

쇼트피닝 처리를 한 베어링강의 고사이클 피로수명 및 파괴거동[§]

윤 상 재* · 최 낙 삼*[†]

* 한양대학교 기계공학과

High Cyclic Fatigue Life and Fracture Behaviors of Shot-Peened Bearing Steel

Sang Jae Yoon* and Nak Sam Choi*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received April 18, 2011 ; Revised June 1, 2011 ; Accepted June 3, 2011)

Key Words : Bearing Steel(베어링강), Rotary Bending Fatigue Test(회전굽힘피로시험), Fish-eye Fatigue Fracture(어안 피로균열), Shot-peening(쇼트피닝), Probabilistic-Stress-Life Curve(P-S-N 곡선)

초록: 쇼트피닝(shot-peening) 처리를 한 베어링강의 고사이클 피로거동을 연구하였다. 열처리한 베어링강(JIS-SUJ2) 시험편과 열처리 후 쇼트피닝 표면가공을 추가한 시험편을 사용해 회전굽힘피로시험을 수행하고 파단된 시험편의 파면을 분석하였다. 시험편의 피로파괴는 표면 결함에서 비롯된 표면 파괴와, 내부의 비금속개재물에서 비롯된 내부형 파괴의 두 종류로 발생하였다. 내부 파괴의 경우 비금속 개재물 주변에 어안(fish-eye) 모양의 파괴양식이 관찰되었다. 개재물은 표면으로부터의 깊이와 형상에 따라 피로 수명에 큰 영향을 주었다. 쇼트피닝 가공을 한 베어링강은 저사이클 하중영역 및 고사이클 하중영역에서 모두 피로수명이 향상되었으며, 하중이 작아질수록 피로수명의 개선은 더욱 커졌다. 또한 2 모수 와이불(Weibull) 분포를 이용하여 베어링강의 확률-응력-수명 (P-S-N) 곡선을 구하여 신뢰도 높은 피로수명 예측을 하였다.

Abstract: Shot-peening effects on the fatigue behavior of bearing steel were investigated under the high cyclic loading. Hourglass shape specimens were made of bearing steel(JIS-SUJ2) for rotary bending fatigue tests. Two kinds of treatments were performed : a heat treatment and a shot-peened surface treatment after the heat treatment. The fracture surfaces of specimens were classified into two types of fracture mode : the surface fracture mode induced by a surface defect and the internal fracture mode induced by a nonmetallic inclusion. Inclusion depth and shape affected considerably the fatigue life. Shot-peening treatment improved much the fatigue life of the bearing steel under low and high levels of cyclic loads. Probabilistic-stress-life (P-S-N) curves were suggested for the reliable fatigue life estimation of the improved bearing steel.

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 점차 증대되는 기계 구조물의 높은 수명과 안전성, 신뢰성에 대한 요구에 연구자들은 10⁷ 사이클 이상의 고수명 영역까지 연구의 폭을 넓혀왔다. 고수명 영역의 피로거동에 대한 관심은 1998 년 이후 “Very High Cycle Fatigue Conference” 에 반영 되었는데, 이 학회에서 많은 연구자들은 고수명 영역에서 고강도강의 피로거동은

피로파괴의 원인을 달리하는 계단식 혹은 두 가지의 피로 수명(S-N) 곡선을 갖는다고 발표하였다.⁽¹⁾ 이후 고강도강의 피로거동에 영향을 미치는 인자에 관한 연구에서 균열 시작점의 위치가 재료의 표면 혹은 내부에 따라 피로수명이 큰 영향을 받는다고 보고되었다.⁽²⁾ Murakami 등^(2,3)은 피로 환경에서 균열이 재료 내부로부터 시작될 때 파단면에서 공통적으로 생성되는 초기 균열 영역, 즉 어안영역(Fish-eye region)을 자세하게 관찰하였다.

Kanazawa 등⁽⁴⁾은 크롬몰리브덴강(1Cr-0.2Mo steel) 을 대상으로 환봉형(round bar) 시험편을 이용하여 고사이클 저응력 회전굽힘피로시험을 하였다. 어안영역은 경화강(hardened steel)이나 표면인성화강(surface toughened steel) 등이 고사이클 저응력 피

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, nschoi@hanyang.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

로거동에서 피로파괴 되었을 때 파면에서 관찰되는 어안 모양의 밝고 작은 영역을 말하며, 강 내부에서 알루미늄 혹은 마그네슘 등 산화물 이물질의 밀집 지역이나 결정입계(grain boundaries)가 기원이 된다고 하였다. 또한 하나의 파단면에서 관찰된 다수의 어안을 근거로 내부균열은 여러 곳에 발생하지만 그 중 한 개의 균열이 최종파괴를 일으키며 나머지 균열들은 충분히 성장하지 못한다고 하였다.

균열이 재료의 파괴에 이르는데 가장 중요한 요소는 응력확대계수(stress intensity factor)로 대부분의 균열은 결정을 관통하는 과정에서 산화효과(oxidation effect)로 인해 균열 끝(crack tip)이 소성둔화(plastic-blunting)되어 성장을 멈추지만, 임계응력(critical stress)값 이상으로 작용하는 경우 균열은 어안영역을 따라 개재물의 반경방향으로 전파되고 최종적으로 파괴를 일으키게 된다.

Shiozawa 등⁽⁵⁾은 베어링강(SUJ2)을 대상으로 환봉형 시험편을 이용하여 고사이클 저응력 회전굽힘피로시험을 하였다. 베어링강의 표면경화층 아래 오스테나이트(austenite) 결정입계가 분포되어 있는 지역에서 비금속 개재물이 위치하고, 피로로 인해 생긴 열이 금속 개재물과 모재 사이에 열팽창계수 및 탄성계수의 차이로 인한 응력집중을 초래하면, 어안영역 내부에서 개재물의 주변에 존재하는 과립모양의 밝은 영역(optically granular-bright facet)에서 아주 작은 미세균열이 생겼다. 이 영역은 다량의 탄화물(carbide)이 밀집되어있고 매우 거칠기 때문에 미세균열 생성에 용이했으며 이 영역에서 생성된 작은 미세균열들은 서로 합쳐져 큰 균열로 성장하게 되었다.

최근에는 다양한 공학적 접근을 통한 고강도강의 피로거동에 대한 연구가 이루어지고 있다. Murakami 등⁽³⁾은 금속의 표면 결함과 내부 개재물의 형상 및 위치가 재료의 피로거동에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가 결과를 정리하여 보고하였다. Sakai 등⁽⁶⁾은 두 가지 경향을 갖는 고강도강의 피로 수명 곡선에 통계학적 방법으로 접근하여 확률론적 피로 수명 곡선을 제안하였다. Atkinson 등⁽⁷⁾은 철 내부에 존재하는 개재물이 철의 성질에 미치는 영향과 Murakami 가 제안한 금속 내 최대 개재물 크기의 통계적 예측방법인 Statistics of Extreme Values (SEV) method 를 분석하고 SEV method 를 기초로 하여 자신이 제안한 Generalized Pareto Distribution (GPD) method 를 통해 강 내부에 존재하는 개재물의 최대 크기와 개재물이 갖는 문

턱값 등을 예측, 실제 결과와 비교하였다. Furuya 등⁽⁸⁾은 회전굽힘피로시험의 회전속도 조건을 달리 하며 강의 파괴 거동을 살폈고 Tokaji 등⁽⁹⁾은 표면 거칠기를 달리 처리한 강의 피로 거동을 연구하였다.

