

X선회절에 의한 SHOT PEENING처리 구름베어링의 구름접촉 피로해석

이 한 영

계명대학교 공과대학 재료공학과

Analysis of the Rolling Contact Fatigue of the Shot Peened Ball Bearing by X-ray Diffraction

Han-Young, Lee

Department of Material Science, Keimyung University

Abstract—The shot peening 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 shot peening treatment for inner race of ball bearing on the rolling contact fatigue. Shot peening 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 shot peening treatment. This effect was found to be more pronounced to the full hardened bearing. These facts might be due to the generation of compressive residual stress and the strain hardening of surface layer by shot peening treatment. The failure of the shot peened bearing were presumed to initiate at surface.

Key words—shot peening, rolling contact fatigue, x-ray diffraction, bearing.

1. 서 론

자동차를 비롯하여 각종 기계나 장치의 동력 전달 부위에는 필히 베어링이 사용되어 지고 있으나 일반적으로 베어링용 재료는 강성뿐만 아니라 내마모성 및 내피로성 등을 필요로 하는 기계요소이다.

현재 베어링소재로는 고탄소 고크롬강이 일반적이거나 이 소재는 개발된지 50여년 이상으로 그간 제강방법 및 성분조절에 대한 개량만이 이루어 졌을 뿐 대체 소재개발측면에서는 거의 성과가 없는 상황이다. 이러한 측면에서 최근의 각종 기계 및 장비의 maintenance free의 추세에 비추어 베어링도 소모품이 아닌 영구수명을 요구하고 있어 기존의 소재로는 그 대응에 거의 한계에 달하고 있음이 명백하여 새로운 소재 개발이 시급한 시점이라 할 수 있다.

베어링의 소재개발은 현재 구조용 세라믹스의 적용

[1]에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직 가격 및 신뢰성의 측면에서 아직 연구단계라 할 수 있으며 근년은 기존의 소재를 이용한 칩탄 및 질화와 같은 표면개질의 적용도 검토되어 일부 적용(tapered 롤러베어링에 국한)되고 있으나 수명향상에 대한 가격비가 높아 범용화되지 못하고 있는 상황이다.

일반적으로 치차 등에 행해지고 있는 shot peening 처리는 재료의 고강도화를 꾀할 수 있는 가공기술로 현재 내마모성 및 내피로성이 요구되어 지는 부품의 수명향상을 위해 적용되고 있다[2-6].

사실 치차와 베어링은 그 운동형태가 유사하여 shot peening기술의 베어링에 적용가능성은 아주 높다 할 수 있고 이에 대해서는 이미 많은 연구결과[7]에 의해 입증되었다. 그러나 실제 그 적용에는 거의 없는 것이 현실이다. 이러한 이유로는 shot peening처리 구름베어링의 경화층이 구름마찰시의 거동해석이 이루어지

지 않았기 때문에 추측되어 진다.

따라서 본 연구에서는 베어링의 성능향상을 위한 재료설계의 일환으로 shot peening처리를 일반 완전경화처리 및 침탄질화처리한 베어링에 적용하여 청정유 및 이물질혼입유중에서 수명시험과 아울러 X선회절 시험을 통해 그 성상변화를 해석하므로써 그 적용의 가능성을 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구의 공시재료는 시판의 고탄소 고크롬강인 베어링강 STB2의 환봉을 가공하여 실제 베어링(ISO 규격형번 : #6206)의 내륜(내경 30 mm, 폭 16 mm, 궤도면경 37.175 mm, 외경 62 mm, 궤도면곡률 반경 4.81 mm)을 제작하였다.

