

BEARING소재 경도에 따른 구름접촉피로의 X선적 해석

이 한 영[†]

계명대학교 재료공학과

Analysis of Rolling Contact Fatigue of Ball Bearing with Various Hardness by X-ray Diffraction

Han-Young Lee[†]

Dept. of materials Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

Abstract – In view of the effects of the hardness of material on fatigue, rolling contact fatigue process in hard metals seems to differ from it in soft metals. This paper has been aimed to compare the rolling contact fatigue process according to the hardness of materials. Rolling contact fatigue tests using the ball bearings assembled with the inner race of four different hardness have been carried out. In addition, residual stress and half-value breadth on/below the inner raceway during individual rolling contact fatigue have been measured by X-ray diffraction. The results of this study showed that the change of residual stress and half-value breadth during the rolling contact fatigue on race way in hard metals is the same as in soft metals. However, plastic deformation by rolling contact in hard metals is in microscopic scale but only for soft metals in macroscopic scale.

Key words – bearing, hardness, x-ray diffraction, rolling contact fatigue.

1. 서 론

자동차를 필두로 대부분의 기계나 장치 등에는 여러 가지 형식의 구름베어링이 다수 사용되어 지고 있다. 따라서 이들 베어링의 역할을 생각하면 베어링의 정도 및 성능이 바로 기계나 장치의 성능과 직결된다 해도 과언은 아닐 것이다. 이러한 측면에서 근년에는 기계 및 장치의 세계적인 개발추세가 경량화 및 소형화 그리고 사용조건 등의 확대에 따른 maintenance free의 측면에 있어 이에 따른 베어링의 재료개발 및 성능향상이 커다란 과제로 되어 있다[1].

베어링의 성능평가는 소음 및 진동 외에 일반적으로 반복된 구름접촉에 의한 표면손상 발생까지의 시간(회전접촉수)을 척도로 사용하고 있다. 이러한 표면손상 발생은 동일한 구름접촉을 하는 압연 roll이나 치차, 차륜과 레일, traction drive 등에서도 관찰되어 지는 일반적

인 현상으로 소위 구름접촉 피로현상이라 알려져 있다. 그러나 지금까지 각종 구름접촉부재의 성능향상을 위해 이러한 구름접촉 피로현상과 관련된 연구가 다수 행해져 왔음에도 불구하고 그 원인 및 발생기구 등에 대해서는 아직까지 논란이 되고 있는 상황이다. 이러한 원인으로서는 많은 연구가 실제 상황과 상이한 조건에서 행해지고 있기 때문으로 추정된다.

일례로 구름접촉 피로수명에 미치는 주요 영향인자 중 하나인 재료경도의 경우를 들 수 있다. 재료경도가 구름접촉 피로수명에 미치는 영향은 주지된 사실로 실제 베어링의 경우 구성재료의 경도를 HRC 60이상으로 하고 있다. 그러나 구름접촉 피로와 관련된 많은 연구결과[2-6]에서는 영향인자 조절 및 시험시간 단축을 목적으로 시험시 저경도강을 사용하고 있는 경우가 많은 것으로 밝혀졌다. 그러나 일반적으로 저경도강과 고경도강에서는 피로파괴에 대한 재료의 거동이 상이할 뿐만 아니라 개재물, 표면거칠기, 잔류응력 등의 영향이 상이하므로 재료경도에 따라 구름접촉 피로에 의한 손

[†]주저자 · 책임저자 : lhy@kmu.ac.kr

상축적 과정보도 상이할 것이 분명하다. 그럼에도 불구하고 아직까지 재료의 경도에 따른 구름접촉 피로과정의 차이에 대해서는 거의 논의된 바 없는 것으로 확인되었다.

따라서 본 연구에서는 4종류의 재료경도를 갖는 볼 베어링 내륜을 제작하여 각각의 구름접촉 피로과정을 X선회절기술로 추적하므로써 재료의 경도에 따른 구름접촉 피로과정 및 성상변화를 비교하였다.