한편 기계 재료 및 구조물의 피로수명 증가를 위한 재료의 피로특성 강화법이 제안되고 있으며 이 중 경제성이 우수한 쇼트피닝 처리가 재료의 피로특성을 향상시키고 있다.⁽¹⁰⁾ Shiozawa 등⁽¹¹⁾은 두 가지 조건으로 쇼트피닝 처리된 고탄소크롬강에 대한 기가사이클(10^9 cycle) 피로 영역에서 재료 내부의 균열생성 및 전파에 미치는 쇼트피닝 처리 효과를 고찰하였다. Lee 등⁽¹²⁾은 쇼트피닝 처리조건을 달리한 베어링강 시험편들에 대하여 기가사이클 영역에서의 Cantilever 식 회전굽힘피로시험 결과를 보고하였다. Chung 등⁽¹³⁾은 쇼트피닝 가공 변수인 shot steel ball 의 크기 및 속도, 투사시간 등이 재료의 피로강도에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. Kim 등⁽¹⁴⁾은 평활재와 U-노치재 시험편에 대하여 다른 조건으로 두 번 표면 경화를 시키는 2 단 쇼트피닝을 적용하고 회전굽힘 피로시험과 함께 응력 분포를 해석하였다.

상기의 연구들은 표면처리가 이루어지지 않은 고강도강만을 사용하여 시험이 수행되었거나 쇼트피닝 가공 조건에 따른 재료의 피로수명거동을 연구 대상으로 하였을 뿐, 쇼트피닝 처리가 이루어진 재료의 피로 강도에 대해서 비금속 개재물의 위치와 형상이 미치는 영향을 검토한 경우는 드물다.

본 연구에서는 고강도강인 베어링강(JIS-SUJ2)의 피로수명에 대해 개재물의 위치와 형상이 미치는 영향을 쇼트피닝 처리재와 미처리재로 구분하여 비교연구하였다. 표면형 파괴와 내부형 파괴에 따라 구분되는 피로 수명(S-N) 선도를 구하여, 피로 수명 예측이 어려운 고강도강의 피로시험 데이터에 대하여 2 모수 와이블 분포를 적용한 신뢰도 높은 확률 응력 수명 (P-S-N) 곡선을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서는 각종 기계구조물의 동력 전달부에 사용되는 고강도 베어링강인 JIS-SUJ2 를 시험편의 재료로 사용하였으며 화학적 조성은 Table 1 과 같다. 시험편은 회전굽힘피로시험을 위해 JIS Z 2274⁽¹⁵⁾ 규격에 따라 Fig. 1 과 같은 hourglass 형태

로 제작되었다.

2.2 시험편의 열처리

Fig. 1 과 같이 가공된 시험편은 Fig. 2 와 같은 열처리 사이클로 830° C 에서 40 분간 가열 후 오일에서 담금질(oil quenching) 시키고 다시 160° C 에서 40 분간 뜨임(tempering)하여 공랭시켰다.

2.3 쇼트피닝 가공

열처리된 시험편 표면에 압축잔류응력을 부여하기 위한 쇼트피닝 가공은 임펠러 투사방식의 기계식 쇼트피닝 머신을 이용하였다. 쇼트피닝 가공 조건은 직경 360mm 의 임펠러로 지름 0.3mm 의 shot steel ball 을 30m/s 의 투사속도로 시험편 표면에 360 초 동안 투사시켰으며 가공이 끝난 시험편의 커버리지(coverage)는 100%로 확인되었다.

2.4 압축잔류응력 측정

쇼트피닝 가공된 시험편의 압축잔류응력 분포는 X-선 잔류응력측정기(Diffraktometer XStress3000)를 이용하여 측정하였으며 이때 계산은 $2\theta - \sin^2 \psi$ 법을 이용하였다.⁽¹⁶⁾ 여기서 ψ 는 X 선의 입사각, θ 는 무응력 상태에 있는 재료의 X 선 회절각이다. 잔류응력의 측정은 표면으로부터 20 μ m 간격으로 120 μ m 깊이까지 전해연마를 반복하면서 측정하였다.

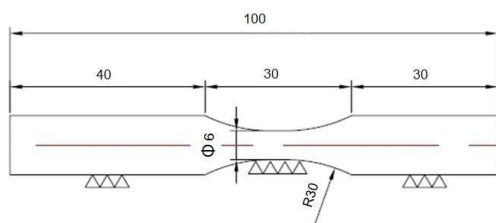


Fig. 1 Geometry of test specimen (unit: mm)

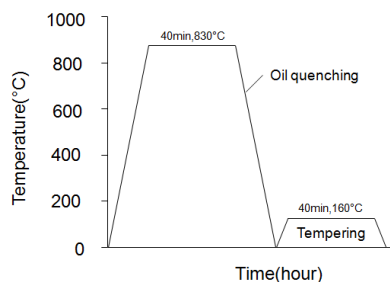


Fig. 2 Heat treatment cycle for bearing steel

2.5 경도시험

쇼트피닝이 베어링강 표면의 경도에 미치는 영향을 알아보기 위해 쇼트피닝 처리재와 미처리재 각각에 대하여 비커스 경도 시험기(Vickers Hardness Tester)를 사용해 경도시험을 수행하였다.

2.6 인장시험

피로시험에 적용할 응력레벨을 정하기 위하여 만능재료시험기(MTS-25ton)를 사용해 피로시험편과 같은 형태의 시험편을 1mm/min 의 부하속도로 인장시켜 평균 인장강도 값을 구했다.

2.7 피로시험

피로시험은 Fig. 3 과 같은 4 점접 회점굽힘 피로시험기(SHIMADZU, H7)를 사용하여 인장과 압축 응력이 동일하게 반복되므로 응력비(stress ratio, R) -1, 회전 수 3000rpm 으로 수행하였다. 최대응력은 총 4 개의 응력레벨로 나누었으며 응력 레벨당 5 개의 시험편을 사용하였다. 각 응력레벨은 KS B ISO 1143⁽¹⁷⁾ 에 따라 시험편게이지부의 표면에 가해지는 응력 진폭이 정적시험을 통해 얻은 인장강도의 38%, 42%, 46%, 50% 값이 되도록 시험기 주의 무게를 증가시켜 굽힘응력을 인가시켰다. 시험편 표면의 공칭인장응력 σ 는

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

Table 1 Chemical composition of bearing steel material SUJ2 (weight%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
0.99	0.25	0.30	0.013	0.005	1.45	0.10	0.06



Fig. 3 Rotary bending fatigue test machine

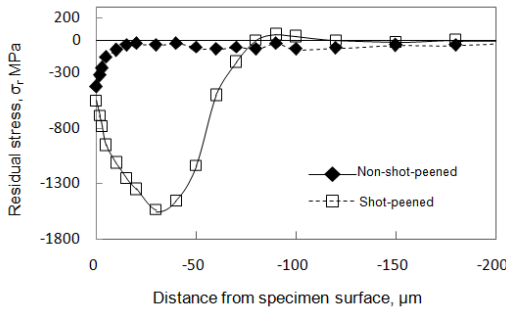


Fig. 4 Residual stress distribution in the shot-peened specimen

여기서 M 은 최대 굽힘모멘트($=P \times m / 2$), P 는 하중, m 은 시험편이 시험기에 고정되는 거리 (30mm), c 는 시험편의 중심축으로부터 표면까지의 거리(3mm), I 는 시험편 게이지부의 원형단면 관성모멘트($=\pi d^4 / 64$), d 는 시험편 게이지부의 지름(6mm)이다.