그리고 열처리는 완전 경화시키기 위하여 840°C에서 40분유지한 뒤 유냉(유온 : 약 70°C)하였다(이하 J재). 그리고 침탄질화처리는 825°C의 로에 C₄H₁₀가스 및 암모니아가스와 소량의 N₂가스를 유입시키면서 5시간유지한 뒤 유냉하였다(이하 JCN재). 그 뒤 이들은 각각 180°C에서 2시간동안 tempering처리한 후 일부 시편에 대해 shot peening처리(이하 SP처리)를 행하였다. SP처리는 경도 H_RC60이상의 shot구(직경 0.6 mm)로 arc height 0.7~0.8 mmA, coverage 300%의 조건에서 행하였다(이하 J-SP재, JCN-SP재). 그리고 SP처리후 이들의 표면조도를 조절하기 위하여 궤도면을 연마한 뒤 시판의 동일규격형번의 외륜(H_RC 62.3) 및 볼(H_RC 63.1)을 이용해 조립하므로써 4종류의 베어링의 완제품을 제작하였다.

구름마찰시험은 Fig. 1과 같은 베어링성능시험기에서 행하였다. 본 시험기는 일회 시험에 동시에 4종류의 시편을 조사할 수 있으나 본 시험에서는 그림상의 베어링1, 4의 위치에 일반 볼베어링(seal부착)을 장입하고 베어링2, 3의 위치에 동일처리 시편베어링 2개를 장입하여 sudden death시험을 하였다. 그리고 시험하중은 918 kg(레이디얼하중), 회전수는 2,500 rpm으로 하였으며 윤활조건(순환)에서 행하였다. 사용윤활유로는 turbine oil #68을 사용하였으며 이물질 혼입 시험에서의 이물질로는 시편과 동일재료, 동일경도의 100 μm크기의 분말 0.06 wt%를 윤활유중에 혼입시켜 시험하였다. 수명은 진동가속도계를 이용 궤도면에 손상(pitting)이 발생하면 그로 인해 발생하는 진동가

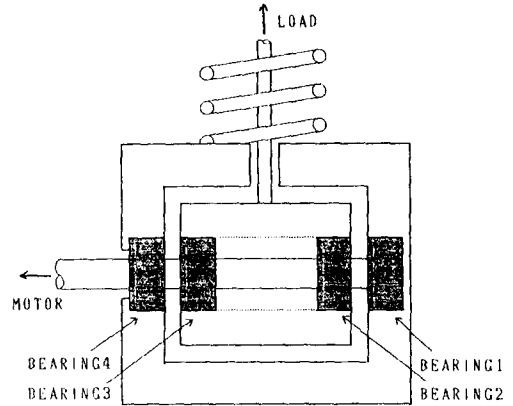


Fig. 1. Schematic diagram of fatigue life tester of bearing.

Table 1. X-ray diffraction condition

Tube of X-ray	CrKα
Diffraction plane	α-Fe(211)
Voltage and current	30 kV, 10 mA
Irradiation area	2 × 2 mm ²
Filter	V
Time constant	4 sec
Scan speed	2° 2θ/sec
Angle of Φ* and Ψ	Φ=0°, 180° Ψ=0°, 15°, 30°, 45°

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

**angle between the specimen normal and the normal of the diffraction plane

속도가 소정의 크기에 달하였을 때 시험기를 정지시켜 그때까지의 총회전시간으로 하였다. 또한 이때 발생한 표면손상은 SP처리의 유무와 관계없이 일반적으로 알려진 볼베어링의 표면손상형태를 나타내었다.

X선회절시험은 Table 1과 같은 조건에서 행하였으며 궤도면하부의 깊이방향으로의 측정은 궤도면을 순차전해연마하면서 측정하였다.

또한 본 연구에서의 회절선 폭의 평가는 구름마찰면에 평행한 α-Fe(211)를 측정할 때의 회절선의 반가폭으로 하였으며 잔류응력은 sin²ψ 법[8]을 사용하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 수명시험결과

Table 2는 J재 및 JCN재의 SP처리유무에 따른 4조

Table 2. Comparison of rolling contact fatigue life (hr)

		in clean oil	in contaminated oil
Full hardening	J	225	19
	J-SP	1,312	180
Carbonitriding	JCN	485	52
	JCN-SP	1,468	150

건의 시편을 청정유 및 이물질질을 혼입한 혼탁유 중에서 시험하여 얻은 L_{10} 수명을 비교한 것이다. 사실 이 결과는 각각 4~5개의 수명시험의 결과로 정량적인 수명비교에서는 다소 무리가 있을 것으로 예상되나 수명의 차이가 현저하여 정성적인 비교측면에서는 충분히 활용가능한 결과로 생각되어 진다.