2. 실험방법

2-1. 시편

본 연구에서는 일반적으로 베어링강이라 알려진 시판의 고탄소크롬강 STB2(C:0.98, Cr:1.38)를 사용하여 베어링형변 #6206(ISO규격)의 내륜(내경: 30 mm, 궤도경: 37.175 mm, 궤도곡률: 4.81 mm)을 제작하였다. 시편인 내륜제작은 일반적인 베어링 제작공정을 거친 후 quenching(830°C×40분 유지후 유냉)하고 tempering을 하였다. 시편의 경도변화는 quenching후 tempering 시의 온도를 4종류(180°C, 250°C, 350°C, 440°C, 각 온도에서 2시간 처리)로 변화시키므로써 경도를 각각 H_RC 62.8(이하 HT1), 59.9(이하 HT2), 55.2(이하 HT3), 49.1(이하 HT4)로 하였다. 그 뒤 동일한 마무리가공을 행한 후 형변에 상응하는 시판되는 동일재료의 외륜(H_RC 62.3) 및 볼(H_RC 63.1)을 사용해 베어링완제품을 제작하였다. 이때 이들 베어링의 볼의 위치고정을 위해 합성수지로 된 retainer를 사용하여 수시로 베어링의 분해 및 조립이 가능하도록 하였다.

2-2. 구름접촉시험 및 X선회절시험

Fig. 1에 본 연구에 사용된 시험기의 개략도를 나타내고 있다. 본 시험기는 4개의 베어링을 동시에 조립해 중앙의 2개를 스프링의 힘(스프링정수: 7.85 mm/ton)으로 들어 올려 부하하는 방식의 외륜고정 내륜회전형식이다. 그리고 수명판정은 부하축상에 진동감지 센서에 의해 표면손상발생에 따른 진동가속도의 변화로 시험기가 멈추는 Sudden Death형태로 하였다. 이때 1회시험에 2종류의 시편을 동시에 2개씩 교대로 장착하고 #68 turbine oil을 순환시키면서 유회상태하에서 시험하였다.

시험하중은 해당 베어링형변의 기본동정격하중(19.4 × 10³ N)의 60%(P_{max}=3167MPa, 이하 0.6C시험) 및 30%(P_{max}=2514 MPa, 이하 0.3C 시험)의 두 수준에

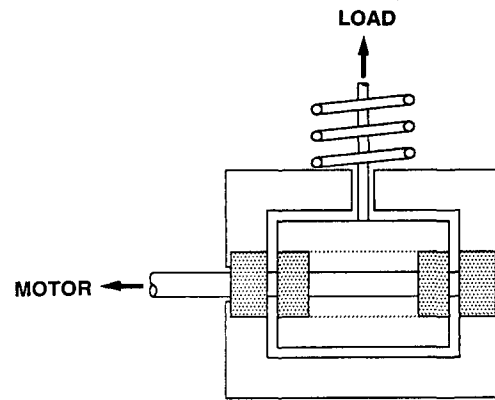


Fig. 1. Schematic diagram of rolling contact fatigue tester for bearing.

Table 1. Conditions of rolling contact fatigue test

| | |
|--------------------------------|---|
| Rotation speed | 2,000 r.p.m |
| Load | 11.6 × 10 ³ N(60% of BDLR*) 5.8 × 10 ³ N(30% of BDLR*) |
| Rating life (L ₁₀) | 0.6C test: 38.6 hr 0.3C test: 308.6 hr |
| Lubricant oil | Turbine oil #68 |

*BDLR (Calculating Basic Dynamic Load Rating): 19.4 × 10³ N

서 각 하중에 대한 계산수명시간(각각 38.6 hr, 308.6 hr)까지 시험하였다. 그러나 0.6C 시험중 경도가 낮은 HT3, HT4의 경우는 조기박리현상(각각 31.8 hr, 4.2 hr)이 발생하여 이 시점에서 이들은 시험을 중단하였다. Table 1에 본 시험조건을 요약하였다.

X선회절시험은 범용 X선회절장치(Shimazu XD-D1)를 이용해 소정의 회전시간마다 시험을 중단하고 아세톤세척을 한 후 내륜의 내륜 궤도면에 대해 행하였으며 계산수명시간 도달후는 궤도면을 순차 전해 연마하면서 깊이 방향으로 측정하였다. Table 2에 X선회절조건을 나타내었다.

회절선의 해석에서 peak산출은 반가폭중심법을 채용하였으며 잔류응력 계산은 sin²ψ법을 사용하였다[7]. 이때 구름접촉면에서 일반적으로 관찰되는 응력의 ψ-Split현상[8]을 고려하여 +ψ방향(구름방향: φ=0°)과 -ψ방향(반구름방향: φ=180°)에서 각각 측정하여 이들의 평균값을 사용하였다. 또한 반가폭의 경우는 φ=0° 시의 값을 사용하였다.

