사이트가 형성되어 분포하였고 이때 0.44wt.% C 시편의 경우가 0.55wt.%C 시편에 비해 비교적 큰 페라이트가 잔류하여 나타났다. 그림3은 0.44wt.%C 시편을 유도경화한 후 형성된 표면경화층의 경도분포를 나타낸 것이며 표면경도는 약 700 Hv로 표면에서부터 수직방향으로 1.6mm 깊이까지는 거의 같은 경도치를 보이고 유효경화층 깊이는 2.7mm로 나타났다. 그림4는 0.55wt.%C 시편의 표면경화층의 경도분포를 보여주고 있으며 표면경도가 약 750 Hv로 표면에서부터 수직방향으로 1.3mm 깊이까지 거의 같은 경도치를 보이고 유효경화층 깊이는 2.2mm였다.

회전접촉 피로에 의한 표면경화층의 경도변화와 피로수명

회전접촉 피로시험 전 후 0.44wt.%C와 0.55wt.%C 시편의 표면경화층의 경도변화를 각각 조사한 결과 회전접촉 피로시험 후 표면에서부터 수직방향으로 깊이 700~900 µm까지 회전접촉 피로시험 전에 비해 경도가 상승하였으며 경도증가량의 최대치(ΔHv_{max})를 각 시편별로 측정하였다. 경도상승현역에서 회전접촉 피로시험 중 반복적으로 작용

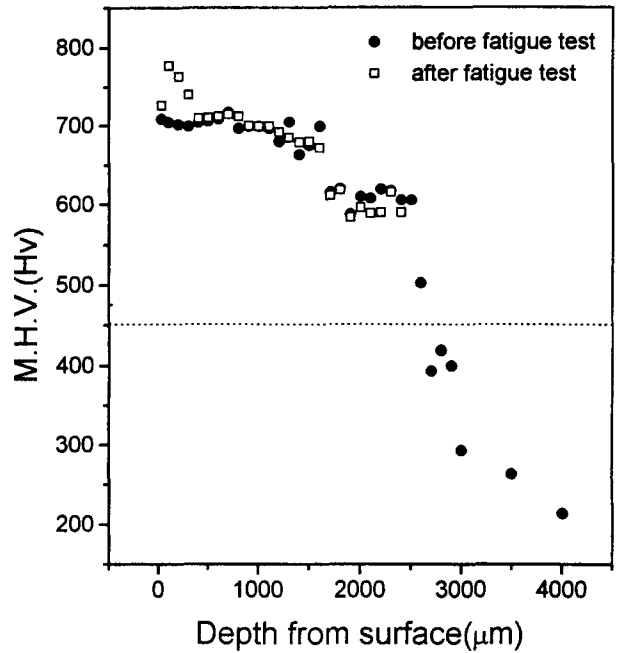


Fig. 3. Microhardness variation as a function of depth from surface in the induction-hardened and rolling contact fatigued 0.44wt.%C specimen with effective depth of 2.7mm and surface hardness of 700 Hv, respectively.

