한국해양공학회 2004년도 춘계학술대회 논문집 PP.370~375

베어링강의 기가사이클 피로 특성에 관한 연구

김상천* · 서창민** · 황병원** · 이태성**
*경북대학교 기계공학부 대학원
**경북대학교 기계공학부

Fatigue Characteristic of Bearing Steel(STB2) in Gigacycle

SANG-CHUN KIM*, CHANG-MIN SUH** BYUNG-WON HWANG** AND TAE-SUNG LEE**
*Graduate School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Unicersity, Daegu, Korea
**School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Unicersity, Daegu, Korea

KEY WORDS: Gigacycle Fatigue 기가사이클피로, Rotational Bending Fatigue Test 회전굽힘피로시험, Shot Peening 쇼트피닝, Fatigue Characteristic 피로특성, Fish-eye Crack 어안균열

ABSTRACT: *Fatigue tests were carried out to find the fatigue characteristics in the super-long life range by using a cantilever type rotational bending fatigue test machine. Three kinds of specimen in bearing steels with the quenched and tempered in air (A and B, B: shot peened after heat treatment) and under vacuum conditions(C:non-shot peened)were tested in this study. S-N curves obtained from fatigue tests of C specimen tend to come down again in the super-long life range due to fish-eye type cracking, while most of A and B specimens fractured by surface defects such as scratches and slip lines. This duplex S-N behavior for the high strength steels have to be reviewed by the change of fracture modes*

1. 서 론

최근 산업의 발달에 따라 베어링강의 피로강도와 피로수명의 향상과 그 안정성과 신뢰성, 무한 수명으로의 요구가 증대되어 종래의 설계 수명을 넘어서 기계나 구조물을 사용할 수 있도록 수명 연장 공학이 대두되는 추세이다(T. Sakai 등, 2000). 이에 기가사이클영역($N>10^7$)에서 구조물 요소의 피로특성을 조사하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 자동차를 비롯한 각종 기계장치의 동력 전달부에 많이 사용되고 있는 베어링강과 동재질의 쇼트피닝(shot peening)처리를 하여 기가사이클(10^9 cycle) 피로특성을 평가하고 피로 크랙의 발생을 연구하였다.

2. 실험 방법 및 해석 모델

2.1 시험편

2.1.1 시험편 재료

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 자동차를 비롯하여 각종 기계나 구동장치의 동력전달 부위에 많이 사용되고 있는 고강도 베어링강 (STB2)재로써 화학적 조성은 Table 1과 같다.

2.1.1 피로시험편

시험편의 최소 직경 ϕ3mm, 라운딩된 부분의 곡률 반경 7mm, 전체 길이 100mm인 피로 시험편을 Fig. 1과 같이 제작하였다. 시험편은 열처리 후 탈탄, 산화층을 제거하기 위하여 0.1mm정도의 가공 여유를 두어 가공하였고, 열처리 후 최소 직경부를 연마지(emery paper)를 이용하여 #2000까지 연마한 후, 산화크롬(Cr_2O_3)으로 버핑한 다음 초음파 세척기를 사용하여 표면에 존재하는 이물질을 제거한 후 피로시험을 실시하였다.

제1저자 김상천 연락처: 대구광역시 경북대학교 대학원 #1370
053-941-6106 chun1194@korea.com

Table 1 Chemical composition of STB2 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
1.04	0.25	0.39	0.015	0.005	0.19	0.07	1.47	0.004

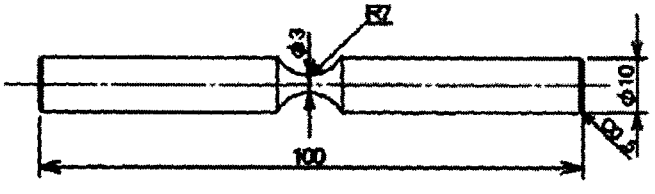


Fig. 1 Configuration of fatigue specimen(unit : mm)

2.2 시험편의 열처리와 쇼트피닝 처리

2.2.1 시험편의 열처리

시험편의 기계적 성질을 얻기 위해서 Fig. 2와 같은 열처리 사이클을 이용하였다. 835℃까지 서서히 가열하여 40분 동안 유지한 후 80℃의 오일(oil)에서 담금질(quenching)시켰다. 그 후에 오일 담금질(oil quenching)한 재료에 인성을 부여하고 내부응

력을 제거하기 위하여 180℃에서 40분 동안 뜨임(tempering)한 후 공냉하였다(Sae-Kyoo Oh 등 1989).