2.8 파면부 분석

피로 파괴에 영향을 미치는 주된 요소를 미시적으로 분석하기 위하여 파단된 시편의 파면부를 주사현전자현미경(SEM)을 통해 관찰하고 파면부에 대한 화학적 성분분석을 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(EDX)를 통해 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔류응력의 분포

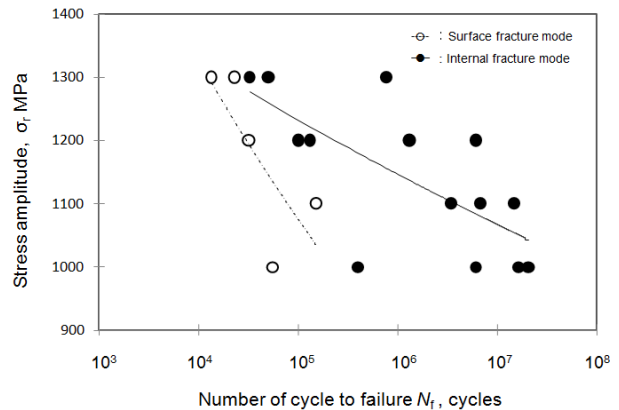
Fig. 4 는 쇼트피닝 처리재의 표면부 압축잔류응력분포를 나타낸다. 쇼트피닝 미처리재 표면에 열처리 과정에서 생성되어 존재하는 잔류응력 값 -418MPa 에 비해 3.7 배 정도 높은 압축잔류응력 -1530MPa 이 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.2 경도와 인장강도

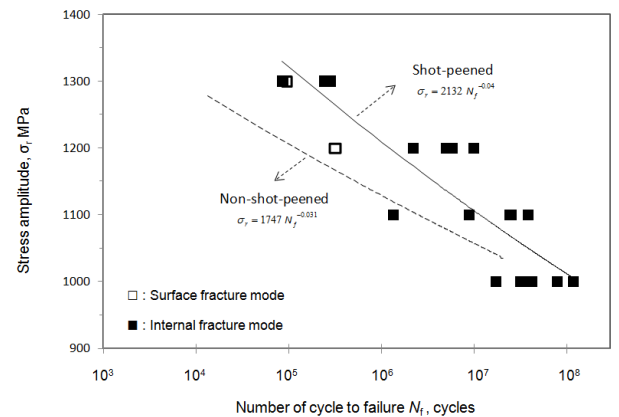
비커스 경도 측정값(Hv)은 쇼트피닝 처리재의 경우 1019 ± 10 , 미처리재의 경우 863 ± 10 이었다. 인장강도는 쇼트피닝 처리재의 경우 2543 ± 60 MPa, 미처리재의 경우 2535 ± 50 MPa 로 측정되었다.

3.3 응력-수명(S-N) 곡선

Fig. 5(a)와 (b)는 쇼트피닝 미처리재와 처리재에 대한 각각의 응력-수명 곡선을 나타낸다. 많은 연구자들로부터 보고된 것처럼 각각의 곡선에서 두 재료 모두 균열의 시작점의 위치가 표면부와 내부에 따라 응력-수명 거동이 다른 경향을 보인다.



(a)



(b)

Fig. 5 The S-N curves of bearing steel : (a) non-shot-peened specimen, (b) shot-peened specimen

Fig. 5(a)와 같이 미처리재의 경우 균열이 내부로부터 발생되어 파단된 시편(internal fracture)의 피로 수명이 표면에서 시작되어 파단된 시편(surface fracture)의 피로수명보다 긴 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)의 쇼트피닝 처리재와 Fig. 5(a)의 미처리재의 수명데이터를 비교해본 결과, 평균 피로 수명이 최고응력레벨(50%)에서는 약 7.57 배, 최저응력레벨(38%)에서는 약 6.23 배, 전 하중영역에서는 약 6.72 배로 향상되었으며, 쇼트피닝 처리재가 미처리재에 비해 피로수명데이터의 분산이 훨씬 작아졌다. 또한 피로파괴가 표면으로부터 시작된 확률이 10% 정도여서 미처리재의 경우(25%)보다 상대적으로 적었는데 이는 쇼트피닝 가공에 의해 생긴 표면부의 압축잔류응력층이 표면유도 피로파괴를 억제한 것으로 사료된다.

표면응력확대계수 K_{sur} 가 표면응력확대계수의 문턱값 $K_{th,s}$ 을 넘어서면 균열은 표면 결함에서 시작되어 최종파단까지 이르게 되며, 표면응력확

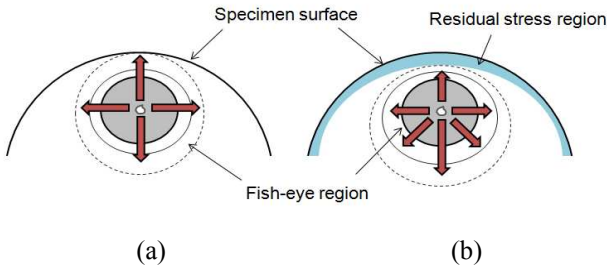


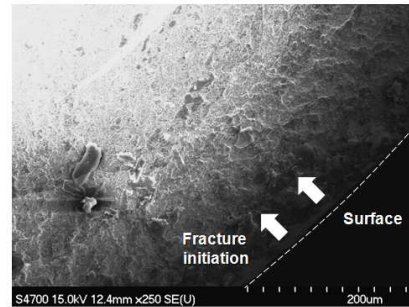
Fig. 6 Schematic representation for the formation of the fish-eye : (a) non-shot-peened specimen, (b) shot-peened specimen⁽¹⁸⁾