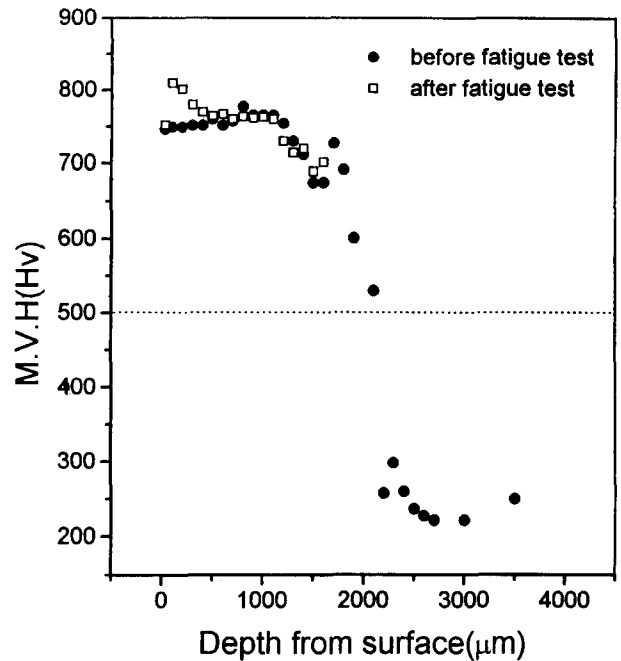


Fig. 4. Microhardness variation as a function of depth from surface in the induction-hardened and rolling contact fatigued 0.55wt.%C specimen with effective depth of 2.2mm and surface hardness of 750 Hv, respectively.

하는 최대전단응력으로³⁾ 인한 변형경화가⁴⁾ 0.44wt.%C와 0.55wt.%C 시편의 표면경도가 각각 700Hv 및 750Hv로 유지되는 표면경화층내에서 일어나는 것을 알 수 있다. 그림 5는 이러한 경도증가량의 최대치와 피로수명과의 관계를 나타낸 결과이다. 대체로 0.44wt.%C 시편에서 회전접촉 피로시험 후 경도증가량의 최대치가 높게 나타나고 피로

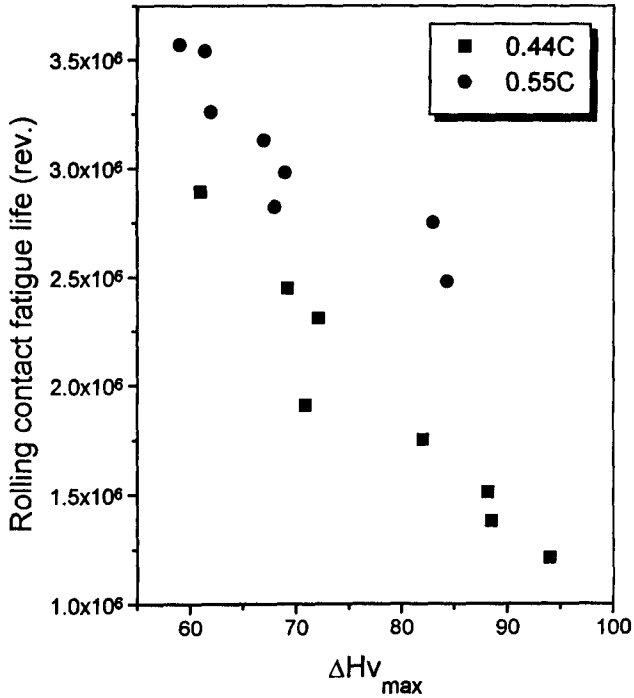


Fig. 5. Relationship between rolling contact fatigue lives and maximum microhardness increase of 0.44wt.%C and 0.55wt.%C specimens.

수명이 낮은 반면, 0.55wt.%C 시편에서는 회전접촉 피로 시험 후 경도증가량의 최대치가 낮게 나타나고 피로수명은 높게 나타났다.

피로균열의 생성 및 전파

사진2는 0.44wt.%C 시편을 유도경화한 후 회전접촉 피로 시험했을 때 궤도면 직하 영역에서 겹게 나타난 변형밴드



Photo. 2. Optical micrograph showing deformation bands and subsurface crack initiation in rolling contact fatigued 0.44wt.%C specimen.

가 특정한 방향으로 배열되어 분포하고 변형밴드를 가로질러 생성된 피로균열을 보여주고 있다. 사진3은 변형밴드에서 생성된 균열이 표면쪽으로 전파하여 flaking에 이르는 과정을 보여주고 있다.