이때 진공 상태로 처리한 경우는 C재라 칭하고(H_v≒752), 공기중에서 가열한 경우는(H_v≒710) A재라 칭하며, 표면의 탈탄이 생겨서 쇼트피닝 시킨 시험편을 B재(H_v≒710)라 칭한다.

2.2.2 쇼트피닝(shot peening) 처리

시험편 표면에 압축잔류응력을 유도시키기 위하여 Fig. 3과 같이 제작한 장치로 쇼트피닝하였다. 강구는 주강을 사용하여 압축공기 분사방식(compressible air injection type)으로 시험편 표면에 충돌시켰다. 강구의 직경은 0.6mm이고, 압력은 평균적으로 0.83MPa이며, 시간은 3분으로 하였다.

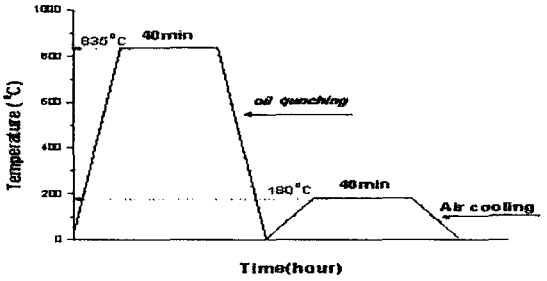


Fig. 2 Heat treatment cycle for quenching and tempering

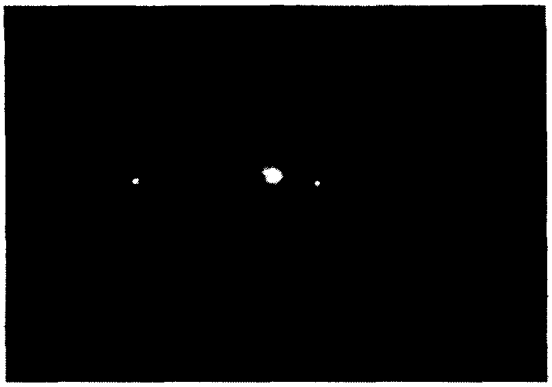


Fig. 3 Photograph of a shot peening system

2.2.3 피로시험 장치

Fig. 4는 본 실험에 사용한 피로시험 장치로써 네 개의 시험편을 동시에 장착할 수 있으며, 하중레벨도 각각 다르게 가할 수 있는 cantilever식 회전 굽힘 피로시험장치이다(T. Sakai 등, 2000). 하중은 시험편 끝부분에 걸리도록 하였으며 시험편 내에서 발생하는 열손상을 피하기 위하여 회전 속도는 3150rpm이다. 그리고 굽힘응력 σ은 아래와 같은 식으로 계산하였다.

$$\sigma = \frac{9.81 \times 32 \times W \times L \times K_t}{\pi d^3} (MPa)$$

W: 하중(kgf)

L: 하중 위치와 시험편의 임계구역 사이의 거리(L=0.0465m)

K_t: 응력 집중 계수(K_t=1.06)

d: 시험편의 임계구역의 지름(m)