청정유 중에서 JCN재는 J재의 2배정도 수명이 증대할 것을 알 수 있다. 또한 SP처리전후의 수명을 비교하면 JCN재의 경우는 3배정도 증가하였고 J재의 경우는 6배정도 증대하여 SP처리는 베어링의 수명향상에 유효함을 알 수 있다.

이물질이 혼입된 혼탁유 중에서의 결과에서는 일반적으로 알려진 바와 같이 청정유의 결과에 비해 전반적으로 수명이 크게 감소하고 있고[9], 특히 SP처리를 행하지 않은 J재는 계산수명(31시간)에도 못 미치게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 SP처리를 행하므로써 청정유 및 이물질혼입유 중의 J재나 JCN재의 수명은 크게 향상됨을 알 수 있고 특히 J-SP재의 수명은 JCN재 및 JCN-SP재의 수명과 유사하거나 그 이상의 수명을 나타내고 있음을 알 수 있다.

SP처리를 행하지 않은 JCN재가 J재에 비해 청정유 및 혼탁유 중에서 공히 상당한 수명향상을 나타낸 이유로 침탄질화처리는 일반적으로 알려진 바와 같이 표면층의 경도상승은 물론 커다란 압축잔류응력발생을 야기하므로 이것이 영향을 미친 것으로 생각되어 진다. 특히 혼탁유 중의 수명향상은 다량으로 존재하는 잔류austenite상의 존재도 이물질개입의 효과를 감소한 것으로 추측된다.

SP처리를 행한 경우는 어느 것도 표면층에 가공경화에 의한 경도상승 및 압축잔류응력의 발생(후술)의 정도가 커서 이로 인한 수명향상이 가능하였던 것으로 추측되어 진다. JCN재의 SP처리의 효과가 J재에 비해 감소한 것은 SP처리에 의해 JCN재의 잔류austenite상이 크게 감소하였을 뿐만 아니라 JCN재의 표면층은 원래 고경도이므로 충격저항의 저하로 인해

SP처리에 의해 조직이 이미 크게 손상을 받았기 때문으로 생각되어 진다.

3-2. 구름마찰시험전의 SP의 영향해석

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 J-SP재 및 JCN-SP재에 대해 SP처리한 그대로의 상태와 그것을 연마하여 표면조도를 조절한 후(시험전)의 잔류응력 및 반가폭의 분포를 X선회절에 의해 조사한 결과를 비교한 것이다. 그리고 그림 중에는 비교를 위해 SP처리를 행하지 않은 J재 및 JCN재의 분포도 도식하였다.

SP처리를 행하지 않은 J재의 최표면의 커다란 잔류응력은 연마시 생성된 것으로 최표면에만 존재함을 알 수 있어 J재는 완전경화된 것을 알 수 있다. 그러나 침탄질화처리한 시편은 확산층의 영향으로 상당한 깊이까지 -100 MPa 정도의 잔류응력을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

SP처리 후에는 최표면의 잔류응력이 어느 것도 약 -500 MPa 정도이나 표면하 0.1 mm 부근에서 JCN재가 -900 MPa, J재가 -1000 MPa 정도의 극대치를 가지는 분포로 그 영향층깊이는 J재가 더욱 크다는 것을 알

