

X선회절에 의한 SHOTPEENING처리 구름베어링의 구름접촉피로해석

Analysis of rolling contact fatigue of shotpeened ball bearing by X-ray diffraction

이한영*, 이동엽**

*계명대학교 재료공학과 **계명대학교 재료공학과 대학원

ABSTRACT The shotpeening treatment were conducted for improving the strength of rolling contact fatigue of machine element like a gear. This paper was undertaken to analyze the influence of shotpeening treatment for inner race of ball bearing on the rolling contact fatigue. Shotpeening treatment were applied to the full hardened and the carbonitrided bearing. And the rolling contact fatigue life test and X-ray diffraction test were carried out. The results of this study showed that the fatigue life of ball bearing in the clean and the contaminated oil could be improved by shotpeening treatment. This effect was found to be more pronounced to the full hardened bearing.

1. 서론

일반적으로 치차 등에 행해 지고 있는 shotpeening처리는 재료의 고강도화를 꾀할 수 있는 가공 기술로 현재 내마모성 및 내피로성이 요구되어 지는 부품의 수명 향상을 위해 적용되고 있는 기술[1-6]이라 할 수 있다. 사실 치차와 bearing은 그 운동 형태가 동일한 구름 접촉이므로 shotpeening기술을 bearing에 적용할 경우 성능 향상이 크게 기대되어 진다 할 수 있다. 이러한 측면에서 그 적용 가능성에 대해 많은 연구 결과[6]가 있음에도 불구하고 실제 적용에는 거의 없다 할 수 있다. 이것은 shotpeening처리를 구름 bearing에 적용했을 때 경화층이 구름접촉피로에 미치는 영향에 대한 해석이 충분히 이루어 지지 않았기 때문으로 추측되어 진다.

따라서 본 연구에서는 bearing의 성능향상을 위한 재료설계의 일환으로 shotpeening처리를 bearing내륜에 적용하여 수명시험과 아울러 X-ray회절시험을 통해 그 성상변화를 해석하므로써 그 적용의 가능성을 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 bearing강 SUJ2의 환봉을 가공하여 실제 bearing(ISO규격형번: #6206)의 내륜을 제작하였다.

그리고 열처리는 완전 quenching ($840^{\circ}\text{C} \times 40\text{min} \rightarrow$ 유냉:이하 J재) 및 침탄질화처리($\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{NH}_3 + \text{O}_2$ 분위기에서 $825^{\circ}\text{C} \times 5\text{hr} \rightarrow$ 유냉:이하 JCN재)를 행한 뒤 tempering처리를 하였다. shotpeening처리(이하 SP처리)는 경도 $\text{H}_R\text{C}60$ 이상의 직경 0.6mm의 shot구로 archeight 0.7~0.8mmA, coverage 300%의 조건에서 행하였다(이하 J-SP재, JCN-SP재). 그리고 SP처리후 이들의 표면조도를 조절하기 위하여 궤도면을 연마한 뒤 시판의 동일규격 bearing의 외륜($\text{H}_R\text{C} 62.3$) 및 ball($\text{H}_R\text{C} 63.1$)을 이용해 조립하여 bearing의 완제품을 제작하였다.

구름마찰시험은 bearing성능시험기에서 행하였다. 이때 시험하중을 918kgf (radial하중), 회전수를 2500rpm으로 하였으며 윤활조건하(순환)에서 행하였다. 사용윤활유로는 turbine oil #68을 사용하였으며 이물질혼입시험에서의 이물질로는 시판과 동일재료, 동일경도의 $100\mu\text{m}$

크기의 분말 0.06wt%를 윤활유중에 혼입시켜 시험하였다.

X선회절시험은 Crka선(V-Filter)을 사용 a(211), γ (220)을 측정, 잔류응력 및 잔류 austenite 함유량을 측정하였다. 케도면하부의 깊이방향으로의 측정은 케도면을 순차 전해연마하면서 측정하였으며 반가폭은 구름마찰면에 평행한 α -Fe(211)를 측정한 $\Psi=0^\circ$ 때의 값을 사용하였고 잔류응력은 $\sin^2\Psi$ 법[7]을 사용하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-2. 수명시험결과