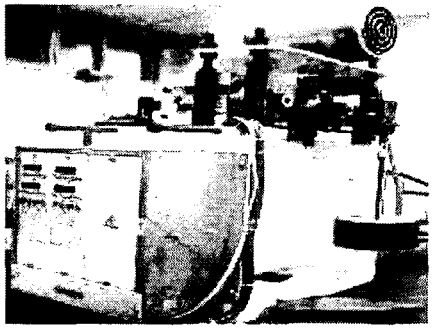


Fig. 4 Multi-type fatigue testing machine

2.3 실험 방법

본 연구에서는 진공 열처리 후 경면 가공한 시험편 C와 대기중 열처리된 A재와 A재의 쇼트피닝 처리한 시험편 B재인 세가지 시험편을 사용하여 피로 거동 분석을 위해 조직 관찰, 경도시험, 피로 시험 및 인장시험을 실시하였고 피로 파단된 시험편 파단면 분석을 위하여 SEM 관찰하였다.

2.3.1 표면 거칠기 및 인장시험

표면 거칠기 시험은 접촉식 표면 거칠기 시험기(Mitutoyo, Surftest-500)를 이용하여 표점거리 0.8mm로 해서 중심선 평균 거칠기(R_a), 최대 높이 거칠기(R_{max})를 각각 10회 측정하여 그 평균치를 구하였다.

인장시험은 유압식 만능재료시험기(MTS 25ton)를 이용하여 1mm/min의 부하속도로 미처리재에 대해서 3회 실시하여 그 값을 평균하였다.

2.3.2 조직 및 피로 파단면 관찰

세 가지 시험편을 절단하여 마운팅(mounting)한 후 조직 관찰을 실시하였다. 연마지로 #2000까지 연마한 후 산화크롬으로 경면가공한 시험편을 3% Nital 부식액으로 에칭(etching)하여 카메라가 부착된 광학금속현미경(Olympus, BX60M)으로 관찰하였다.

피로 파단된 파면을 SEM(Scanning Electron Microscope, Joel, J-5600)과 광학 현미경으로 관찰하였으며 미시적인 균열성장거동의 특징을 분석하고자 하였다.

2.3.3 경도시험

경도시험은 미소경도시험기(Micro Vickers hardness tester, Future-Tech, FM 700e)를 이용하였으며, 시험편 표면으로부터 각각의 깊이에 대해서 10번의 시험 결과를 평균하여 그 깊이에 대한 경도치를 정하였고, 시험기의 압입 하중은 50g으로 부하시간(dwell time)은 30sec로 하였다.

2.3.4 회전 굽힘 피로시험

Cantilever식 회전굽힘 피로시험기(Horkos, U00235)를 사용, 시험편을 장착한 후, 회전수 3150rpm에서 시험을 실시하였다.

회전 굽힘 피로시험 응력비는 R=-1이며 시험온도는 실온이었다. 10^9사이클까지 소요되는 날짜는 약 210일이다.

2.3.5 잔류응력측정

쇼트피닝한 시험편 표면에 발생된 잔류응력을 측정하기 위하여 XRD(X-Ray Diffractometer, Rigaku, MJ200DE)를 이용하여 축방향의 잔류응력을 측정하였다.

2.4 해석 모델

피로시험에서 피로파단된 위치가 시험편의 중앙에 생기지 않고 그립부 측으로 생기는 현상을 규명하기 위하여 유한요소해석(FEA)을 실시하였다. Fig. 5는 시편을 모델링한 것으로 최소 직경 3mm, 라운딩된 부분의 곡률 반경 7mm, 전체 길이 100mm이며 대칭 구조이므로 1/2로 나누어 해석하였다. 저응력/장수명 영역내에서 변형하므로 재료는 탄성체로 가정하였다. 재료의 물성치는 영률 210GPa, 횡탄성계수(shear modulus) 80GPa, 프아송비를 0.3으로 하였다.

Fig. 5 Finite element model of bearing steel specimen

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시험편 표면거칠기

Table 2는 쇼트피닝(SP)처리재와 미처리재에 대한 중심선 평균거칠기(R_a)와 최대높이 거칠기(R_{max})를 10회 측정한 평균값을 나타내고 있다.

