한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 45, No. 6, 2012.
http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2012.45.6.226

<연구논문>

풍력발전시스템의 주 베어링용 0.18C-3.5Ni-1.5Cr-0.2Mo강의 침탄 표면특성

최병영[a*], 구윤식[b]

[a]전북대학교 신소재공학부 및 신소재개발연구센터, [b]전북대학교 대학원 금속공학과

Characteristics of Carburized Surface Layers in 0.18C-3.5Ni-1.5Cr-0.2Mo Steels for Main Shaft Bearings of Wind Turbines

Byung-Young Choi[a*], Yoon-Sik Gu[b]

[a]School of Advanced Materials Engineering and Research Institute of Advanced Materials Development, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea
[b]Graduate School of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

(Received November 20, 2012 ; revised December 14, 2012 ; accepted December 30, 2012)

Abstract

Characteristics of carburized surface layers in 0.18C-3.5Ni-1.5Cr-0.2Mo steels for main shaft bearings of wind turbines have been analyzed and evaluated before and after rolling contact fatigue tests. Mixed microstructure consisting of retained austenite and tempered martensite has been formed with compressive residual stresses in the surface hardened layers of the specimens showing uniform hardness distribution with value about Hv700 after vacuum carburizing and tempering. It has been found on the raceway of the layers of the specimens after rolling contact fatigue tests that the amount of retained austenite decreased and compressive residual stresses increased, resulting from cyclic contact stresses applied during the tests. It has been also revealed that higher durability of the bearings can be obtained through controlling the amount of the retained austenite in the surface of the bearing steels to be lower in this study.

Keywords : 0.18C-3.5Ni-1.5Cr-0.2Mo steels, Surface hardened layer, Retained austenite, Cyclic contact stresses, Durability

1. 서 론

최근 해상 및 육상에 설치되는 풍력발전기의 주종이 되고 있는 1.5~3.0 MW급 대형 풍력 발전시스템의 핵심부품을 국산화할 필요성이 증대되고 있다. 그 중 주 베어링(main shaft bearings)은 대형 베어링의 일종이며 중·소형 베어링에 비해 대부분 수입에 의존하고 있어 부품의 적시 공급이 되지 않는 문제점이 야기되므로 시급히 국내개발이 요구되고 있다. 해상 및 육상에서 불어오는 바람으로 인해 블레이드(blades)가 회전함에 따라 주 베어링에 하중이 가해져 풍력발전시스템이 작동될 때 주 베어링이 파손될 경우 작동을 멈추고 베어링을 교체하게 된다. 따라서 높은 내구성을 가진 베어링 소재를 만들어 사용해야 하며 전동체(rolling elements)와 내·외륜(inner and outer races)의 회전접촉표면에 반복적으로 가해지는 하중에 따라 일어나는 피로거동의 특성을 평가하는 것이 선결과제이다.

특히 주 베어링의 내·외륜의 내구성을 높이려면 작동 중에 전동체에 접촉하는 궤도면에 윤활막이 형성되어 탄성유체윤활조건이 유지되도록 하고 궤도면에 가해지는 하중을 골고루 분산시켜 설계하며 궤도면의 표면은 높은 강도 및 경도를 나타내고 내부는 높은 인성을 지니도록 표면경화한 소재를 사

*Corresponding author. E-mail : bychoi@jbnu.ac.kr

용해야 한다. 이러한 성질은 침탄된 강(carburized steels)에서 가장 잘 적합하게 나타나며 대형 베어링의 일종인 주 베어링의 내·외륜을 침탄할 경우 고온에서 장시간 가열 중에 결정립 성장이 일어나 비교적 조대한 결정립이 침탄층에 나타나게 된다. 풍력발전시스템이 작동될 때 주 베어링의 궤도면에 반복적으로 가해지는 하중에 따라 일어나는 회전접촉 피로파손이 이와 같은 비교적 조대한 결정립이 형성된 침탄강에서 나타날[1] 것으로 판단된다.