대계수가 $K_{th,s}$ 이하일 때에는 내부 개재물의 응력 확대계수 K_{int} 가 내부 개재물의 응력확대계수의 문턱값 $K_{th,i}$ 을 초과하면서 내부균열이 시작된다고 하였다.⁽⁵⁾ 즉, 쇼트피닝으로 인해 생성된 압축 잔류응력만큼 회전굽힘시험에서 발생하는 인장응력이 상쇄되어 표면에 존재하는 결함들의 응력확대계수가 그 문턱값을 넘지 않게 되면서 균열의 시작점이 내부 개재물로부터 생성되는 빈도가 높아지고 그만큼 수명 또한 길어짐을 Fig. 5(b)의 결과에서 확인할 수 있다. 또한 내부에서 균열이 시작되는 파괴모드의 경우에는 Fig. 6(a)와 (b)에서 도식적으로 표현되듯이, 내부의 개재물과 모재 사이의 탄성계수 및 열팽창계수의 차이에 의해 국부적 선재응력이 집중되고 여기에서 초기 균열이 생성되는데, 이렇게 생성된 균열이 Fig. 6(b) 와 같이 쇼트피닝에 따른 압축잔류응력층에 의해 표면으로의 전파가 방해받기 때문에 Fig. 6(a)의 미처리재 경우에 비해 균열의 성장에 많은 시간이 소요되고 그만큼 피로 수명이 증가하게 되는 것이다.⁽¹⁸⁾

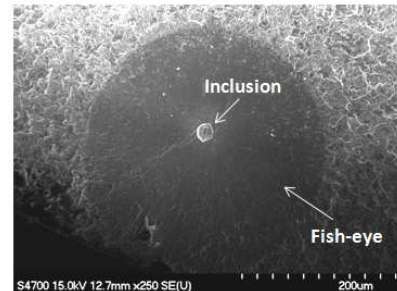
3.4 피로 파단면 분석

Fig. 7 의 (a)와 (b)는 각각 쇼트피닝 미처리재 중 표면 균열 파괴 시편과 내부 균열 파괴 시편의 파단면 SEM 관찰 사진을 나타내며, (c)는 쇼트피닝 처리재 중 내부 결함 파단 시편의 파단면 사진을 나타낸다. 초기 균열이 표면에서 발생하여 파단된 시편의 전형적인 파괴 거동을 보이는 (a)의 경우 파단면의 요철이 매우 심하고 거칠어 생성된 균열이 빠르게 진전되었음을 알 수 있다. 초기 균열이 내부에서 발생하여 파단된 (b)와 (c)에서는 내부 개재물로부터 생성된 피로 균열이 느린 속도로 진전하며 만드는 흔적인 어안 (fish-eye) 모양의 초기 균열 성장 양식이 보였다.

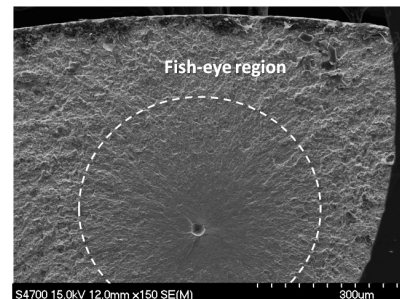
베어링강이 회전굽힘반복피로를 받게 되면 열이 발생하게 되고, 내부의 비금속 개재물과 베어링강



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 SEM observation of the fracture surfaces : (a) surface fracture in non-shot-peened specimen, (b) fracture surface revealing a fish-eye in non-shot-peened specimen, (c) fracture surface revealing a fish-eye in shot-peened specimen

모재와의 열팽창계수와 탄성계수의 차이로 인해 개재물-모재 계면에 상당한 응력 집중이 발생하게 되어 개재물 주변에는 전위가 불규칙하게 증식하게 된다. 끊임없는 전위밀도의 증가로 마르텐사이트 가지(martensite lath)가 서서히 증가하게 되고 많은 미세조직과 전위세포를 형성하게 되며, 이것은 광범위한 미세조직을 불규칙한 형태로 만들고 다각화 시킨다.

응력집중이 원인이 되어 개재물 주변 근처에서만 한정적으로 발생하는 이 현상은 지속적으로 분할된 마르텐사이트 가지 및 불규칙한 형태의 입자가 문턱값을 넘어서면서 미세조직층과 베어링강

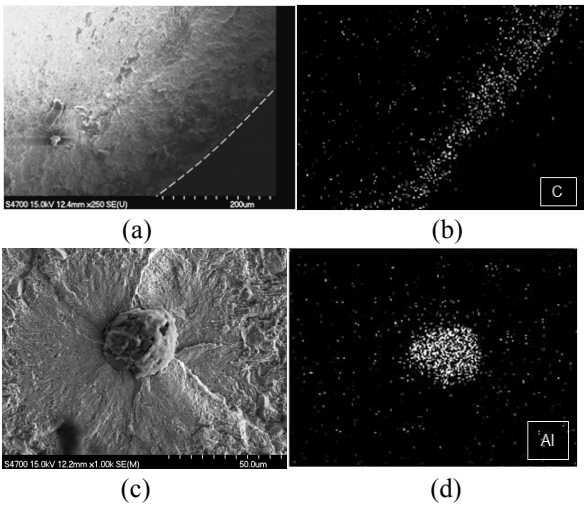


Fig. 8 EDX analyzed results : (a) surface fracture in the non-shot-peened specimen, (b) Carbon distribution near the fracture surface expressed as white points, (c) internal fracture caused by nonmetallic inclusion in non-shot-peened specimen, (d) Aluminum distribution in the nonmetallic inclusion expressed as white points

모재 사이가 분리되고 그 계면을 따라 미세박리(micro-debonding)가 생성된다. 생성된 미세박리부가 서로의 합체하면서 개재물 주변은 매우 거칠어지며⁽¹⁹⁾ 이것은 개재물에서 생성된 균열의 전파를 가속화시킨다.

균열은 초기에 어안영역(fish-eye region)까지 개재물의 반경방향으로 성장하다가 표면층 효과(surface layer effect)에 의해 역제를 받으면서 균열 전파가 접선방향으로 진행하게 된다.⁽²⁰⁾

Fig. 8 은 쇼트피닝 미처리재 중 표면 균열 파괴 시편과 내부 균열 파괴 시편의 파단부를 EDX 로 성분 분석한 결과를 나타낸다. 표면 균열 파단 시편의 성분분석 결과인 (b)의 경우 균열 시작점 부근에 탄소함량이 많았음을 관찰할 수 있었는데 고 탄소 함량에 따른 베어링 스틸의 취성적 성질이 초기 균열생성의 영역이 되었음을 의미한다. 내부 결함 파단 시편의 성분분석 결과인 (d)에서는 어안영역 중심부에 존재했던 개재물에서 알루미늄 성분이 관찰되었다. 이 분석결과로부터 내부 균열 파괴 거동은 Al 개재물과 이를 둘러싸고 있는 스틸모재의 탄성계수 차이가 반복피로에 의해 계면부에 응력집중을 초래하고 이것이 초기균열을 생성해 초기에는 아주 느린 속도로 진행하였던 것으로 사료된다.

3.5 어안모양과 피로거동의 정량적 관계

어안이 피로거동에 미치는 영향에 대하여 알아

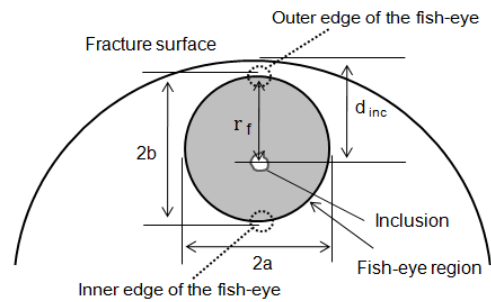


Fig. 9 Definition of internal crack geometrical parameters⁽²¹⁾

보기 위해 어안 측정시의 기하학적인 변수를 Fig. 9 와 같이 정의하였다.