Table.1는 J재 및 JCN재의 SP처리유무에 따른 4조건을 시편을 청정유 및 이물질이 혼합된 혼탁유중에서 각각 3~4개씩 시험하여 수명에 달한 시간을 평균하여 비교한 것이다. 청정유중에서 JCN재는 J재의 2배정도 수명이 증대하는 것을 알 수 있다. 그러나 SP처리전후의 수명을 비교하면 JCN재의 경우는 3배정도 증가하였으나 J재의 경우는 6배정도 증대하여 결국 SP처리를 하면 표면처리유무에 관계없이 수명이 거의 유사하다는 것을 알 수 있다. 이물질이 혼입된 혼탁유중에서의 결과에서는 일반적으로 알려진 바와 같이 청정유의 결과에 비해 전반적으로 수명이 크게 감소[8]하고 있고 특히 SP처리를 행하지 않은 J재는 계산 수명(31hr)에도 못 미치게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 SP처리를 행하므로써 청정유 시험이나 이물질혼입유 시험 어느 경우도 J재나 JCN재의 수명은 크게 향상됨을 알 수

있고 특히 J재의 수명은 JCN재의 수명에 필적할 만큼의 수명향상이 기대되어 진다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과의 이유로는 결국 일반적으로 알려진 대로 표면층의 경도상승 및 압축잔류응력때문이고 특히 JCN재의 경우는 다량으로 존재하는 잔류austenite상이 크게 수명향상에 작용한 것으로 추측되어 진다. JCN재의 SP처리의 효과가 J재에 비해 감소한 이유로는 JCN재의 잔류austenite상도 크게 감소하였을 뿐만 아니라 JCN재의 표면층이 아주 고경도이므로 충격저항의 저하로 인해 SP처리에 의해 조직이 이미 크게 손상을 받았기 때문으로 생각되어 진다.

3-2. 구름마찰시험전의 SP의 영향해석

Fig.1과 Fig.2는 각각 J-SP재 및 JCN-SP재에 대해 SP처리한 그대로의 상태와 그것을 연마하여 표면조도를 조절한 후의 잔류응력 및 반가폭의 분포를 X선회절에 의해 조사한 결과를 비교한 것이다.

SP처리후에는 최표면의 잔류응력이 어느 것도 약 -500MPa정도이나 표면하 0.1mm부근에서 JCN재가 -900MPa, J재가 -1000MPa 정도의 극대치를 가지는 분포로 그 영향층깊이는 J재가 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

SP처리후 표면조도를 조절하기 위해 어느 것도 30~50 μ m정도연마를 행하였으나 이로 인해 전반적으로 그 분포형태가 표면쪽으로 이동하였다는 것을 알 수 있다. 그러나 J재의 peak의 이동폭은 연마량에 비해 다소 큰것으로 보아 응력재분포현상이 수반되었음을 추측할 수 있다.

고강도강의 반가폭은 일반적으로 하중을 받으면 감소한다. SP처리에 의한 반가폭의 감소는 JCN재에 비해 J재가 현저하다는 것을 알 수 있다. SP처리후 연마가공에 의한 반가폭의 변화는 J재의 표면은 거의 동일하고 내부는 표면으로 이동하였으나 JCN재의 경우는 표면의 값이 다소 상승한 것이 관찰되어 표면부근

Table 1. Comparison of rolling contact fatigue life (hour)

		Test in clean oil	Test in contaminated oil
Full hardened bearing	J	225	19
	J-SP	1,312	180
Carbonitrided bearing	JCN	495	52
	JCN-SP	1,468	150

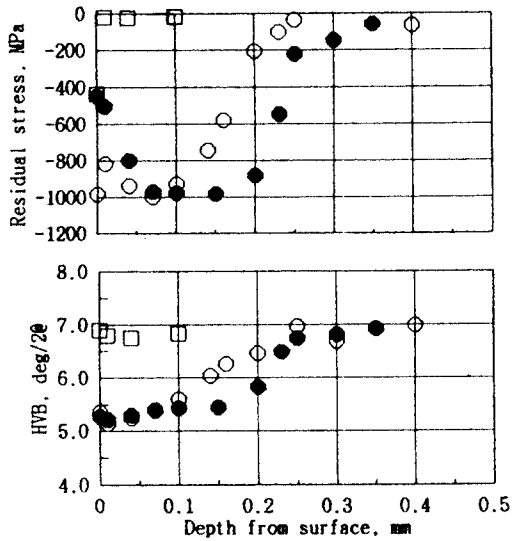


Fig.1. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface after SP in full hardened specimen.