따라서 고온에서 장시간 가열 중에 오스테나이트 조직을 안정화하고 결정립의 성장을 억제하며 탄화물을 생성하지 않는 원소인 Ni을 주 첨가 합금원소로 합금설계한 소재를 침탄강으로 사용해야 한다. 또한 일반적으로 가스침탄시 고온가열 중에 입계 산화(internal oxidation at grain boundaries)가 일어나므로[2] 진공침탄(vacuum carburizing or low-pressure carburizing) 방법으로 표면경화해야 입계산화층이 생성되지 않게 된다. 이와 같은 공정을 거쳐 형성된 침탄층에서 풍력발전시스템이 작동될 때 나타나는 회전접촉 피로거동은 자동차 또는 산업기계에 쓰이는 중·소형 베어링을 만드는데 필요한 표면경화 공정 중 하나인 고주파 유도경화에 의해 형성된 물리적 표면경화층에서 나타나는 거동과는[3] 다를 것으로 예측된다. 그러나 아직 이에 관한 연구 보고가 거의 없는 것으로 생각된다.

이에 본 연구에서는 풍력발전시스템용 주 베어링의 내·외륜을 제조하는데 적합하고 높은 내구성을 나타낼 수 있는 베어링 소재의 합금 성분을 선정한 다음 이를 토대로 용해주조와 가공 및 진공침탄한 후 시편을 제작하여 침탄층의 회전접촉 피로특성을 평가하고 고찰하려고 한다.

2. 실험 방법

1.5~3.0 MW급 대형 풍력발전시스템의 주 베어링의 내·외륜을 제조하려면 용해주조와 열간단조 및 링 롤링(ring rolling) 공정을 거쳐 선삭가공 후 진공침탄한 다음 연삭가공공정을 거쳐야 한다. 따라서 그 소재는 이러한 제조공정에 적합하며 내구성이 높은 성질을 가진 합금성분을 함유해야 한다. SAE 8620과 SAE 4320 및 SAE 9310강은 각각 Ni을 0.40~0.70 wt%, 1.65~2.00 wt%, 3.00~3.50 wt%를 함유한 저탄소 니켈크롬몰리브덴강에 속한다. 그 중 SAE 9310강이 진공침탄공정의 고온가열 중에 오스테나이트조직을 안정화하며, 결정립의 성장을 억제하고 탄화물을 생성하지 않는 원소인 Ni 함량이 가장 높다. 또한 경화능 증대의 효과를 나타내어 표면경도 및 강도를 증가시키는 Cr과 Mo 함량은 각각 1.00~1.40 wt%와 0.08~0.15 wt%이다. 그리고 C 함량은 0.08~0.13 wt%이다. 따라서 Ni와 Cr 및 Mo 조성은 주 베어링의 내·외륜의 높은 내구성과 제조공정에 적합한 조성이라고 판단된다. 그러나 매우 낮은 C 함량으로 인해 대형 내·외륜을 선삭가공하기에는 부적합하다. 즉 C%를 0.20 wt% 이내, 즉, 진공침탄전 C%의 최대함량 내에서 C 함량을 높이고 Ni, Cr 및 Mo 함량은 SAE 9310강과 거의 같은 조성이 적합하지만 SAE 규격에는 없다[4]. Spec. International ISO 683-17(76), Designation 16의 화학조성은[5] 0.14~0.20C-3.25~3.75Ni-1.30~1.60Cr-0.15~0.25Mo(wt%)이며 SAE 9310의 조성에 비해 Ni와 Cr이 0.25 wt%만큼 증가되었고 C와 Mo을 극소량 증가시켜 풍력발전시스템용 주 베어링의 내·외륜을 제조하는데 적합하고 높은 내구성을 보여줄 베어링 소재로 선정하였다.

한편 베어링 소재에 분포하는 비금속 개재물 중 비교적 큰 산화물계 비금속 개재물에서 작동 중에 균열이 생성되어 파손되므로 내구성이 높은 소재를 만들려면 비교적 큰 산화물계 비금속 개재물의 함량을 낮춰야 한다.

따라서 본 연구에서는 40톤 전기로에서 0.14~0.20C-3.25~3.75Ni-1.30~1.60Cr-0.15~0.25Mo(wt%) 조성을 목표치로 설정하여 강을 용해한 후 2차 진공정련을 거쳐 잉곳 주조한 다음 화학성분을 분석하고 ASTM E45-10 Method A의 비금속 개재물 측정을 실시하였다.

이 잉곳을 열간단조 후 코깅(cogging)한 다음 링 롤링을 거쳐 선삭가공 및 연삭가공하여 복렬 테이퍼 롤러(double row taper roller) 타입의 내·외륜 상사 시제품 및 회전접촉 피로시험용 시편을 제작하였다[6].