어안영역의 생성은 개재물 주변에 작용하는 응력의 영향을 받기 때문에 어안의 모양은 응력의 분포에 따라 달라지게 된다. 회전굽힘피로시험은 시험편의 중심에서 표면으로 갈수록 분포하는 응력이 높기 때문에 시험편 표면에 가까운 어안영역의 모서리 부(outer edge of the fish-eye)는 시험편의 중심에 가까운 모서리보다(inner edge of the fish-eye) 더 높은 응력이 작용하게 되며, 높은 응력은 개재물로부터 초기에 생성된 균열의 성장율을 약간 더 빠르게 할 것이다.

응력의 분포와 어안영역 모양과의 관계를 알아보기 위하여 축하중 피로시험과 회전굽힘 피로시험을 수행하고 시험편의 어안의 모양을 비교한 문헌⁽²¹⁾에서는 시험편의 내부에 작용하는 응력의 분포가 비교적 일정한 축하중 피로시험에 비해 회전굽힘피로시험에서 타원 형태의 어안이 높은 비율로 관찰되었다고 하였다.

또한 이 문헌⁽²¹⁾에서는 각각의 실험에 대한 $r_f/2b$ 값을 계산하여 정리하였는데, 축하중 피로시험의 경우 대부분의 어안모양이 개재물을 중심으로 어안 외곽 부분까지의 거리가 일정함을 의미하는 0.5의 평균을 보였으며, 회전굽힘피로시험에서는 평균이 0.6에 가까워 분포하는 응력값이 높을수록 어안모양이 시편표면 쪽으로 더 크게 생성함을 보였다.

쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 있을 경우, $2a/2b$ 값이 1보다 큰 타원 형태의 어안영역 생성에 영향을 주었다고 하였다.⁽²²⁾

즉, 회전굽힘피로시험에서 표면처리가 전혀 없을 경우, 굽힘응력구배의 영향으로 응력이 높은 부분을 따라 어안이 더 크게 형성되고 $2a/2b$ 가 1이하인 타원형태의 어안모양이 생성되어야 한다. 하지만 열처리 혹은 쇼트피닝에 의해 표면층이 강화된 시험편에서는 압축잔류응력에 의해 굽힘인장

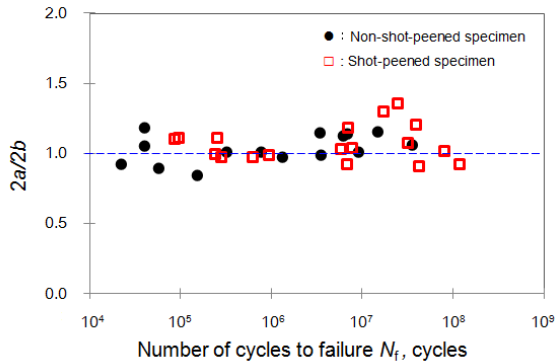


Fig. 10 Relationship between $2a/2b$ and N_f

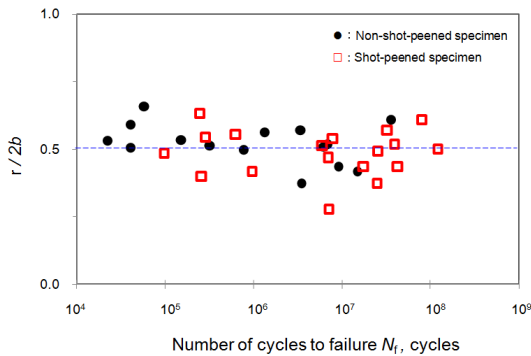


Fig. 11 Relationship between $r/2b$ and N_f

응력이 상쇄되어 $2a/2b$ 값이 1 에 근사한 원에 가까운 형태를 보이거나, 표면층 부근에서의 어안 생성이 방해를 받아 $2a/2b$ 가 1 이상의 타원 형태 어안이 생성되는 것이다.

Fig. 10 에서 대부분의 $2a/2b$ 값은 수명과 상관없이 거의 1 에 근접함을 보여 응력구배와 압축잔류응력의 영향이 서로 균형을 이룬 결과로 사료된다.

Fig. 11 은 쇼트피닝 처리재의 $r/2b$ 값이 0.5 이상인 비율이 44%로 쇼트피닝 미처리재의 결과인 73%에 비해 크게 줄어들었음을 보여주는 결과로, 시험편의 표면 방향으로 갈수록 높게 분포하는 응력 대안 압축잔류응력의 응력상쇄효과가 상당히 컸음을 알 수 있다.

표면으로부터 개재물의 깊이와 어안영역 면적과의 관계를 나타낸 Fig. 12 에서는 쇼트피닝 처리재와 미처리재 모두 개재물의 깊이가 깊을수록 어안영역의 면적이 증가하였으며, 쇼트피닝 처리재가 미처리재에 비해 어안영역의 유효최소면적이 쇼트피닝의 효과로 인해 더 커졌다. 즉, 쇼트피닝이 어안 유효 면적을 크게 하였으며, 이는 초기균열 생성을 억제한 것을 의미한다.