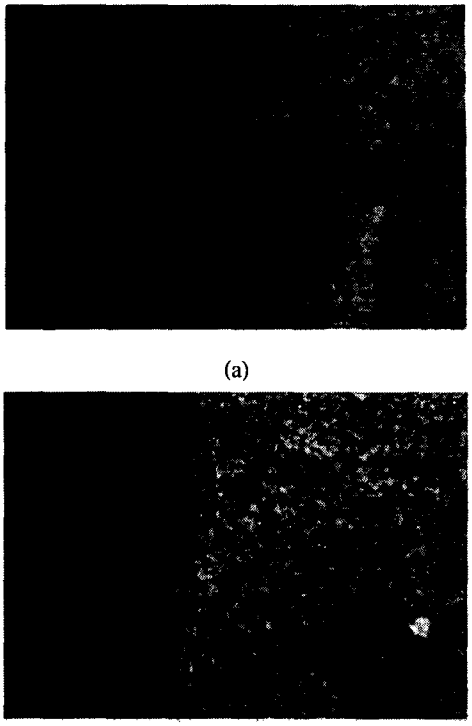
SP처리재의 거칠기가 미처리재에 비해 전반적으로 증가되었는데 이는 강구가 시험편과 부딪히면서 표면층에서의 소성변형의 결과라고 판단된다. 이러한 표면조도는 피로시험 중 저하중/장수명 영역에서의 피로수명에 상당한 영향을 줄 것으로 보고되고 있다(Jong-Gyu Lee 등, 1997).

Table 2 Comparison of surface roughness

specimen	R_a(μm)	R_{max}(μm)
Non-peened specimen	0.04	0.4
Shot-peened specimen	1.95	10.6

3.2 미처리재와 SP처리재의 조직 관찰

Fig. 6는 미처리재와 SP처리재의 내부 조직을 각각 x200으로 확대 촬영한 것이다. 이 조직 사진으로 보아 미처리재와 SP처리재의 내부조직은 거의 같았지만, SP처리재의 경우 쇼트피닝으로 인하여 표면에서 약간의 소성 변형층이 형성된 것으로 보인다.



(a)

(b)

Fig. 6 The microstructure of non-peened and shot-peened specimens near surface. (a), (b) x200

3.3 비커스 경도분포

Fig. 7은 시험편 단면의 경도 분포를 나타낸 것으로 쇼트피닝에 의한 경도 변화가 예상되는 표면은 간격을 좁게 하였으며 내부로 갈수록 일정한 간격으로 측정하였다. 경도가 높은 강종의 경우에는 표면에 쇼트피닝 처리를 하여도 경도상의 변화는 크게 없다고 한다(Chang-Min Suh 등, 2000).

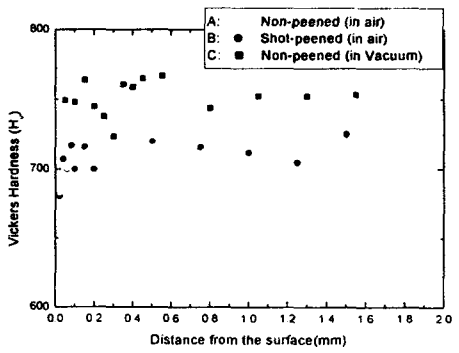


Fig. 7 Distribution of micro Vickers hardness at the cross section

3.4 잔류응력의 영향

Table 3은 미처리재와 SP처리재의 축방향 잔류응력을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 미처리재에 비해서 6.4배의 높은 압축잔류응력이 생성된 것을 알 수 있다.