이 시제품과 시편을 C_2H_2 분위기의 진공침탄로에서 950°C에서 470분동안 진공침탄한 다음 1350분동안 확산한 후 840°C에서 가열한 다음 120°C로 유지된 oil에 냉각한 후 160°C에 유지된 템퍼링로에서 120분동안 템퍼링한 다음 공냉하였다.

진공침탄 및 템퍼링된 상사 시제품과 시편의 표면경화층을 광학현미경으로 미세조직을 관찰하고 표면에서부터 수직방향으로 깊이에 따른 경도분포를 100 um 깊이마다 마이크로 비커스 경도계로 하중 300 g을 가하여 연속적으로 측정하였다.

그림 1에 도식적으로 나타낸 회전접촉 피로시험기에 진공침탄 및 템퍼링처리한 시편을 장착하고 상대재인 볼을 STB2(AISI 52100)으로 하여 탄성유체윤활조건으로 축 방향 하중 550 kgf, 즉, 헤르쯔

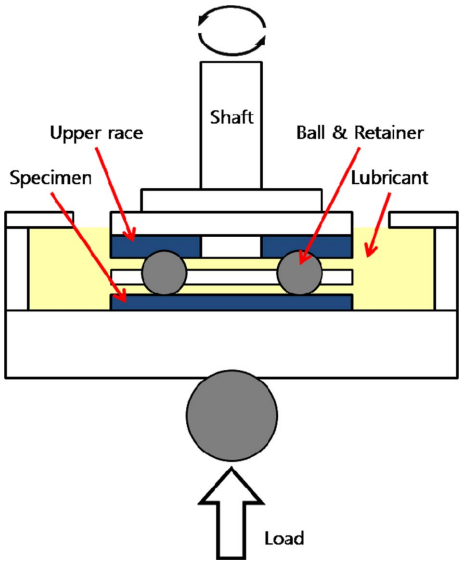

Fig. 1. Schematic diagram of the thrust type rolling contact fatigue tester.

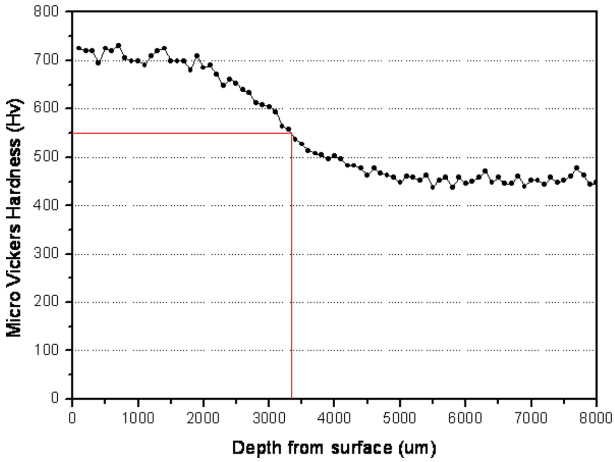

Fig. 2. Microhardness variation as a function of depth from surface in the vacuum carburized and tempered specimen.

접촉응력 593 kgf/mm^{2}을 가하면서 1,800 rpm의 회전속도로 축을 회전시켜 시편에 박리가 발생할 때 진동감지장치에 전달되어 작동이 멈출 때까지 회전접촉 피로시험을 실시하였다. 이때 회전수를 기록하고 시편의 회전접촉면 즉, 궤도면의 프로파일을 레이저 표면조도 측정기로 정밀측정하여 표면에 생성된 마모트랙을 조사하였다. 또한 회전접촉 피로시험 전과 후에 궤도면의 잔류오스테나이트 함량과 잔류응력값을 각각 X-선 회절시험에 의해 다음과 같이 측정하였다. Cr Kα를 사용한 X-선 회절에 의한 직접비교법에 의해 잔류오스테나이트의 함량을 측정하였으며 잔류응력은 (211)면 반사에 의한 X-선 회절에 의해 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

시편의 화학성분을 분석한 결과 아래 표 1과 같이 나타났으며 비금속 개재물을 측정한 결과 아래 표 2와 같이 나타났다.