Fig. 13 은 어안영역 면적의 크기와 응력레벨과의 관계를 나타내며, 각 응력레벨에서 쇼트피닝

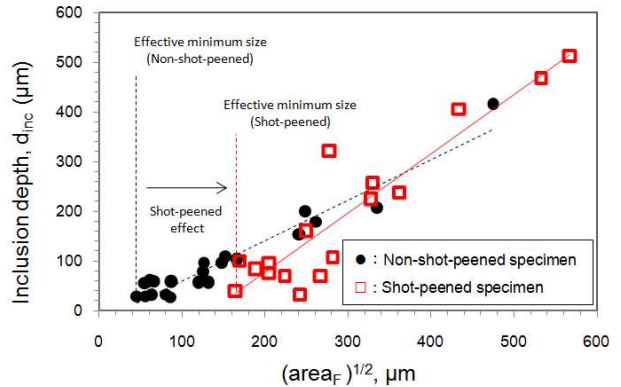


Fig. 12 Relationship between d_{inc} and fish-eye size

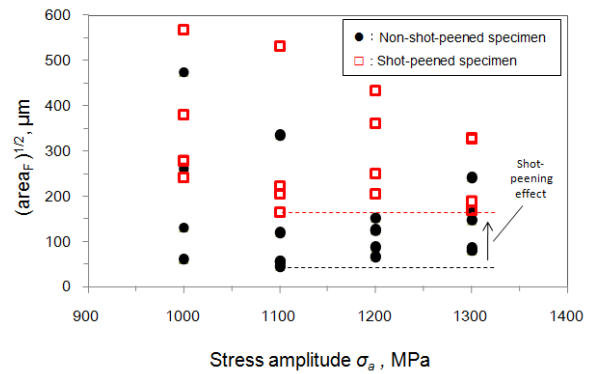


Fig. 13 Relationship between fish-eye size and stress amplitude

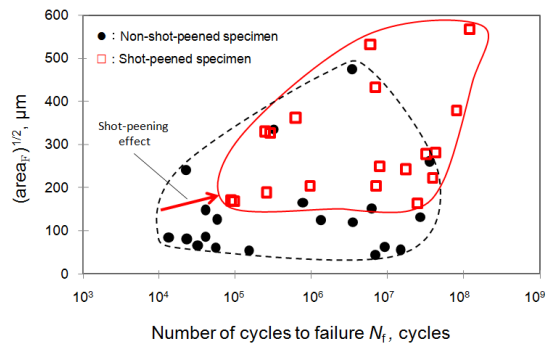


Fig. 14 Relationship between fish-eye size and N_f

처리재의 어안영역 영역의 크기는 미처리재에 비해 증가하였다. 하지만, 어안영역 면적의 최대크기는 응력레벨이 커질수록 급감하여 큰 어안영역의 생성 없이 피로균열이 진전되었던 것이다.

어안영역 면적의 크기와 베어링 강 수명과 관계를 나타낸 Fig. 14 에서는 쇼트피닝 처리재가 미처리재에 비해 어안영역 면적의 크기와 함께 시험편의 수명이 증가하는 경향을 보였다.

Murakami 는 재료의 표면 및 내부 결함에 대한 예측피로한도값 σ_w 을 아래의 식 (2), (3)과 같은

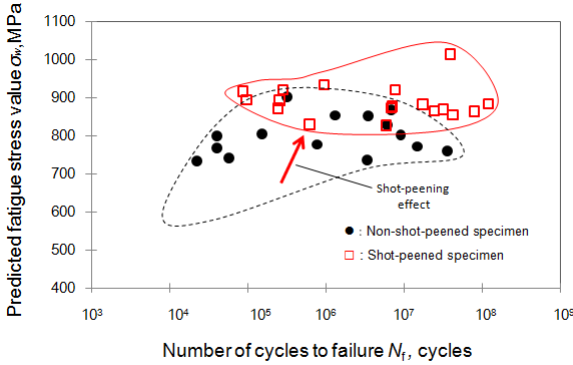


Fig. 15 Relationship between σ_w and N_f

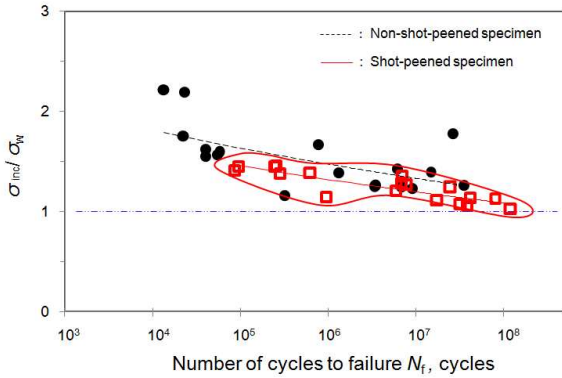


Fig. 16 Relationship between σ_{inc}/σ_w and N_f

식으로 제안하고, 결합부에 걸리는 공칭응력 σ_{inc} 가 예측피로한도 σ_w 를 넘어설 때, 즉 σ_{inc}/σ_w 값이 1 이상일 때 그 부분은 파단기점이 된다고 제안하였다.⁽³⁾

[Small surface defects, small surface cracks]

$$\sigma_w \cong 1.43(Hv + 120)/(\sqrt{area_s})^{1/6} \quad (2)$$

[Internal cracks, defects and inclusions]

$$\sigma_w \cong 1.56(Hv + 120)/(\sqrt{area_i})^{1/6} \quad (3)$$

여기서,

$$\sqrt{area} = \sqrt{\text{개재물의장축} \times \text{개재물의단축} \times \frac{1}{4} \times \pi} \text{ 으로}$$

각 시편마다 측정하여 입력하였으며, 쇼트피닝 미처리재는 14~40 μm , 처리재는 11~40 μm 사이에 값이 분포하였다.

Fig. 15 는 Murakami 가 제안한 예측식 (2)와 (3) 을 통해 구한 각 시편에서의 σ_w 와 피로수명과의

관계를 나타낸다. 피로균열의 기점이 되는 개재물의 크기는 불규칙하게 분포하였으나 개재물의 크기와 시험편의 경도 값에 따라 σ_w 값이 달라졌다. 쇼트피닝 처리재는 시험편 표면의 경도가 높아 σ_w 는 전반적으로 높은 값을 보였으며 평균 888MPa 로 미처리재의 759MPa 에 비해 약 15% 더 컸다.

Fig. 16 은 σ_{inc}/σ_w 와 피로수명과의 관계를 나타낸다. 결합부의 공칭응력은 식 (1)을 통해 계산되었으며 이때 c 는 시험편 중심축으로부터 결합부 중심까지의 거리 값을 대입하였다.

Fig. 16 에서 모든 시험편은 1 이상의 σ_{inc}/σ_w 값을 보여 예측피로한도 이상의 공칭응력이 결합부에 반복적으로 작용하여 피로파괴가 발생했음을 확인할 수 있다. 각 시험편들의 σ_{inc}/σ_w 평균값은 쇼트피닝 처리재가 1.25 로 쇼트피닝 미처리재 1.54 에 비해 약 19% 정도 작아졌고, 쇼트피닝 처리재의 경우 쇼트피닝 미처리재에 비해 σ_{inc}/σ_w 데이터 값이 추세선 주위에 밀집되어 분산성이 낮아졌다. 이것은 Fig. 12 에서 확인되었던 것처럼 쇼트피닝 처리재에서 피로파괴의 기원이 되는 내부 개재물의 위치가 쇼트피닝 효과로 인해 미처리재에 비해 상대적으로 깊어지면서 개재물에 작용하는 공칭응력이 작아졌고 또한 표면층 경도가 커져 파괴시작에 대한 저항성이 상대적으로 커졌기 때문으로 사료된다.

또한, 쇼트피닝 처리재와 미처리재 모두 수명이 증가할수록 σ_{inc}/σ_w 비가 작아지는 경향을 보였다. 이는 피로수명이 긴 시험편의 경우 균열이 시작된 개재물의 깊이가 깊었고, 이에 따라 개재물에 걸리는 공칭응력 값이 작아졌음을 의미하며, 보다 작은 공칭응력값이 fish-eye 주변부에 오랜 시간 동안 반복되면서 fish-eye 의 크기도 Fig. 12 와 같이 그만큼 더욱 성장하였던 것이다.