□ : Finishing without SP
 ● : As SP
 ○ : Finishing after SP

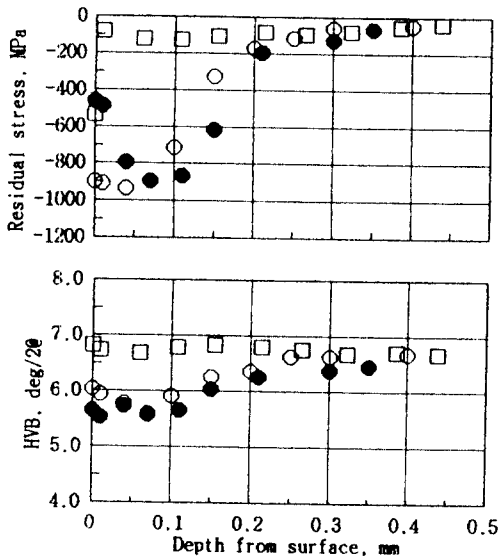


Fig.2. Distribution of residual stress and half value breadth below surface after SP in carbonitrided specimen.

□ : Finishing without SP
 ● : As SP
 ○ : Finishing after SP

에 손상축적이 상당히 진행되었음을 알 수 있다.

Fig.3는 J재 및 JCN재의 SP처리전후의 잔류austenite체적율의 변화를 비교한 것이나 잔류austenite체적율은 SP처리에 의해 현저하게 감소한 것을 알 수 있고 이들은 일반적으로 알려진 바와 같이 대부분 가공유기martensite로 변태한 것으로 생각할 수 있다. 그러나 SP처리에 의한 영향층의 깊이를 생각하면 잔류응력 및 반가폭의 변화에서 어느 것도 0.2mm부근으로 추측되어 지나 JCN재의 경우는 잔류austenite량 변화에서 추측하면 0.1mm부근으로 되나 이것은 침탄질화처리에 의한 C,N원자가 잔류austenite를 안정화 시킨 것으로 판단되어 진다.

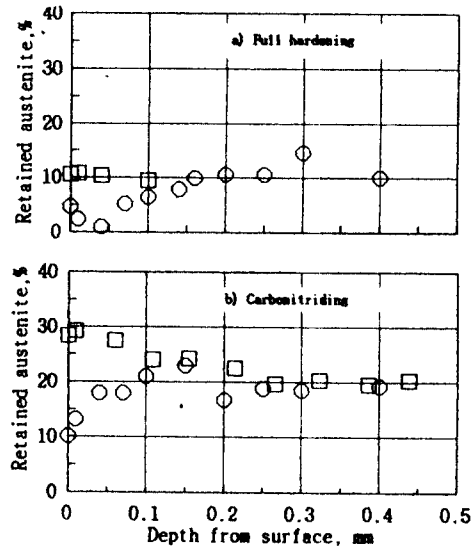


Fig.3. Distribution of amount of retained austenite below surface after SP

□ : Finishing without SP
 ○ : Finishing after SP

3-3. 청정유증 시험한 결과해석

Fig.4는 J-SP재를 청정유증에서 시험한 후의 X선회절결과를 시험전의 상태 및 동일조건 하에서 시험한 SP처리하지 않은 J재의 결과와

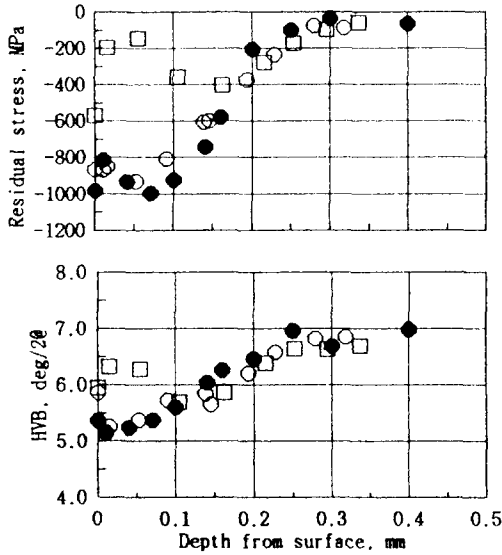


Fig.4. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface after test in clean oil.

□ : After test(J)
 ● : Before test(J-SP)
 ○ : After test(J-SP)

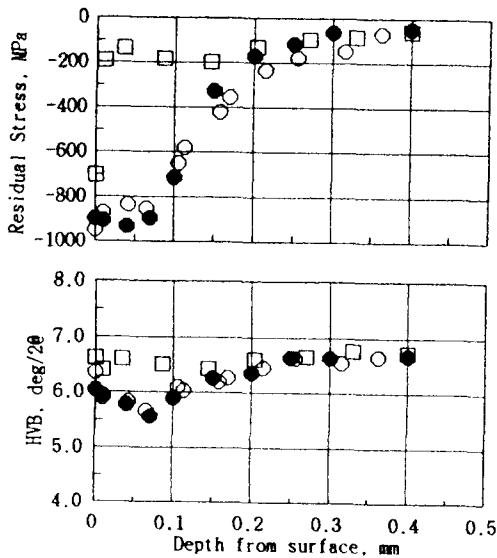


Fig.5. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface after test in clean oil.