유도경화한 후 회전접촉 피로 시험한 0.55wt.%C 시편의 균열 생성 및 전파 과정을 관찰한 결과 사진4와 같이 나타

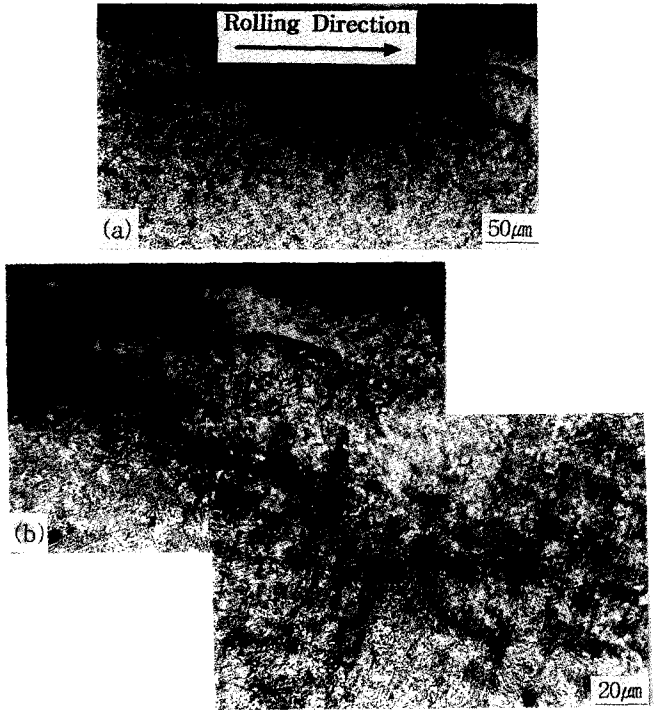


Photo. 3. Optical micrographs showing deformation bands and subsurface crack to flaking in rolling contact fatigued 0.44wt.%C specimen, (b) is higher magnification micrograph of (a)

났다. 사진 4(a)에서 보는 바와 같이 다른 부위에 비해 비교적 겹게 부식되어 있는 dark etching 영역에서 균열이 생성되어 표면쪽으로 성장하여 flaking이 일어나는 것이 관찰되었다. 이 영역을 확대 관찰한 결과 사진(b)에 나타난 바와 같이 0.44wt.%C 시편에서 회전접촉 피로 시험 후 나타난 변형밴드는 형성되지 않았다. 그러나 퇴화된 마르텐사이트를¹⁾ flaking을 일으키는 균열 주위에서 볼 수 있다.

Flaking이 발생한 영역의 파단면 관찰

회전접촉 피로 시험 후 균열이 생성 및 전파하여 flaking이 발생한 영역의 파단면을 관찰한 결과 사진 5와 같이 나타났다. 0.44wt.%C 시편을 회전접촉 피로 시험 후 flaking이 일어난 영역의 파면을 관찰한 결과 사진 5(a)에 나타난 바와 같이 주로 연성과괴가⁵⁾ 일어난 것을 알 수 있었다. 반면, 0.55wt.%C 시편에서는 사진 5(b)와 같이 cleavage 형태의 취성과괴가⁶⁾ 일어났다.

4. 고찰

고주파 유도경화처리한 0.44wt.%C 와 0.55wt.%C 시편의 표면경화층에 형성된 미세조직을 관찰한 결과 사진1에 나타난 바와 같이 매우 미세한 lath 마르텐사이트가 형성되었고 일부 페라이트가 잔류하였으며 0.44wt.%C 시편에서 비교적 큰 페라이트가 나타났다. 이는 고주파 유도경화시 급속히 짧은 시간 가열중에 미세한 오스테나이트가 형성되고⁷⁾ 냉각중에 이 오스테나이트가 대부분 마르텐사이트로 변태되며 일부 proeutectoid ferrite가 형성된다. 이때 proeutectoid ferrite량이 평형상태에서 lever rule에 의해