Table 3 Values of residual stresses measured at the specimen surface by XRD

Specimen	Residual stress at axial direction (MPa)
Non-peened specimen	-78
Shot-peened specimen	-498

3.5 S-N 특성

Fig. 8은 미처리재 A와 C에 대한 쇼트피닝처리재 B의 S-N 선도를 각각 나타낸 것이다. 진공에서 처리된 C재는 대기중에서 처리된 A재보다 10^6사이클에서 약 86% 정도 피로강도가 증가되었고, 10^9사이클에서 약 57%증가하였다. 미처리재 A에 대한 B재는 압축잔류응력의 영향에 의하여 10^6사이클에서는 약 36%정도의 피로강도가 향상되었고, 10^9사이클에서는 약 26% 정도 향상되었다. B재에서 피로강도가 A재보다 향상된 원인은 쇼트피닝처리재의 표면상에 압축잔류응력이 생겼기 때문이며 C재의 경우는 진공에서 열처리했기 때문에 탈탄층이 생기지 않았기 때문이다. 특히 A재에서는 표면에 탈탄층이 형성되었기 때문에 경도도 낮았지만 피로강도도 저하되었다.

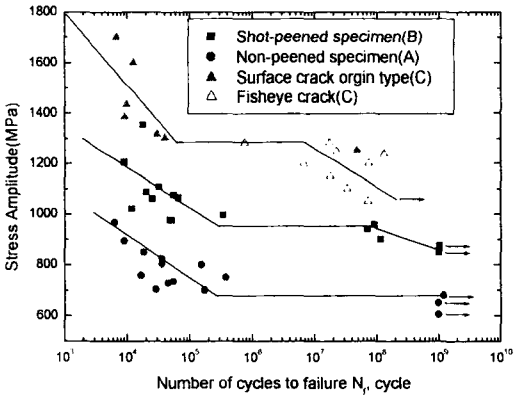


Fig. 8 The S-N curves

3.6 SEM과 EDS에 의한 파단면 분석

Fig. 9는 미처리 A재의 경우로 피로파단면(σ_m=850MPa, N_f=1.85x10^4 cycles)을 x70로 SEM관찰한 사진의 예를 나타낸 것이다. 사진에서 미처리재는 표면에서 피로균열이 발생, 성장하여 파단하는 전형적인 거동을 보이고 있다. 화살표시된 경우도 표면상에서 피로균열이 발생, 성장하는 전형적인 피로파괴 형태의 경우로 이때는 경면 가공된 표면이지만 고하중에 의하여 생기는 표면요철에서 생긴 표면피로균열의 경우이다.

Fig. 10 (a)와 (b)는 C재의 장수명 영역에서의 피로파면 사진으로 각각 ×100, ×300배로 확대된 것으로 고강도 금속의 피로파단 양식인 fisheye crack을 관찰할 수 있다. 고강도재 또는 표면경화처리된 시험편에 대해 저응력/장수명영역으로 회전굽힘피로시험을 행할 경우에 표면에 형성된 압축잔류응력이 시험편 표면에 적용되는 실제응력을 낮추게 된다. 이러한 효과가 균열의 발생 및 진전의 원인이 되는 전위의 이동을 방해하는 작용을 하므로, 피로균열의 발생은 표면에서 형성되지 못하고 내부의 게재물에서 형성되어 느린 속도로 진전하면서 fisheye crack을 만든다(Y. Murakami 등, 1999). Fig. 10 (b) 상의 중심부를 EDS로 성분을 분석한 즉, 중량비로 Fe가 59.6%, Cr 화합물이 40.4% 임을 알 수 있었다.