Table 2. Conditions of X-ray diffraction

| | |
|-------------------------------------|---|
| Tube of X-ray | CrK α |
| Diffraction plane | α Fe(211) |
| Current and voltage in tube | 10 mA, 30 kV |
| Irradiation area | 2 \times 4 mm ² |
| Filter | V |
| Angle of ϕ^* and ϕ_o^{**} | $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ $\phi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ |

*angle between the incident angle of X-ray and the rolling direction

**angle between the incident angle of X-ray and the specimen normal

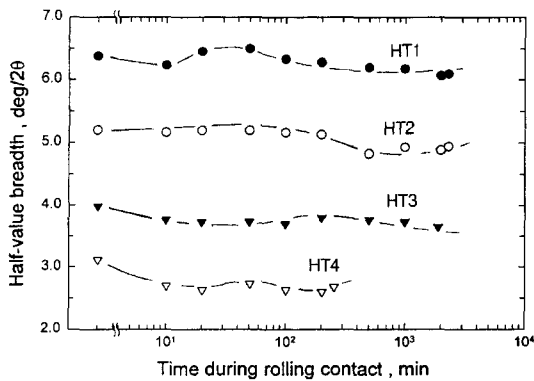


Fig. 2. Variation of half-value breadth on raceway with time during rolling contact (0.6C test).

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 회전시간에 따른 궤도면의 성상변화

Fig. 2는 각 경도시편에 대해 0.6C 시험시 소정의 회전시간마다 행한 X선회절시험에서 산출된 내륜 궤도면의 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

시험전의 반가폭은 경도가 높을수록 큰 값을 보여 일반적으로 알려진 반가폭과 경도와의 상관관계[9]와 일치한다는 것을 알 수 있다. 이것은 고경도재일수록 격자결함이 많고 strain이 크다는 사실을 시사하는 결과[9]로 생각된다. 또한 구름접촉 시험후 이들의 반가폭은 회전시간에 대해 절대값은 다소 변화하고 있으나 대부분 큰 변화가 없이 경도와 반가폭과의 상관을 그대로 유지하고 변화하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 각 경도시편에 대해 0.6C 시험시 궤도면의 회전시간에 따른 잔류응력변화를 나타낸 것이다.

시험전의 잔류응력은 가공에 의해 전부 압축의 잔류

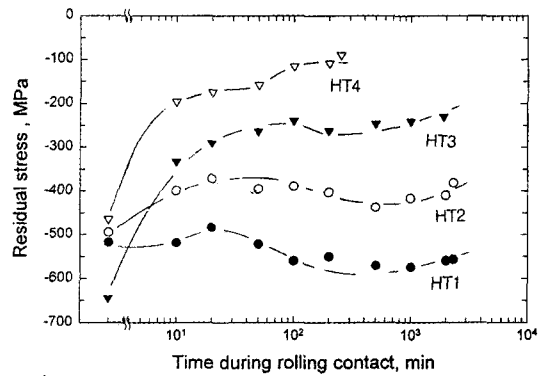


Fig. 3. Variation of residual stress on raceway with time during rolling contact (0.6C test).

응력을 보이고 있으나 절대값은 경도와 상관관계가 성립하지 않음을 알 수 있다. 그러나 저경도재의 경우는 시험과 동시에 현저히 감소하여 소정의 회전시간 후는 저경도재일 수록 낮은 압축잔류응력을 나타내고 있다. 이러한 측면에서 구름접촉시험 후는 잔류응력도 반가폭과 마찬가지로 재료경도와 상관관계가 성립함을 알 수 있다.

이러한 결과는 존재층이 적고 불안정한 잔류응력이 생성되는 질삭 및 연삭가공이 아닌 구름접촉시험후 처럼 순수한 소성변형에 의해 생성되는 안정된 잔류응력이 분포할 경우에 잔류응력에 의해 경도추정이 가능하다는 사실을 나타내 주는 것으로 생각된다.

아울러 Fig. 2, 3에서 보듯이 회전시간에 따른 궤도면의 반가폭 및 잔류응력의 변화는 각기 극대극소의 변화를 보이며 진행하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 그간 저탄소강의 annealing한 저경도소재의 구름접촉피로시험에서 밝혀진 회전수에 따른 잔류응력 및 반가폭의 변화양상[2-5]과 동일하다. 따라서 소재경도와 관계없이 회전시간에 따른 잔류응력 및 반가폭의 변화가 동일한 것으로 미루어 이들의 구름접촉피로과정은 동일한 것으로 추정된다.