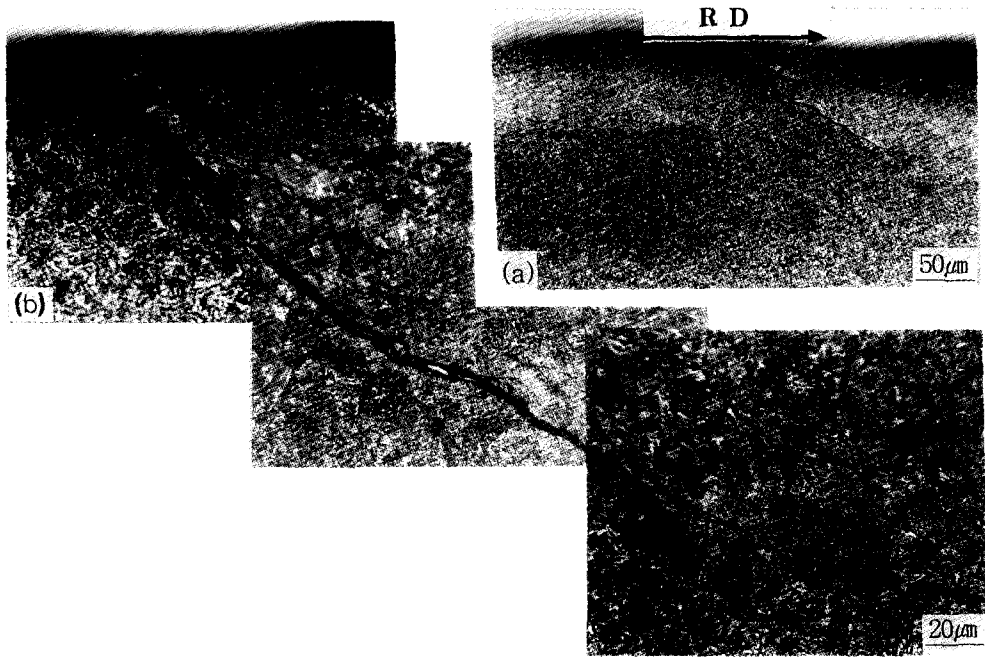


Photo. 4. Optical micrographs showing dark etching region and subsurface crack to flaking in rolling contact fatigued 0.55wt.%C specimen, (b) is higher magnification micrograph of (a)

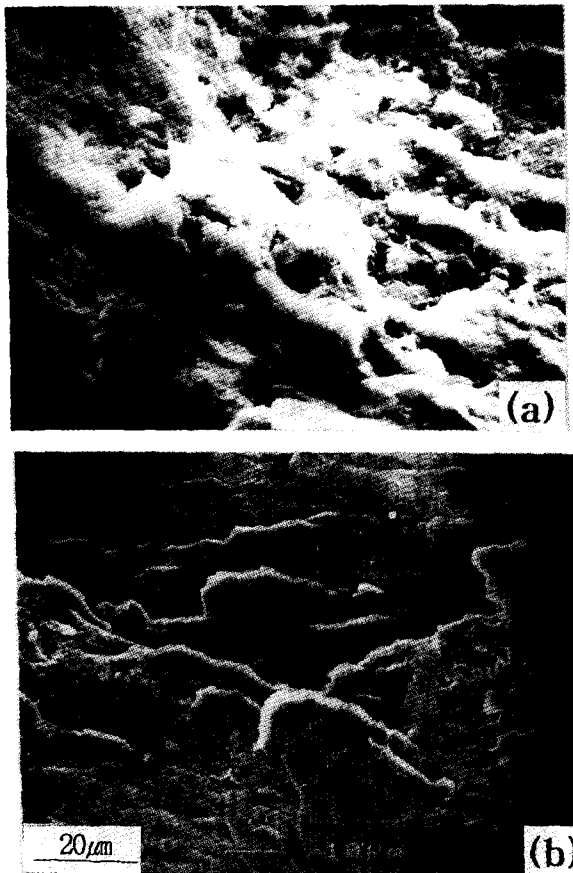


Photo. 5. SEM micrographs showing fractography of flaking regions in rolling contact fatigued (a) 0.44wt.%C and (b) 0.55wt.%C specimens.

0.44wt.%C 시편이 0.55wt.%C 시편보다 더 많이 생성되어⁸⁾ 사진 1(a)와 같이 비교적 큰 페라이트가 0.44wt.%C

시편에서 나타나게 된다.