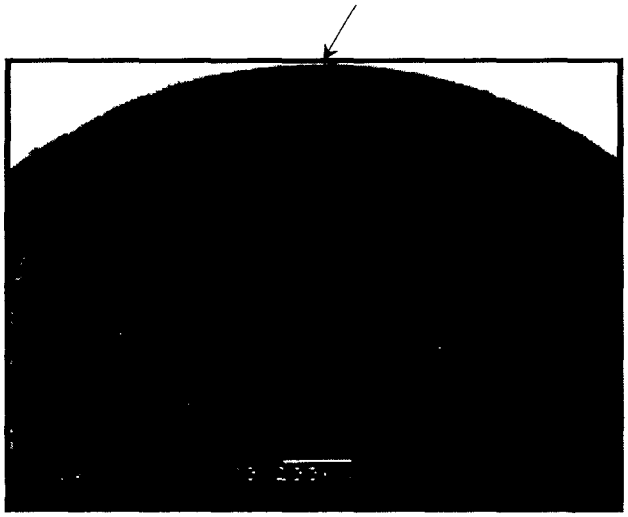
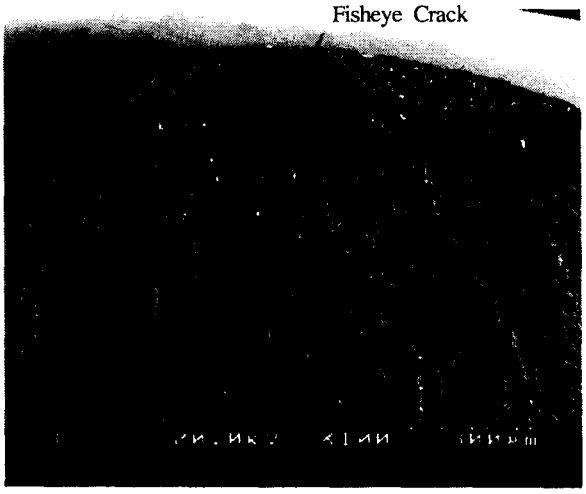


Fig. 9 SEM photograph shown a surface origin crack at fracture surface for non-peening specimens under σ_m=850MPa, N_f=1.85x10^4 cycles at the magnification of x70



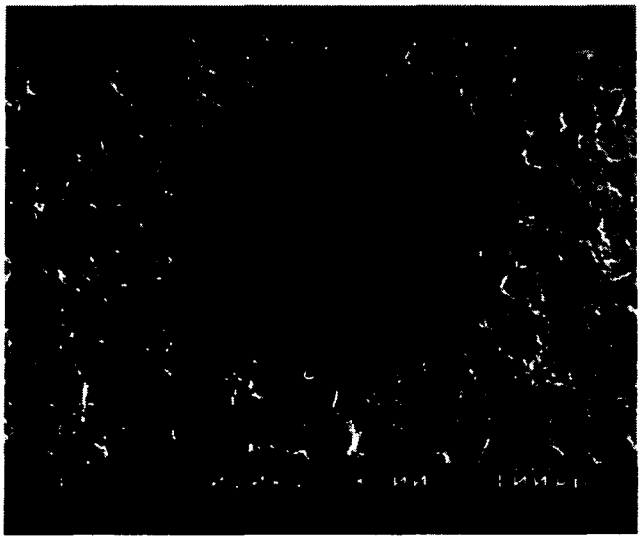


Fig. 10 SEM photograph shown a fisheye crack at fracture surface for Non-peening specimens under σ_m=1200MPa, N_f=7.34x10^7 cycles at the magnification of (a) x100, (b) x300

3.7 시험편에 발생하는 응력분포의 FEA결과

실험편의 피로한도에 해당하는 630MPa의 절반인 365MPa의 굽힘응력을 가하여 해석한 결과 최대굽힘응력은 피로한도의 1.6배인 584MPa로 나타났다. 또한 Fig. 11에서 보이는 바와 같이 실제 시험편의 파단부와 FEM 해석결과에서의 응력 집중부가 일치함을 알 수 있었다.

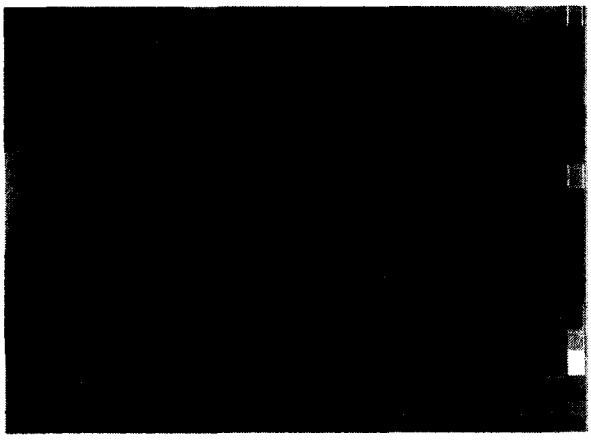


Fig. 11 Photo of FE Analysis (Von-mises stress)