□ : After test(JCN)
 ● : Before test(JCN SP)
 ○ : After test(JCN-SP)

비교한 것이다.

J-SP재는 시험후에 최표면의 잔류응력이 다소 감소한 것이 관찰되어 표면층의 소성변형에 의한 영향으로 추측되어 진다. 표면하부에서도 잔류응력분포의 변화가 관찰되어 지나 커다란 잔류응력의 존재에 의해 항복점상승이 예상되므로 소성변형보다는 표면의 소성변형에 따른 응력재분포의 영향임에 틀림없다.

Fig.5는 JCN재의 결과이나 SP처리재의 경우도 J재와 동일한 경향이나 표면부근에서 응력이 J재에 비해 다소 넓은 영역에서 감소하는 것이 관찰되어 응력재분포외에 SP처리에 따른 손상축적부위의 응력해방과도 관련이 있는 현상으로 추측되어 진다.

Fig.4 및 Fig.5의 반가폭의 변화에서는 어느 것도 최표면을 제외하면 시험전후에 그 변화를 볼 수 없어 구름접촉에 의한 손상축적은 최표면에 국한되어 일어남을 알 수 있다. 따라서 J-SP처리재의 청정유하의 flaking은 손상축적이 표면에만 집중하므로 표면기점발생에 틀림없다. JCN-SP재의 경우도 넓은영역에서 잔류응력이 감소하여 내부기점발생도 배재할 수 없으나 내부에 고인성의 잔류austenite가 다량으로 존재하므로 표면기점발생이 분명하다.

3-4. 이물질을 혼합한 혼탁유중 시험한 결과해석

Fig.6 및 Fig.7는 각각 이물질이 혼입된 혼탁유속에서 시험한 J재 및 J-SP재 그리고 JCN재 및 JCN-SP재의 잔류응력 및 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

Fig.6의 J재의 경우 청정유의 결과와 비교하면 잔류응력이 전반적으로 압축쪽으로 커져 이물질혼입에 의한 국부적인 접촉압력의 상승으로 소성변형량이 증가하였음을 알 수 있다. 또한 반가폭의 변화도 최표면부근뿐만 아니라 내부까지 변화하고 있어 손상축적이 넓은 범위에서 일어나고 있음을 추측할 수 있다.

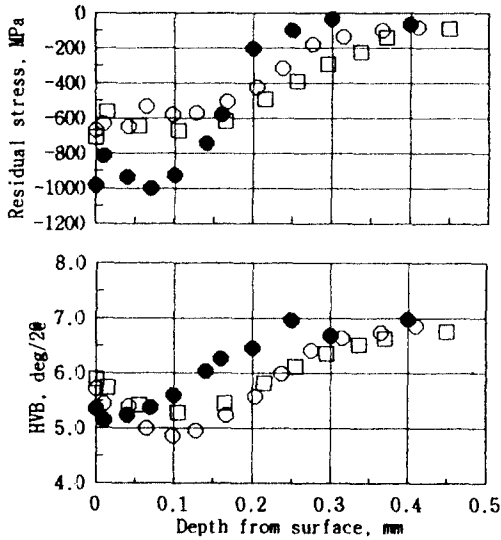


Fig.6. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface after test in contaminated oil.
 □ : After test(J)
 ● : Before test(J-SP)
 ○ : After test(J SP)

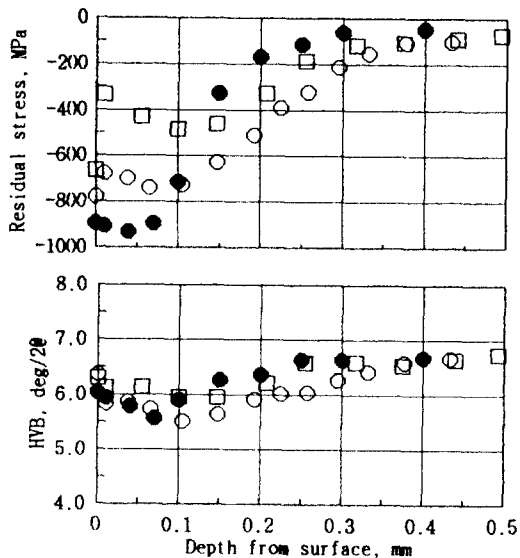


Fig.7. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface after test in contaminated oil.
 □ : After test(JCN)
 ● : Before test(JCN SP)
 ○ : After test(JCN SP)

또한 SP처리재의 시험전후의 결과에서도 잔류응력이 표면부근에서 크게 감소하고 있고 반가폭은 최표면에서는 증가하여 J재와 거의 같은 값을 보이고 있으나 내부에서도 크게 감소한 것을 알 수 있다.