3-2. 궤도면하 깊이 방향의 성상변화

3-2-1. 잔류응력의 분포

Fig. 4는 0.3C 및 0.6C 시험 후 내륜의 볼 궤도면 하부의 깊이방향으로 측정된 잔류응력의 분포를 나타내고 있다.

시험후 표면의 잔류응력은 전술한대로 시험하중에 관계없이 저경도재일 수록 그리고 동일경도에서는 고

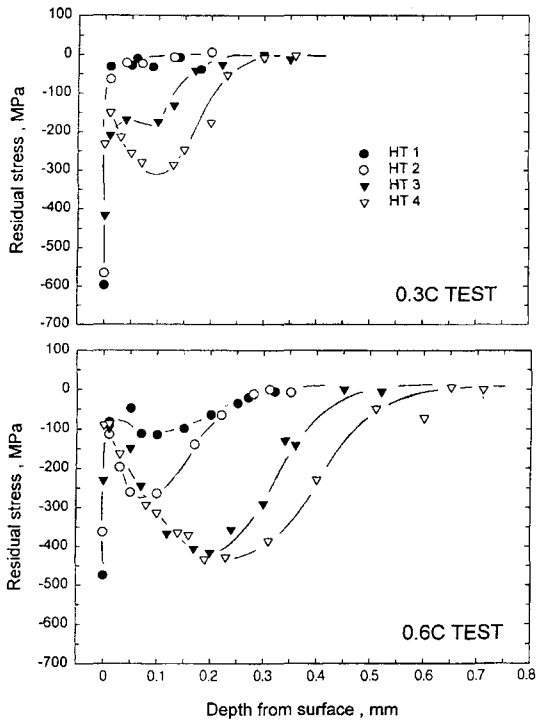


Fig. 4. Distribution of residual stress below raceway after test.

하중일수록 적은 압축의 잔류응력값을 나타내고 있다.

궤도면 하부의 응력분포에서는 HRC 60이상의 고경도재(HT1, HT2)의 0.3C 시험후에는 거의 최표면 부근만 잔류응력이 존재하고 있으나 그 외 대부분은 표면 직하에서 압축잔류응력의 극대값을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 그 극대값의 위치 및 크기도 경도에 따라 상이하어 전반적으로 경도가 적을수록 극대값의 위치는 깊어지고 크기도 현저히 커지고 있다. 이러한 경향은 시험하중 및 재료경도에 따라 발생하는 각각의 소성변형량에 대응하는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 HT4의 시험후 궤도면의 원주방향의 단면 현미경 조직사진을 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 0.6C 시험 후는 넓은 범위에서 소성유동이 관찰되나 0.3C시험 후에는 최대전단응력이 작용하는 깊이 부근이지만 결정립의 형태가 다소 변화한 것으로 미루어 이들은 모두 거시적인 소성변형이 발생하였음을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 6과 같이 0.6C 시험 후의 HT1 및 HT3의 단면을 관찰한 현미경 조직사진에서는 고하중임에도 불구하고 표면과 내부의 조직차를 관찰할 수 없다.

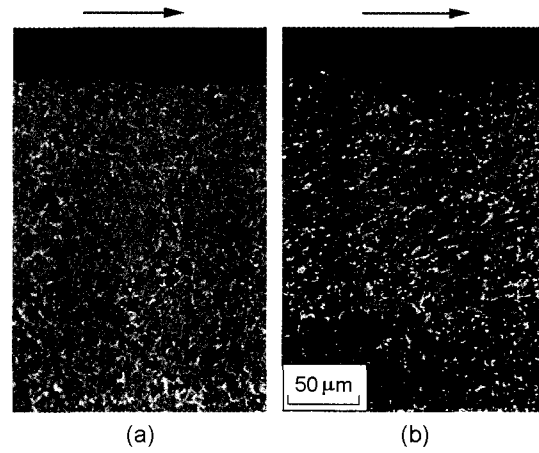


Fig. 5. Micrographs of parallel section of raceway to rolling direction after test for HT4(×200) (a) 0.3C TEST (b) 0.6C TEST.