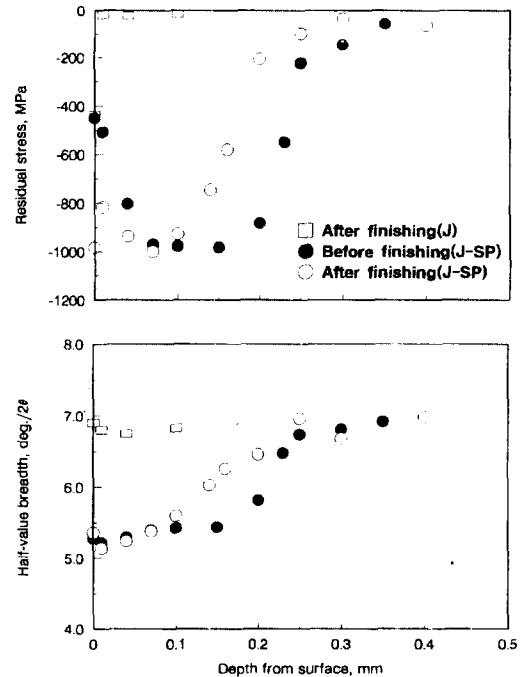


Fig. 2. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface before/after finishing in full hardened and short-peened bearing.

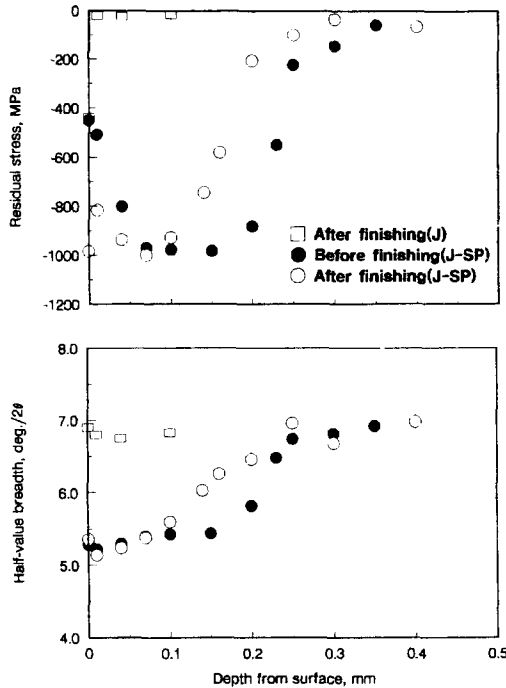


Fig. 3. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface before/after finishing in carbonitrided and short-peened bearing.

수 있다.

SP처리 후 표면조도를 조절하기 위해 어느 것도 30~50 μm 정도 연마를 행하였으나 최표면층은 이로 인한 영향도 무시할 수 없으나 극대치의 값이 거의 변화가 없는 것으로 보아 그 영향층깊이는 극히 적다는 것을 알 수 있다. 연마전후의 분포형태를 비교하면 연마전의 분포가 전반적으로 표면쪽으로 이동한 형태임을 알 수 있다. 그러나 J재의 Peak의 이동폭은 연마량에 비해 다소 큰 것으로 보아 응력재분포현상이 수반되었음을 추측할 수 있다.

고강도강의 반가폭은 일반적으로 하중을 받으면 감소하다가 상승하는 형태를 나타낸다[10]. 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 표면부근에 손상축적이 상당히 진행되었음을 추측할 수 있다.

Fig. 4는 J재 및 JCN재의 SP처리전후의 잔류austenite체적율의 변화를 비교한 것이나 잔류austenite체적

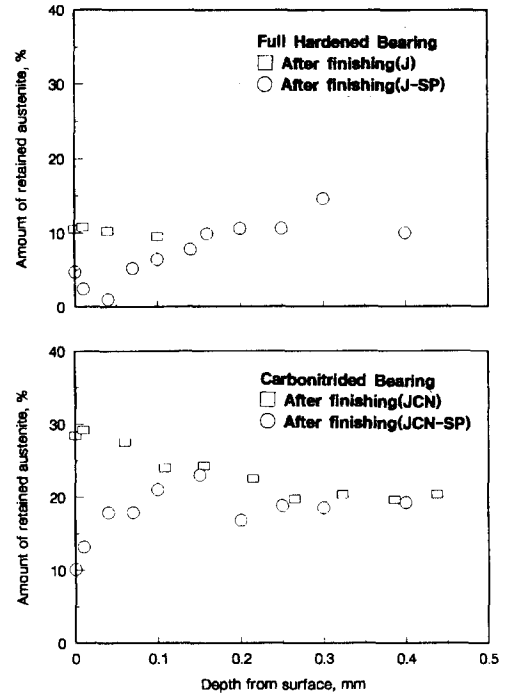


Fig. 4. Distribution of amount of retained austenite below surface after shotpeening.