시험편의 경도와 수명과의 관계를 고려해보았을 때, 금속은 표면경도 값이 증가할 수록 피로수명이 증가하는데, 이것은 경도가 높은 재료에서 소성흐름(plastic flow)이 경화층(hard layer)에 방해받지 않아 고응력이 작용하지 않을 경우에는 슬립(slip) 형성이 억제되어 그만큼 균열의 생성 및 전파가 지연되기 때문이다.⁽²³⁾

쇼트피닝 처리재 및 미처리재에 대하여 측정된 경도값과 Fig. 5 에서의 피로수명데이터를 살펴보면 쇼트피닝 처리에 의해 표면경도가 증가한 쇼트

Table 2 Coefficients b and K of Eqn. 10 calculated to obtain P-S-N curve in non-shot-peened bearing steel specimen

Probability of failure (Non-shot-peened specimen)	b	Log(K)
P = 50%		-118.91
P = 10%	37.04	-117.45
P = 1%		-116.34

Table 3 Coefficients b and K of Eqn. 10 calculated to obtain P-S-N curve in shot-peened bearing steel specimen

Probability of failure (Non-shot-peened specimen)	b	Log(K)
P = 50%		-89.52
P = 10%	27.03	-88.71
P = 1%		-88.17

Table 4 Sum of squared error(SSE) values between fatigue life results and P-S-N curve

	Non-shot-peened specimen	Shot-peened specimen
Sum of squared error(SSE) value	14.86	4.78

일치한다는 문헌⁽¹⁹⁾의 연구결과를 참고하여 최우추정법(maximum likelihood method, M.L.M)을 이용한 2모수 와이블 분포를 구하여 추정하였다.

재료의 응력-수명 (S-N) 선도는 식 (4)와 같은 대수방정식(logarithmic equation)으로 나타낼 수 있다.

$$\log x_{Ai} = -b \log S_i - \log K \quad (4)$$

여기서, S_i 와 x_{Ai} 는 각각 i 번째 응력레벨에서의 하중값과 허용수명을 의미하고 K 와 b 는 재료 계수를 나타낸다.

Table 2 과 Table 3 은 각각 쇼트피닝 미처리재 및 처리재의 실험 결과(S_i, x_{Ai})를 기반으로 식 (4)를 이용하여 구한 계수들(K, b)의 결과를 나타낸다. 계수 b 는 P-S-N 곡선의 기울기를 나타내며 쇼트피닝 처리재의 b 값이 미처리재보다 더 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 17 의 (a)와 (b)는 각각 쇼트피닝 미처리재와 처리재의 확률-응력-수명 곡선을 나타낸다. 쇼트피닝 처리재의 확률-응력-수명 곡선을 나타낸 Fig. 17 의 (b)에서 파손확률 1%, 10%, 50%에 따른 곡선은 미처리재의 결과를 나타낸 (a)의 경우보다 그 응력수준이 훨씬 개선되었고 동일응력에서 수명은 평균 6.9 배로 증가하였으며, 수명데이터의 분산도는 훨씬 좁게 분포했다. 또한 Table 2 와 Table 3 에서 알 수 있던 것처럼 쇼트피닝 처리재는 미처리재보다 더 작은 b 값을 가지고 있어 확률수명에 대한 응력의 기울기가 더 크게 나타나는데, 이 결과로부터 쇼트피닝 처리재는 피로하중저하에 따른 수명 사이클 수의 증가가 상대적으로 감소하였으며, 고하중 영역에 비해 피로하중이 낮아질수록 쇼트피닝의 효과는 다소 줄어드는 것을 알 수 있다. 확률수명계산에 의한 위의 결과는 Shiozawa 등⁽¹¹⁾의 결과와 유사하다. Shiozawa 등⁽¹¹⁾은 쇼트피닝 처리된 베어링강의 피로수명이 증가할수록 쇼트피닝 효과가 줄어들어 피로한도 이상의 수명 영역에서는 오히려 쇼트피닝 처리재의 피로수명이

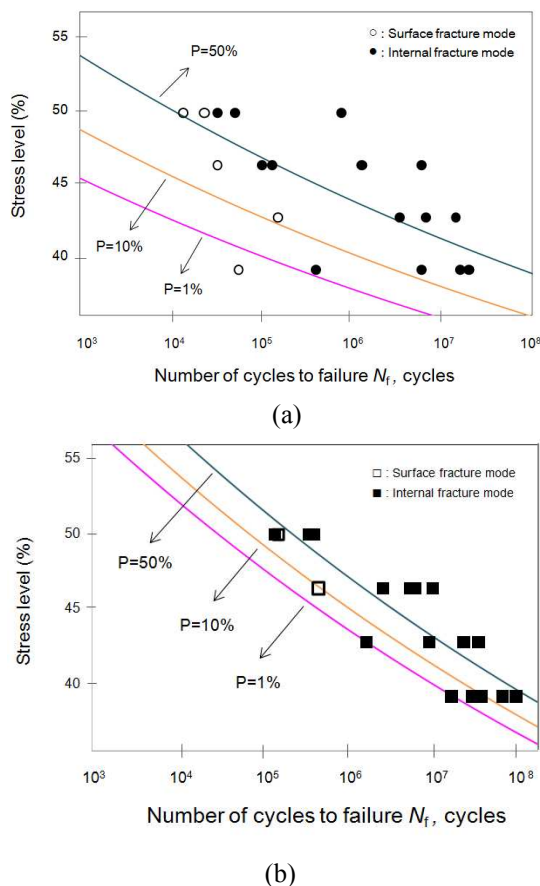


Fig. 17 Probability-stress-life (P-S-N) curves : (a) non-shot-peened specimen, (b) shot-peened specimen

미처리재에 비해 감소한 실험결과를 보고하였다. 이것은 시험편의 피로수명이 증가할수록 피로파괴의 기점에 해당하는 개재물의 깊이가 깊어지는데, 파괴기점 개재물이 잔류응력층보다 깊은 곳에서 균열을 발생시켜 저하중 고수명영역의 경우에는 쇼트피닝의 효과를 기대할 수 없기 때문이라고 하였다. 베어링강의 피로 시험값과 예측된 확률-응력-수명 곡선과의 분산정도를 잔차제곱합(sum of squared error, SSE)⁽²⁵⁾을 통해 다음 식

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\log x_i - \log x)^2 \quad (5)$$

으로 평가하였으며 그 결과는 Table 4 와 같다. 여기서 x_i 는 각 피로수명 시험값, x 는 식 (4)에서 확률 50%의 수명값이다. 식 (4)에서 쇼트피닝 처리재의 피로시험 결과는 미처리재 결과에 약 32%의 잔차 제곱합을 보여 피로수명 값의 분산성이 획기적으로 적어져 쇼트피닝 처리가 피로수명예측의 신뢰성을 크게 높이는 것으로 나타났다.

4. 결 론

기계구조물의 동력 전달부에 사용되는 고강도강인 베어링강(JIS-SUJ2)을 선택하고 쇼트피닝 표면 처리하여 회전굽힘피로시험을 수행하였다. 피로시험 및 수명평가를 통해 쇼트피닝이 고강도강의 피로수명에 미치는 영향에 대해 분석하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 쇼트피닝 미처리재와 처리재에 대해 초기균열의 시작위치에 따라 피로-수명 거동이 달라졌으며, 균열이 내부로부터 전파되어 파단된 (internal fracture) 시편이 표면에서 시작되어 파단(surface fracture) 된 시편보다 더 긴 피로수명을 보였다.