한편, 유도경화 후 표면경화층의 경도분포곡선을 나타낸 그림 3과 그림 4에서 표면경도가 0.44wt.%C 시편에 비해 0.55wt.%C 시편이 50Hv 만큼 높게 나타난 것은 탄소함량이 증가함에 따라 고주파 유도경화중에 침입형 틈자리에 과포화 고용된 탄소량이 증가하여 마르텐사이트의 C축의 길이가 증가하고 마르텐사이트의 tetragonality 증가에 따른 고용강화 효과가 증가하는데^{9,10)} 주원인이 있다고 생각된다.

회전접촉 피로시험 후 0.44wt.%C와 0.55wt.%C 시편의 표면에서부터 수직방향으로 깊이에 따른 경도분포를 유도경화한 시편의 경도분포와 비교하여 그 차이를 구한 결과 표면경도가 유지되는 표면경화층내에서 경도가 상승하여 나타났다. 이는 0.44wt.%C와 0.55wt.%C 시편의 유효경화층 깊이는 회전접촉 피로거동에 영향을 미치지 않고 주로 유도경화 후 형성된 표면경도분포와 미세조직의 차이에 의해 피로거동이 다르게 나타날 것임을 말해주고 있다.

유도경화한 시편의 표면경도가 유지되는 표면경화층내에서 회전접촉 피로에 의한 경도증가량의 최대치인 $\Delta H_{v_{max}}$ 와 피로수명의 관계를 조사한 결과 그림 5와 같이 0.44wt.%C 시편에서 회전접촉 피로시험 후 $\Delta H_{v_{max}}$ 가 0.55wt.%C 시편에 비해 대부분 높게 나타나고 반면에 피로수명은 0.55wt.%C 시편에서 대부분 높게 나타났다. 또한 사진 2와 사진 3에 나타난 바와 같이 0.44wt.%C 시편에서 회전접촉 피로시험 후 변형밴드가 생성되고 이 변형밴드를 가로질러 피로균열이 생성되고 전파하여 flaking에 이른 데 반해 0.55wt.%C 시편에서는 변형밴드는 생성되지 않고 dark etching 영역에서 균열이 생성되어 표면쪽으로 전파하여 flaking이 일어났다.

먼저 0.44wt.%C 시편에서 회전접촉 피로에 의해 변형밴

드가 생성되는 원인을 유도경화 후 형성된 미세조직으로부터 알아보면 다음과 같다. 즉, 0.44wt.%C 시편의 유도경화 후 형성된 비교적 큰 페라이트에서 회전접촉 피로시험 중 반복적으로 작용하는 최대전단응력으로 인해 심한 소성변형이 일어나 전위가 증가되고 주위의 마르텐사이트에 과포화 고용된 탄소가 고확산능 행로에 따라¹¹⁾ 응력유기확산(stress-induced diffusion)이 일어나며 결과적으로 주전단방향으로¹²⁾ 변형밴드가 생성되어 사진 2 및 사진 3과 같이 나타나게 된다. 이때 전위의 증가로 인한 변형경화에 기인하여 그림 5와 같이 회전접촉 피로시험 후 경도가 상승하며 $\Delta H_{v_{max}}$ 값이 0.44wt.%C 시편에서 0.55wt.%C 시편에 비해 높게 나타난 것은 사진 5에서도 볼 수 있듯이 소성변형을 수반하는 연성과괴가 일어나는 0.44wt.%C 시편에서 심한 소성변형에 의한 변형경화정도가 0.55wt.%C 시편에 비해 높기 때문이라고 생각된다.

한편, 0.55wt.%C 시편에서 회전접촉 피로에 의해 생성된 사진 4의 dark etching 영역과 피로균열 주위의 퇴화된 마르텐사이트 조직을 0.44wt.%C 시편의 경우와 비교하면 0.55wt.%C 시편의 유도경화 후 형성된 마르텐사이트가 회전접촉 피로시험시 소성변형에 대한 저항성이 0.44wt.%C 시편에 비해 높고 결과적으로 변형경화가 낮게 나타난다고 판단된다. 이는 사진 5의 cleavage 형태의 취성과괴를 보이는 0.55wt.%C 시편의 파면관찰에 의해서도 입증된다.