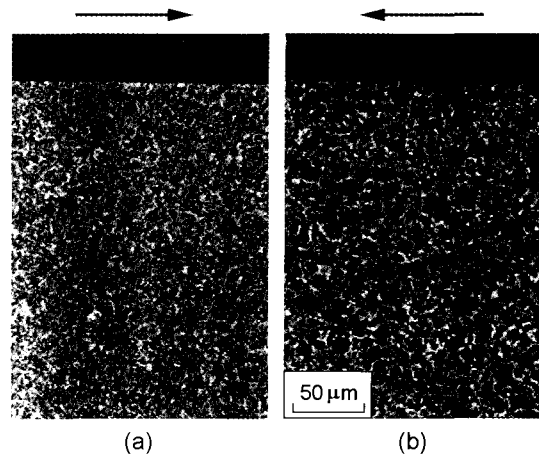


Fig. 6. Micrographs of parallel section of raceway to rolling direction after test under 0.6C test(× 200) (a) HT1 (b) HT3.

Fig. 7에 이들의 궤도면하부 깊이방향으로 측정된 경도분포를 나타내고 있다. 그림에서도 확인할 수 있듯이 시험하중 및 재료경도에 따라 정도는 상이하나 모두 표면하부에서 경도의 극대치를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 경도상승은 결국 궤도면하 최대전단응력이 작용하는 부위에 소성변형이 집중되고 이로 인해 가공경화되었음을 시사하는 결과로 생각된다. 이러한 측면에서 Fig. 6과 같이 조직변화가 전혀 관찰되지 않은 고경도재의 경우에도 경도상승이 관찰되는 것으로 미루어 이들도 가공경화가 발생하였음을 추측할 수 있다.

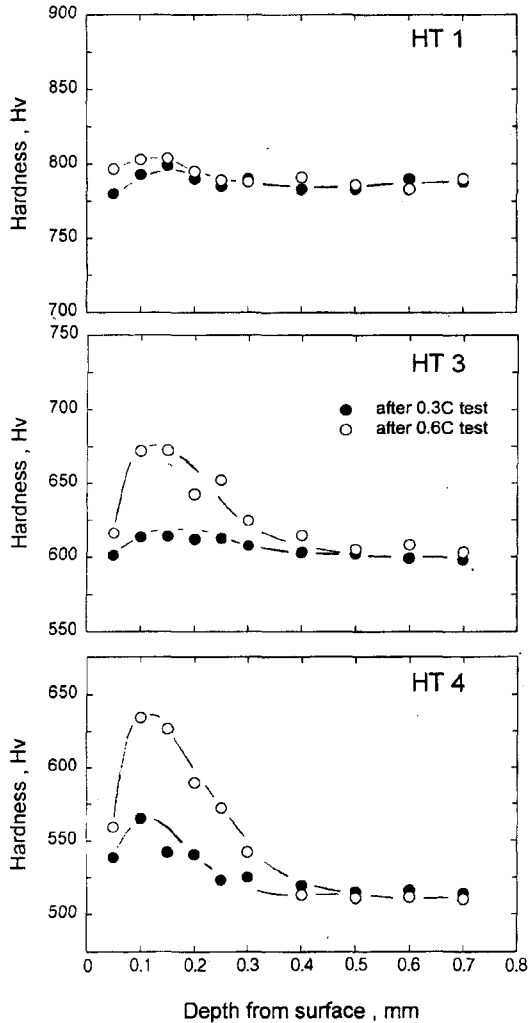


Fig. 7. Distribution of hardness below raceway after test.

따라서 고경도재의 소성변형은 저경도재의 현저한 거시적인 소성변형과 달리 현미경 조직상으로 관찰할 수 없는 미시적인 소성변형이 발생하였음을 예측할 수 있다. 이러한 미시적인 소성변형의 형태는 불명확하나 결정립내의 현상으로 생각되어 진다. 이러한 측면에서 실제 구름 베어링을 비롯한 고경도재를 사용하는 구름 접촉부재의 구름접촉피로와 관련된 제현상은 결정학적으로 다루어야 할 것으로 생각된다.