율은 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 변화(Fig. 3 및 Fig. 4)에서 어느 것도 0.2 mm부근으로 추측되어 지나 JCN재의 경우는 잔류austenite량 변화에서 추측하면 0.1 mm부근으로 일치하지 않으나 이것은 침탄질화처리에 의한 C, N원자가 잔류austenite상을 안정화시켰기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 SP처리전후의 경도분포를 나타낸 것이다. 어느 것도 SP처리에 의해 표면층에 가공경화가당당히 일어났음을 알 수 있다.

3-3. 청정유증 시험한 결과해석

Fig. 6은 J-SP재를 청정유증에서 시험한 후의 X선 회절결과를 시험전의 상태 및 SP처리하지 않은 J재와 비교한 것이다. 일반 베어링의 경우(J재)는 그림에서 보듯이 표면의 잔류응력이 -600 MPa이고 표면하 약 0.15 mm에서 Peak를 나타내고 그 값도 -400 MPa정도

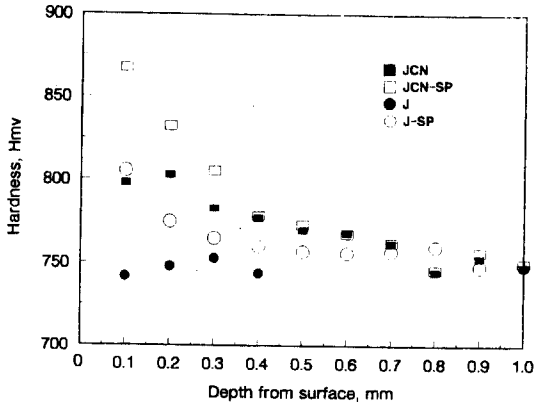


Fig. 5. Distribution of micro-Vickers hardness below surface before/after shotpeening.

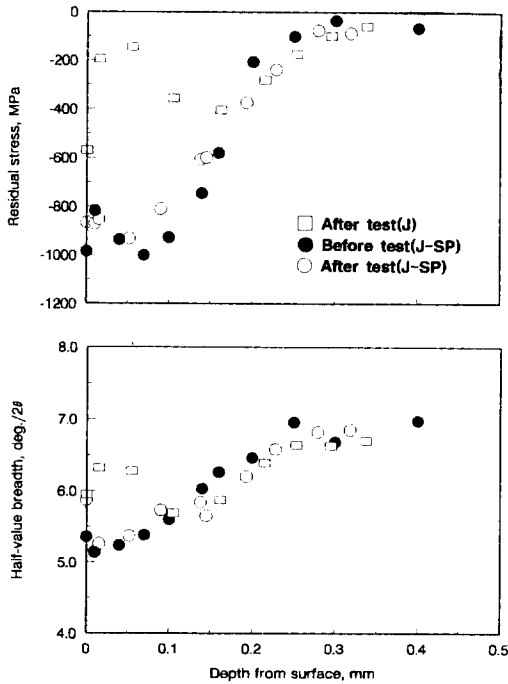


Fig. 6. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface of full hardened bearing after test in clean oil (J: 218 hr, J-SP: 2,776 hr).