사진 2와 사진 3에서 보는 바와 같이 0.44wt.%C 시편을 회전접촉 피로시험했을 때 심한 소성변형에 의해 형성된 변형밴드는 피로균열의 생성위치가 되고 변형밴드를 통해 균열이 전파하여 flaking을 일으키므로 변형밴드가 생성되지 않은 0.55wt.%C 시편에 비해 피로수명이 낮게 나타나며 0.55wt.%C 시편의 경우에는 회전접촉 피로시험시 일어나는 소성변형에 대한 높은 저항성으로 말미암아 피로수명이 높게 나타난다고 판단된다.

5. 결 론

자동차의 경량화에 적합한 저비용 자동차용 소형 베어링 소재를 개발하기 위해 유도경화한 0.44wt.%C 강과 0.55wt.%C 강을 만든 후 회전접촉 피로시험을 회전속도 8,000 rpm 과 최대 Hertz 응력 492kg/mm²을 가하면서 탄성 유체 윤활조건으로 실시하였다. 이때 나타난 회전접촉 피로거동을 탄소함량에 따라 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 0.44wt.%C 강과 0.55wt.%C 강을 유도경화한 후 표면경화층에 형성된 미세조직은 대부분 미세한 lath 마르

텐사이트로 나타났으며 일부 페라이트가 형성되었고 0.44wt.%C 강이 0.55wt.%C 강에 비해 비교적 큰 페라이트가 잔류하여 나타났다.

2) 유도경화한 시편의 표면경도가 거의 유지되는 표면경화층에서 회전접촉 피로시험 후 경도가 상승하였다. 회전접촉 피로에 의한 경도증가량의 최대치인 $\Delta H_{v_{max}}$ 와 피로수명과의 관계를 조사한 결과 0.44wt.%C 강에서는 대부분 $\Delta H_{v_{max}}$ 가 높게 나타나고 피로수명이 낮은 반면, 0.55wt.%C 강에서는 $\Delta H_{v_{max}}$ 가 낮게 나타나고 피로수명이 높게 나타났다.

3) 0.44wt.%C 강을 회전접촉 피로시험했을 때 심한 소성변형으로 인해 변형밴드가 생성되었고 이 곳에서 균열의 생성 및 성장이 일어난 반면, 0.55wt.%C 시편에서는 소성변형에 대한 높은 저항성으로 인해 dark etching 영역에서 균열이 생성되어 표면쪽으로 전파하여 높은 피로수명을 보여주었다.

참 고 문 헌

1. 이영구, 최병영 : 대한금속학회지, **30**, 1369 (1992)
2. Y. Wang, C.Q.Gao, T.C.Lei and H.X.Lu : Scr. Metall., **22**, 1251 (1988)
3. J.A.Williams : Engineering Tribology, Oxford University Press, 111 (1994)
4. 윤동주, 윤기봉, 최병영 : 대한금속학회지 **32**, 1531 (1994)
5. Bradley Dodd, Yilong Bai : Ductile Fracture and Ductility, Academic Press 63, (1987)
6. R.A.Koterazawa, R.Ebara and S.Nishida : Fractography, Elsevier Applied Science, 221 (1990)
7. R.A. Grange : Metall. Trans. **2**, 65 (1971)
8. G.Krauss : Principles of Heat Treatment of Steels, A.S.M, 35 (1980)
9. C.S.Barrett and T.B.Massalski : Structure of Metals, Pergamon Press, 3rd ed. 515 (1980)
10. R.W.K. Honeycombe : Steels, Microstructure and Properties, Edward Arnold, 99 (1981)
11. D.A.Porter and K.E.Easterling : Phase Transformations in Metals and Alloys, Van Nostrand Reinhold 102 (1981)
12. V.Bhargava, G.T.Hahn and C.A.Rubin : Wear, **133**, 65 (1989)