(2) 쇼트피닝 처리재는 미처리재에 비해 피로수명이 향상되었으며 피로시험데이터의 분산이 적어졌다. 또한 피로파괴가 표면으로부터 시작될 확률이 상대적으로 적어졌으며 이는 쇼트피닝 가공에 의해 생긴 표면부의 압축잔류응력층의 효과에 의거한다.

(3) 피로파괴 된 시편들의 파단부에 대하여 EDX 성분분석을 수행하였으며 표면균열시작부에는 탄소가, 내부균열 개재물에서는 알루미늄이 다량 분포하여 응력집중원으로 작용했음을 알았다.

(4) 쇼트피닝이 베어링강의 피로거동에 미치는 영향에 대하여 정량적인 평가를 수행하였다. 대부

분의 어안 파면의 형태는 원에 가까웠으며 쇼트피닝 처리재의 수명, 어안영역의 면적 및 균열 시작 개재물 깊이가 미처리재에 비해 증가한 결과를 보여 이를 통해 쇼트피닝의 효과를 확인할 수 있었다.

(5) 최우추정법으로 계산된 2 모수 와이블 분포를 이용하여 쇼트피닝 미처리 및 처리 베어링강 대한 P-S-N 곡선을 제시하였다. 파괴확률 1%, 10%, 50%에 대한 피로수명특성을 정량적으로 나타내었다. 쇼트피닝 처리재의 피로시험결과는 미처리재에 비해 평균 수명이 약 6.9 배로 증가하였고 분산성은 약 32%로 작아졌다. 하중감소에 따른 수명 사이클 수는 감소하여 피로하중이 낮을수록 쇼트피닝 효과에 의한 수명 개선의 정도는 작아졌다.

참고문헌

- (1) First International Conference Held as "Fatigue Life in the Gigacycle Regime," 1998 in Paris. The Second : "Fatigue in the very High Cycle Regime," 2001 in Vienna, the Third : "Very High Cycle Fatigue (VHCF-3)," 2004 in Kyoto
- (2) Murakami, Y., Kodama, S. and Konuma, S., 1989, "Quantitative Evaluation of Effects of Non-Metallic Inclusions on Fatigue Strength of High Strength Steels," *International Journal of Fatigue*, Vol. 11, Issue 5, pp. 291~298.
- (3) Murakami, Y., 2002, "Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions," Elsevier Science Ltd. UK.
- (4) Nishijima, S. and Kanazawa, K., 1999, "Stepwise S-N Curve and Fish-Eye Failure in Gigacycle Fatigue," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*, Vol. 22, Issue 7, pp. 601~607.
- (5) Shiozawa, K., Morii, Y., Nishino, S. and Lu, L., 2010, "Subsurface Crack Initiation and Propagation Mechanism in High-Strength Steel in a very High Cycle Fatigue Regime," *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, Issue 11, pp. 1521~1532.
- (6) Sakai, T., Lian, B., Takeda, M., Shiozawa, L., Oguma, N., Ochi, Y., M Nakajima, and Nakamura, T., 2010, "Statistical Duplex S-N Characteristics of High Carbon Chromium Bearing Steel in Rotating Bending in very High Cycle Regime," *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, Issue 8-9, pp. 765~773.
- (7) Atkinson, H. V. and Shi, G., 2003, "Characterization of Inclusions in Clean Steels : A Review Including the Statistics of Extremes Methods," *Progress in Materials Science*, Vol. 48, Issue 5, pp. 457~520.
- (8) Furuya, Y., Matsuoka, S., Abe, T. and Yamaguchi, K.,

- 2002, "Gigacycle Fatigue Properties for High-Strength Low-Alloy Steel at 100 Hz, 600 Hz, and 20 kHz," *Scripta Materialia*, Vol. 46, Issue 2, pp. 157~162.
- (9) Tokaji, K., Itoga, H., Nakajima, M. and Ko, H. N., 2003, "Effect of Surface Roughness on Step-Wise S-N Characteristics in High Strength Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, Issue 5, pp. 379~385.
- (10) Xenophon, J.K., 1989, "Shot Peening Viable Method to Extending Component Life" SAE Technical Paper Series 891932, pp. 1~8
- (11) Shiozawa, K. and Lu, L., 2002, "Very High-Cycle Fatigue Behaviour of Shot-Peened High-Carbon-Chromium Bearing Steel," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*, Vol. 25, Issue 8-9, pp.813~822.
- (12) Lee, T.S., Jang, J.H., Suh, C.M., Kim, J.H. and Kim, S.C., 2007, "Fatigue Characteristics of Bearing Steel n Giga Cycles" *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 10, pp. 165~169.
- (13) Cheng, S.-K., Lee, S.-H. and Chung, S.-C., 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.
- (14) Kim, H.S. and Lee, S.H., 1998, "The Stress Distribution and Improvement of Fatigue Strength for Notched Materials by Shot Peening," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 7, No. 5, pp. 120~126.
- (15) JIS Z 2274, "Method of Rotating Bending Fatigue Testing of Metals."
- (16) ASTM, 1994, "Standard Test Method for Determining The Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress.," ASTM E 1426-94, pp.932~935
- (17) KS B ISO 1143, "Metallic Materials - Rotating bar Bending Fatigue Testing."
- (18) Shiozawa, K. and Lu, L., 2002, "Very High-Cycle Fatigue Behaviour of Shot-Peened High-Carbon-Chromium Bearing Steel," *Fatigue&Fracture of Engineering Materials & Structure*, Vol. 25, Issue 8~9, pp.813~822.
- (19) Li, W., Sakai, T., Li, Q., Lu, L.T. and Wang, P., 2010, "Reliability Evaluation on very High Cycle Fatigue Property of GCr15 Bearing Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, Issue 7, pp.1096~1107.
- (20) Ravichandran, K.S., Ritchie, R.O. and Murakami, Y., 1999, "Small Fatigue Cracks : Mechanics, Mechanisms and Applications," Elsevier
- (21) Sakai, T., Sato, Y. and Oguma, N., 2002, "Characteristic S-N Properties of High-Carbon-Chromium-Bearing Steel Under Axial Loading in Long-Life Fatigue," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 25, Issue 8-9, pp. 765~773.
- (22) Murakami, Y., Takada, M. and Toriyama, T., 1998, "Super-Long Life Tension-Compression Fatigue Properties of Quenched and Tempered 0.46% Carbon Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, Issue 9, pp. 661~667.
- (23) Çelik, A. and Karadeniz, S., 1995, "Improvement of the Fatigue Strength of AISI 4140 Steel by an Ion Nitriding Process," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 72, Issue 3, pp. 169~173.
- (24) Jung, D.W. and Choi, N.S., 2010, "Evaluation of Statistical Fatigue Life of Hybrid Composite Joints in Low-Floor Bus," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 11, pp. 1705~1714.
- (25) Park, D.C., 2001, "Electrical Engineering Probability," *Intervision*, Korea.