임을 알 수 있다. 이러한 잔류응력의 증대는 대부분이 소성변형에 의해 발생한 것으로 표면은 표면돌기의 소성변형이고 내부는 전단응력에 의해 발생하게 된다. 그러나 J-SP재는 가공경화에 의해 경도상승으로 인해 그 영향층의 항복점상승이 예상되나 시험후에 최표면의 잔류응력은 다소 감소한 것이 관찰되어 역

시 표면돌기의 소성변형에 의한 영향으로 추측되어진다. 또한 표면하부에서도 잔류응력분포의 변화가 관찰되나 커다란 잔류응력의 존재에 따른 소성변형은 기대할 수 없어 이들 변화는 표면의 소성변형에 따른 응력재분포의 영향임에 틀림없다.

Fig. 7은 JCN재의 결과이나 SP처리를 행하지 않은 경우는 표면에 -700 MPa, 내부에서 -200 MPa 정도의 잔류응력의 peak를 가지고 있음을 알 수 있다. SP처리재의 시험전후도 J와 동일한 경향이나 구름마찰에 따른 표면부근에서 응력이 J재에 비해 다소 넓은 영역에서 감소하는 것이 관찰되어 응력재분포에 SP처리에 따른 손상축적부위의 응력해방과도 관련이 있는 현상으로 추측되어진다.

Fig. 6 및 Fig. 7의 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 표면기점 발생임에 틀림없다. 또한 JCN-SP재의 경우도 넓은영역에서 잔류응력이 감소하여 내부기점발생도 배재할

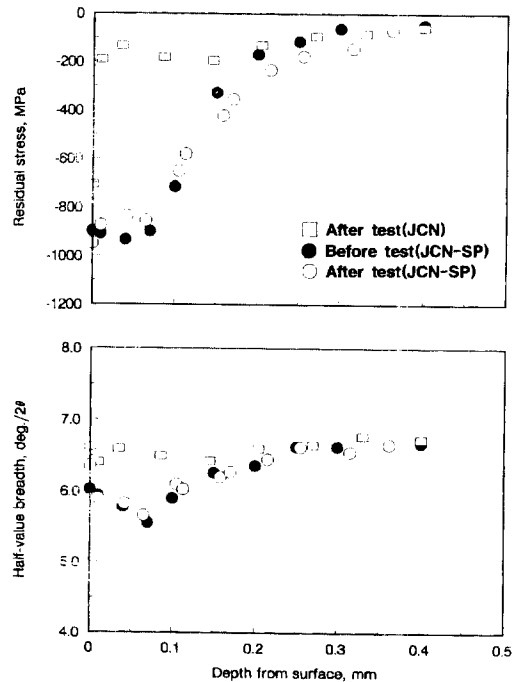


Fig. 7. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface of carbonitrided bearing after test in clean oil (JCN: 409 hr, JCN-SP: 2,086.5 hr).

수 없으나 고인성의 잔류austenite가 표면에 비해 내부가 많으므로 이경우도 표면기점발생으로 추측할 수 있다.

3-4. 이물질혼입을 혼탁유증 시험한 결과해석

Fig. 8 및 Fig. 9는 각각 이물질이 혼입된 혼탁유증에서 시험한 J재 및 J-SP재 그리고 JCN재 및 JCN-SP재의 잔류응력 및 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8의 J재를 청정유하의 시험결과와 비교하면 (Fig. 5) 잔류응력이 전반적으로 압축쪽으로 커져 이물질혼입에 따른 표면에 국부적인 접촉압력의 상승으로 소성변형량이 증가하였음을 알 수 있다. 또한 반가폭의 변화도 최표면부근뿐만 아니라 내부까지 변화하고 있어 손상축적이 전반적으로 발생하고 있음을 추측할 수 있다.

또한 J-SP처리재의 시험전후의 결과에서도 접촉압력상승으로 인해 잔류응력이 표면부근에서 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 반가폭의 경우는 최표면에서는 증가하여 J재와 거의 같은 값을 보이고 있으나 내부에서는 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.