4. 결 론

본 논문에서는 베어링강(STB2)을 사용하여 저응력/기가사이클 피로(giga cycle fatigue : 10^9)시험을 실시하면서 진공 및 대기 중 열처리재의 압축잔류응력의 영향을 검토하기 위하여 미처리재와 쇼트피닝(SP)처리재를 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 진공에서 처리된 C재는 대기중에서 처리된 A재보다 10^6사이클에서 약 86% 정도 피로강도가 증가되었고, 10^9사이클에서 약 57%증가하였다. 미처리재 A에 대한 B재는 압축잔류응력의 영향에 의하여 10^6사이클에서는 약 36%정도의 피로강도가 향상되었고, 10^9사이클에서는 약 26% 정도 향상되었다. B재에서 피로강도가 A재보다 향상된 원인은 쇼트피닝처리재의 표면상에 압축잔류응력이 생겼기 때문이며 C재의 경우는 진공에서 열처리했기 때문에 탈탄층이 생기지 않았기 때문이다. 특히 A재에서는 표면에 탈탄층이 형성되었기 때문에 경도도 낮았지만 피로강도도 저하되었다.

(2) SEM을 통한 피로파단면을 분석 한 결과, 미처리 A재 및 SP처리재는 표면균열의 발생과 성장에 의한 피로파괴 형태를 나타내었고, 진공처리된 C재는 저응력/장수명 영역에서는 내부균열의 발생과 성장에 의한 형태인 fisheye crack이 내부 게재물에서 발생하였다. 이 게재물의 주성분은 Al 혹은 Cr인 것으로 EDS로 분석되었다.

참 고 문 헌

(1) T. Sakai, M. Takeda, K. Shiozawa, Y. Ochi, M. Nakajima, T. Nakamura, N. Oguam, 2000 "Experimental reconfirmation of characteristic S-N property for high cabon chromium bearing steel in wide life region in rotating bending", J. Soc. Mat. Sci., Japan, 49, 779.

(2) Q. Y. Wang, Y. Berard, A. Dubarre, G. Baudry, S. Rathery, and Bathias, C., 1999 "Gigacycle fatigue of ferrous alloys", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struc. 22, 667.

(3) Y. Murakami, T. Nomoto, and T. Ueda, 1999 "Factors influencing the mechanism of superlong fatigue in steel", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22, 581.

(4) S. Nishijima, and K. Kanazawa, 1999 "Stepwise S-N curve and fish-eye failure in gigacycle fatigue", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 22, 601.

(5) Q. Y. Wang, C. Bathias, N. Kawagoishi, Q. Chen, 2002 "Effect of inclusion on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength", Int. J. of Fatigue, 24, pp. 1269~1274.

(6) Yukitaka Murakami, Masayuki Takada and Toshiyuki Toriyama, 1998 "Super-long life tension-compression fatigue properties of quenched and tempered 0.46% carbon steel", Int. J. Fatigue Vol. 16, No. 9, pp.661~667.

(7) Jong-Gyu Lee, Jung-Kyu Kim, 1997 "Influence of

Residual Stress Due to Shot Peening on Fatigue Strength and Life" KSME International Journal(A), 21-9, pp.1498~1506.

(8) Sae-Kyoo Oh, Yeon-Ho Kim, Sang-Guk Lee, Jong-Doo Lee, 1989 "Effect of Heat Treatment on High Temperature Fatigue Strength Characteristics of STB2 Bearing Steel", The Korean Committee for Ocean Resources of Engineering Journal 3-2, pp.638~644.

(9) Chang-Min Suh, Jong-Hyun Ha, Chang-Hee Suh, 2000 "Improvement of Fatigue Strength and Characteristic of Fatigue Crack of Nitrided 1Cr-1Mo-0.25V Turbine Rotor Steels", KSME International Journal, pp.181~186.