또한 Fig. 7에서 시험하중에 따른 경도상승치는 전술한대로 소성변형정도에 의존하는 것으로 생각되나 경도의 극대위치는 저경도 시험일수록 표면으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 전술한 경도

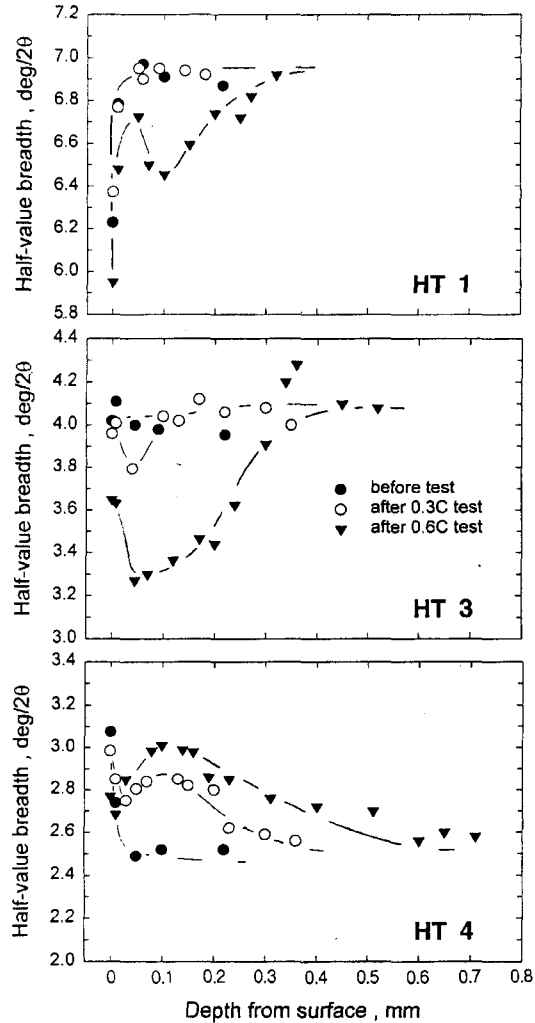


Fig. 8. Distribution of half-value breadth below raceway before/after test.

에 따른 잔류응력의 극대위치의 변화(Fig. 4)와는 상반된 결과이나 이것은 결국 경도에 따른 소성변형량 정도차에 기인하는 것으로 추정된다.

3-2-2. 반가폭의 분포

일반적으로 X선회절선에서 얻어지는 반가폭은 재료의 미시적인 거동을 반영하는 인자인 것으로 알려져 있다[10].

Fig. 8은 각 시험의 시험전과 시험후의 궤도면하 깊이방향의 반가폭의 분포를 나타내고 있다.

그림에서 보듯이 재료의 경도에 따라 시험전후의 분포는 두 가지 형태가 있음을 알 수 있다. 즉 구름접촉에 의해 발생하는 전단응력으로 소성변형이 일어난 부

위의 반가폭의 값이 모재(내부)보다 커지는 경우(HT4)와 감소하는 경우(HT1, HT3)가 있다. 특히 전술한 대로 거시적인 소성변형이 발생하였던 HT4의 경우만이 증대하고 있음을 알 수 있다. 이러한 형태는 지금까지 저경도강의 구름접촉후에 관찰되는 일반적인 형태와 동일하다. 이와 같이 구름접촉후 재료의 경도에 따라 깊이방향의 반가폭 분포형태가 상이한 원인은 불명확하나 전술한대로 소성변형의 형태 차에 기인하는 것으로 추측되어 진다.

일반적인 완전 quenching 및 tempering한 고경도의 베어링강의 경우의 조직은 탄화물(약 7%) 및 잔류 austenite(약 10%)와 martensite의 3상으로 구성되어 있다. 이때 martensite중의 고용탄소함유량은 0.6%전후이므로 lath형 및 plate형의 혼합조직이다. 이들 조직-특히 lath형태의 내부에는 다량의 twin 및 dislocation이 존재하는 것이 알려져 있다. 따라서 반복되는 구름접촉에 의해 파생되는 전단력에도 dislocation의 이동이 어려워 거시적인 소성변형이 못 일어날 것이다. 그러나 일반적으로 사용후의 베어링의 궤도면에는 구름방향과 평행하게 결정면과 결정방향이 (100), [110]의 집합조직이 형성된다는 사실[11]을 고려하면, 반복되는 구름접촉에 따라 결정격자의 회전이 일어날 것이 예상된다. 결국 이것이 고경도 소재의 미시적인 소성변형의 형태로 생각되어 진다. 이때 결정격자가 회전하면서 새로운 dislocation이 입계부근에 생성되고(Ashby's model[12]) 이들이 입내로 이동하면서 기존의 dislocation과 반응이 일어나 합체되어 소멸하는 등의 현상을 수반할 것이 예상된다. 결국 이로 인해 반가폭이 감소하는 것으로 추측되어 진다.