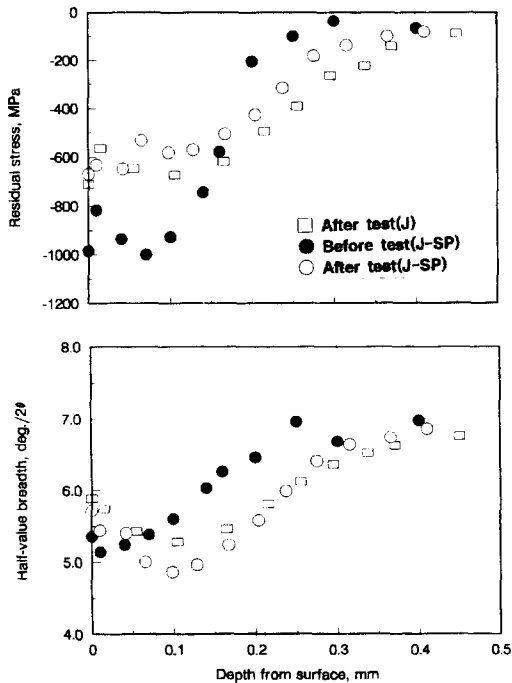


Fig. 8. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface of full hardened bearing after test in contaminated oil (J: 45.2 hr, J-SP: 186.3 hr).

Fig. 9는 JCN재의 결과이나 SP처리유무에 관계없이 J재와 동일한 경향이나 그 변화정도가 적다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 구름마찰에 의한 손상축적은 dislocation 반응에 의해 일어 나는 것으로 알려져 있다. 결국 dislocation의 생성, 이동, 집적 그리고 미세균열의 생성, 성장 그리고 최종적으로 flaking이 발생하게 된다 [11]. 저자는 구름접촉에 따라 X선회절에 의해 얻어지는 잔류응력 및 반가폭의 변화가 수명까지 이러한 과정에 의거 극대극소의 현상을 보이면서 수명시에는 일정한 값을 보이는 것을 이미 보고한 바 있다[12].

따라서 본연구에서 사용되어진 재료는 고경도강이므로 열처리에 의해 생성된 조직상의 dislocation은 random하여 상당한 반가폭을 나타내고 있으나 SP처리에 의해 이동하여 cell조직을 형성하면서 표면부위는 크게 감소하는 상황임을 알 수 있다. 그러나 내부는 외력이 적어 아직 cell조직이 형성 안된 상태로 random한 dislocation으로 인해 반가폭이 큰 것으로 추측된다. 이러한 상황에서 이물질 개입에 따른 면압 상승으로 표면부근은 소성변형 및 미세slip 등에 의해

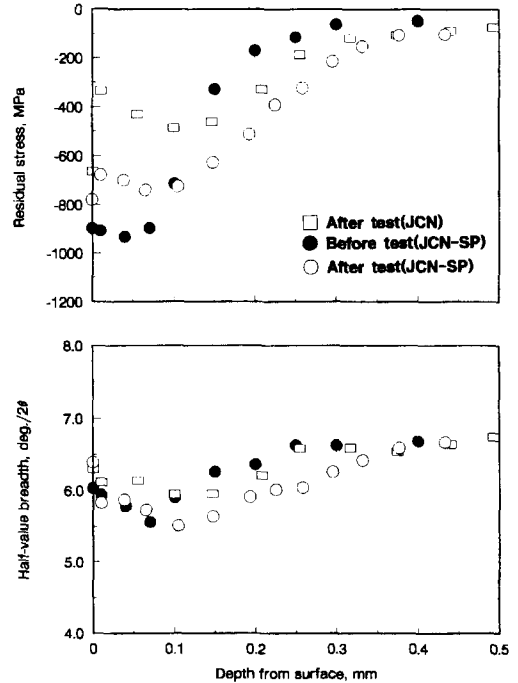


Fig. 9. Distribution of residual stress and half-value breadth below surface of carbonitrided bearing after test in contaminated oil (JCN: 78.4 hr, JCN-SP: 141.6 hr).

cell조직내에 새로운 dislocation이 형성되면서 다시 반가폭이 증가하다가 미세균열이 생성된 후 어느 한계(일정치)에 도달하면 비로소 조대한 균열(flaking)이 형성할 것이다. 이러한 사실은 Fig. 6~Fig. 9에서 J재 및 JCN재의 수명시의 최표면의 반가폭이 각각 약 6.0, 6.5로 이물질 개입여부에 관계없이 유사한 것으로 보아 입증된다 할수 있다. 이에 비해 내부는 외력에 의해 cell조직형성단계로 감소하는 것으로 생각할 수 있다.