Fig.7은 JCN재의 결과이나 SP처리유무에 관계없이 J재와 동일한 경향이나 그 변화정도는 적음을 알 수 있다.

일반적으로 구름마찰에 의한 손상축적은 dislocation반응에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다[9]. 저자는 이러한 과정이 X선회절에 의해 얻어 지는 잔류응력 및 반가폭의 변화가 수명까지 극대극소의 현상을 보이면서 수명시에는 일정한 값을 보이는 것을 이미 보고[10]한 바 있다.

따라서 본연구에서 사용되어진 재료는 고경도강이므로 초기에 많은 random한 dislocation으로 인해 상당한 반가폭을 나타내고 있음을 예측할 수 있다. 그러나 SP처리에 의해 cell조직을 형성하면서 표면부위는 크게 감소하고 내부는 아직 cell조직이 형성 안된 상태이므로 반가폭이 큰 것으로 추측되어진다. 이러한 상황에서 이물질개입에 따른 면압상승으로 표면부근은 소성변형 및 미세slip 등에 의해 cell조직내에 새로운 dislocation이 형성되면서 다시 반가폭이 증가하다가 microcrack이 생성된 후 어느 한계(일정치)에 도달하면 비로서 crack이 형성할 것이다. 이러한 사실은 Fig.4~Fig.7에서 J재 및 JCN재의 수명시의 최표면의 반가폭이 각각 6.0, 6.5로 이물질 개입여부에 관계없이 동일한 것으로 보아 분명하다. 이에 비해 내부는 외력에 의해 cell조직형성단계로 감소하는 것으로 생각할 수 있다. 아울러 JCN재의 경우는 내부는 표면에 비해 다량의 잔류austenite가 존재하므로 dislocation반응에 의한 cracking은 더욱 늦어질 것이 예상되므로 결국 SP처리재의 손상발생은 최표면입에 틀림없다. 또한 표면에 이물질개입에 따른 표면의 압흔의 존재도 표면발생에 크게 영향을

미칠 것이 분명하다.

4. 결 론

shotpeening처리를 행한 구름bearing을 청정유 및 이물질혼입유 속에서 수명시험 및 X선회절시험을 하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 청정유 및 혼탁유속에서 구름bearing은 shotpeening처리에 의해 수명이 크게 향상되었으며 침탄질화처리와 같은 표면경화처리와 shotpeening처리를 중복처리하는 것은 의미가 없다.

2) 이러한 원인은 일반적으로 알려진 바와 같이 표면층과 내부의 커다란 압축잔류응력과 가공경화에 따른 항복점 상승에 의한 것으로 밝혀 졌다.

3) shotpeening처리 구름bearing의 손상발생은 구름마찰시험전후의 잔류응력 및 반가폭의 변화에서 이물질 개입여부에 관계없이 표면기점으로 추측되었다.

4) 이상에서 구름bearing에 shotpeening처리의 적용은 bearing의 고성능화를 가능케 할 것으로 밝혀 졌다.

5. 참고문헌

- 1) M.Kikuchi, H.Ueda and K.Ranai, "ICSP-2" (1984)208
- 2) T.Hirsch and H.Wohlfahrt, "ICSP-3"(1987) 547
- 3) J.Cheng and B.Ao, "ICSP-1" (1982)333
- 4) Zhu Jingpu, "ICSP-2"(1984)215
- 5) 奏野敦臣, 竝木邦夫, "電氣製鋼"63,1,(1992)22
- 6) H.Xiao,Q.Chen and S.Eryu, "Shot peening", (1990)297
- 7) 日本材料學會, "X線材料強度學", 養賢堂(1981)
- 8) 遠藤吉郎, "表面工學", 養賢堂, (1985)162
- 9) 藤田公明, 吉田彰, 山本敏夫, "潤滑", 21,4(1976) 256
- 10) 李 漢瑛, 川本 信, "トライボロジスト", 34,10 (1989)772