한편 일반적으로 martensite조직을 400°C이상의 온도에서 tempering하면 martensite내부의 dislocation cell의 벽이 소멸하면서 결정이 성장하여 저경도인 미세한 침상의 조직인 troostite를 형성하게 된다. (HT4) 이 경우는 입내에 dislocation의 밀도가 적어 dislocation의 이동이 용이하므로 거시적인 소성변형을 동반할 것이 예상된다. 결국 저경도재의 경우는 입내에 새로이 dislocation을 생성하면서 변형하고 cell조직 형성도 용이하므로 반가폭이 증가하는 것으로 생각되어 진다.

이와 같이 경도차이로 인해 구름접촉시간에 따라 반가폭의 감소 및 증가현상은 구름 접촉피로과정의 초기에 일어나는 dislocation반응의 양상차이이므로 결국 이들은 미소균열발생이나 전파에만 영향을 미칠 것이 분명하다. 그러나 반가폭 및 잔류응력의 변화가 경도에 상

관없이 극대극소를 나타내며 변화하는 것으로 미루어 이후의 구름접촉피로과정은 동일한 것으로 생각된다.

이러한 측면에서 구름접촉피로와 관련된 체현상해석 시에는 재료경도에 따라 소성변형의 형태를 구분하여야 할 필요가 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

재료의 경도에 따른 베어링의 구름 접촉피로과정의 차이를 비교하기 위하여 4종류의 경도수준의 베어링 내륜을 제작하고 각각 구름접촉피로과정을 X선회절기술을 이용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 재료경도와 관계없이 회전접촉시간에 따른 궤도면의 반가폭 및 잔류응력변화는 극대극소 현상이 관찰되어 동일한 구름접촉 피로과정을 따르는 것으로 추정되었다. 그러나 그들의 절대값은 재료의 경도에 각각 대응하였다.

2) 구름접촉에 의한 소성변형의 형태는 재료경도에 따라 상이한 것으로 밝혀졌다. 저경도 재의 경우는 반가폭 및 경도가 상승하는 거시적인 소성변형을 보이나 고경도재의 경우는 경도는 상승하나 반가폭이 감소하는 미시적인 소성변형으로 구름접촉 피로가 진행되는 것으로 밝혀졌다. 이러한 의미에서 베어링과 같은 고경도소재의 구름접촉 피로와 관련된 체 현상은 결정학적으로 해석하여야 할 것으로 추정되었다.

참고문헌

1. 日本ベアリング工業會, “ベアリング先端技術動向に關する面談調査報告書,” 1982.
2. 李 漢瑛, 坂本伸之, 川本 信, 岡林邦夫, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第2報),” *トライボロジスト* 34, 1, pp. 51~57, 1989.
3. 李 漢瑛, 川本 信, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第3報),” *トライボロジスト* 34, 10, pp. 772~778, 1989.
4. 李 漢瑛, 川本 信, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第4報),” *トライボロジスト* 34, 11, pp. 815~822, 1989.
5. 三由 久, “轉がり滑り接觸によるピッチングの研究,” *潤滑*, 20, 12, pp. 843~851, 1975.
6. 藤田公明, 吉田 彰, 山本敏夫: “S45C燒なましロ-ラのころがり疲れに關する研究,” *潤滑* 21, 4, pp. 256~263, 1976.
7. 日本材料學會, “X線應力測定法標準,” 日本, 1982.
8. 室 博, “轉がり接觸による殘留應力,” *潤滑*, 23, 11, pp. 828~831, 1978.

9. 小峰克郎, 中西英介, 森 宗義, “焼入焼もどされた鋼材料の半價幅とかたさの對應について,” 材料, 26, 1, pp. 24~30, 1977.
10. 日本材料學會, “X線材料強度學,” 養賢堂, 日本, pp. 301, 1973.
11. A.P. Voskamp, “Material response to Rolling contact loading,” J. of Tribology (Trans. ASME) 107, pp. 359~366, 1985.
12. G.E. Dieter, “Mechanical Metallurgy,” McGraw-Hill, pp. 187, 1986.