아울러 내부는 표면에 비해 잔류austenite의 양이 많으므로 dislocation반응에 의한 cracking은 더욱 늦어질 것이 예상되므로 이경우의 손상발생도 최표면입에 틀림없다. 또한 표면에 이물질개입에 따른 표면의 압흔의 존재도 표면발생에 크게 영향을 미칠 것이 분명하다.

JCN재의 SP처리의 효과가 크지 않은 이유에 대해서는 불명확하나 전술한대로 고경도이므로 SP처리에 의해 이미 미세균열이 생성되었을 것으로 생각되어진다. 본 연구에서는 flaking이 구름마찰에 의해 이미 생성된 미세균열에서 전파한 것이지 dislocation반응에 의해 생성된 crack에서 발생한 것인지는 불명확하나 SP처리를 다른 표면경화처리와 중복처리한다는 것은 의미가 없다는 것이 분명하다.

4. 결 론

수명시험 및 X선회절시험을 하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 청정유 및 혼탁유속에서 구름베어링은 shot peening처리에 의해 수명이 크게 향상이 되었으며 칩탄질화처리와 같은 표면경화처리와 shot peening처리를 중복처리하는 것은 의미가 없다.
2. 이러한 원인은 일반적으로 알려진 바와 같이 표면층과 내부의 커다란 압축잔류응력발생과 가공 경화에 따른 항복점 상승에 의한 것으로 밝혀졌다.
3. shot peening처리 구름베어링의 손상발생은 구름마찰시험전후의 잔류응력 및 반가폭의 변화에서 이물질 개입여부에 관계없이 표면기점으로 추측되었다.

4. 이상에서 구름베어링에 shot peening처리의 적용은 베어링의 고성능화를 가능케 할 것으로 밝혀졌다.

본 연구는 1996년도 한국과학재단지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 연구기금으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 예들들어 藤原孝誌, セラミックスの 轉がり軸受への應用, 機械設計, 27, 7, pp. 35, 1983.
2. Masao Kikuchi, Hideo Ueda and Ketsake Ranai, "The improvement of fatigue durability of carburized steel with surface structure anomalies by shot peening," ICSP-2, pp. 208, 1984.
3. T. Hirsch and H. Wohlfahrt, "Fatigue strength of case hardened and shot peened gear," ICSP-3, pp. 547, 1987.
4. J. Cheng and B. Ao, "The effect of shot peening on contact fatigue life of carburized steel," ICSP-1, pp. 333, 1982.
5. Zhu Jingpu, "The effect of shot peening on contact fatigue behavior of 40Cr steel after compound heat treatment," ICSP-2, pp. 215, 1984.
6. 奏野敦臣, 並木邦夫, "浸炭鋼の 疲れ強さに およぼす ショットピーニングの影響," 電氣製鋼, 63, 1, pp. 22, 1992.
7. H. Xiao, Q. Chen and S. Eryu, "The effect of shot peening on rolling contact fatigue behavior and its crack initiation and propagation in carburized steel," Shot peening, pp. 297, 1990.
8. 日本材料學會, X線應力測定法標準, 1981.
9. 遠藤吉郎, 表面工學, pp. 162, 1985.
10. 日本材料學會 X線材料強度部門委員會, "X線回折による ロール表面損傷の 評價," 材料, 28, 312, pp. 847, 1979.
11. 藤田公明, 吉田 彰, 山本放夫, "S45C焼なまし ロールの 轉がり疲れに 關する 研究," 潤滑, 21, 4, pp. 256, 1976.
12. 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, 1989.