표 2에 나타난 바와 같이 비금속 개재물 중 산화물계 비금속 개재물인 취성의 Al_2O_3와 Silicates가 검출되지 않고 Ca-aluminates와 MnS가 각각 Thin이 1, 0.5이며 Heavy가 0.5이므로 고청정도의 베어링 소재를 보여주고 있다. 그림 2는 진공침탄 및 템퍼링된 상사 시제품의 경도를 측정한 결과 나타난 표면에서부터 수직 방향으로 깊이에 따른 경도분포곡선을 나타내고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 표면에서부터 약 2,000 um 깊이까지 균일한 경도값 약 Hv 700을 나타내고 유효경화층 깊이, 즉, 경도값 Hv 550 이상에 해당하는 깊이는 약 3,300 um로 나타났다. 이 표면층의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과 그림 3과 같이 나타났으며 진공침탄 전 미세조직은 그림 3(a)와 같이 미세한 탄화물이 기지조직에 균일하게 분포하였으며, 템퍼드 마르텐사이트와 잔류오스테나이트의 혼합조직이 진공침탄 및 템퍼링 후 형성된 것을 그림 3(b)를 통해 알게 된다. 그림 4의 X-선 회절 시험 결과로부터 잔류오스테나이트의 함량을 측정한 표 3에서 보는 바와 같이 시편별로 소량 차이가 나타나며 12 ± 1~26 ± 1%로 나타났다. 그림 2의 경도분포와 그림 3(b)의 미세조직 및 X-선 회절 시험으로부터 정량적 잔류오스테나이트를 측정한 표 3의 결과로부터 진공

Table 1. Chemical composition of the specimen (wt%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S	Fe
0.175	0.27	0.55	3.5	1.45	0.2	0.13	0.005	Bal.

Table 2. Contents of non-metallic inclusions

Type	MnS		Al_2O_3		Silicates		Ca-aluminates	
Severity levels	Thin	Heavy	Thin	Heavy	Thin	Heavy	Thin	Heavy
	0.5	0.5	0	0	0	0	1	0.5

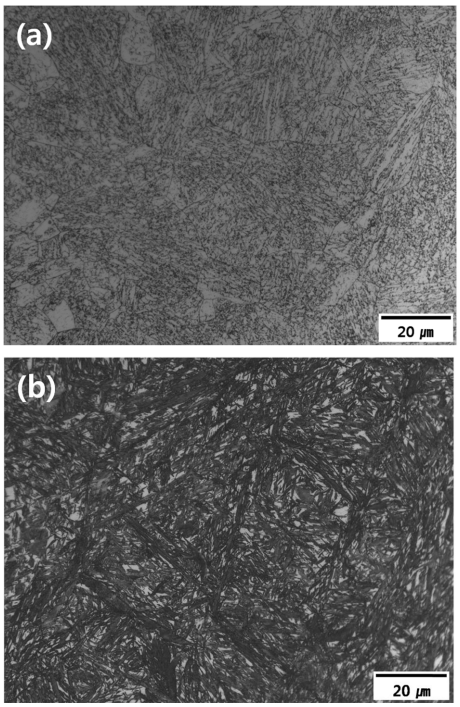

Fig. 3. Optical micrographs showing (a) dispersed carbides in matrix before carburizing, (b) mixture of retained austenite and tempered martensite in vacuum carburized and tempered specimen.

Table 3. Retained austenite percent (%) determined by X-ray diffraction

Retained Austenite (%)		
Rolling contact cycles	Before RCF test	After RCF test
1,595,000	19 ± 2	9 ± 1
1,735,000	16 ± 1	11 ± 3
2,384,000	16 ± 3	16 ± 1
2,503,000	26 ± 1	15 ± 1
2,706,000	12 ± 1	6 ± 1

Table 4. Residual stress values (ksi) determined by X-ray diffraction

Residual Stress (ksi)		
Rolling contact cycles	Before RCF test	After RCF test
1,595,000	-119 ± 5	-102 ± 9
1,735,000	-101 ± 4	-156 ± 5
2,384,000	-30 ± 7	-134 ± 10
2,503,000	-40 ± 5	-170 ± 9
2,706,000	-107 ± 4	-101 ± 15

침탄 후 템퍼링시 오스테나이트에 고용된 C와 Ni의 화학적 안정화 메커니즘에 의해 오스테나이트가 일부 잔류함을 확인할 수 있었다[7]. 또한 이 표면층의 잔류응력을 X-선 회절 시험에 의해 측정한 표 4의 결과 −30 ± 7~−119 ± 5 ksi로 나타나 시편에 따라 차이가 있지만 모두 압축잔류응력이 형성된 것을 알 수 있다. 즉, 진공침탄 후 oil에 냉각시 오스테나이트가 대부분 마르텐사이트로 변태하면서 표면영역에서 체적팽창이 일어나게 되고 중심부위는 체적팽창이 억제되면서 결과적으로 표면영역에 압

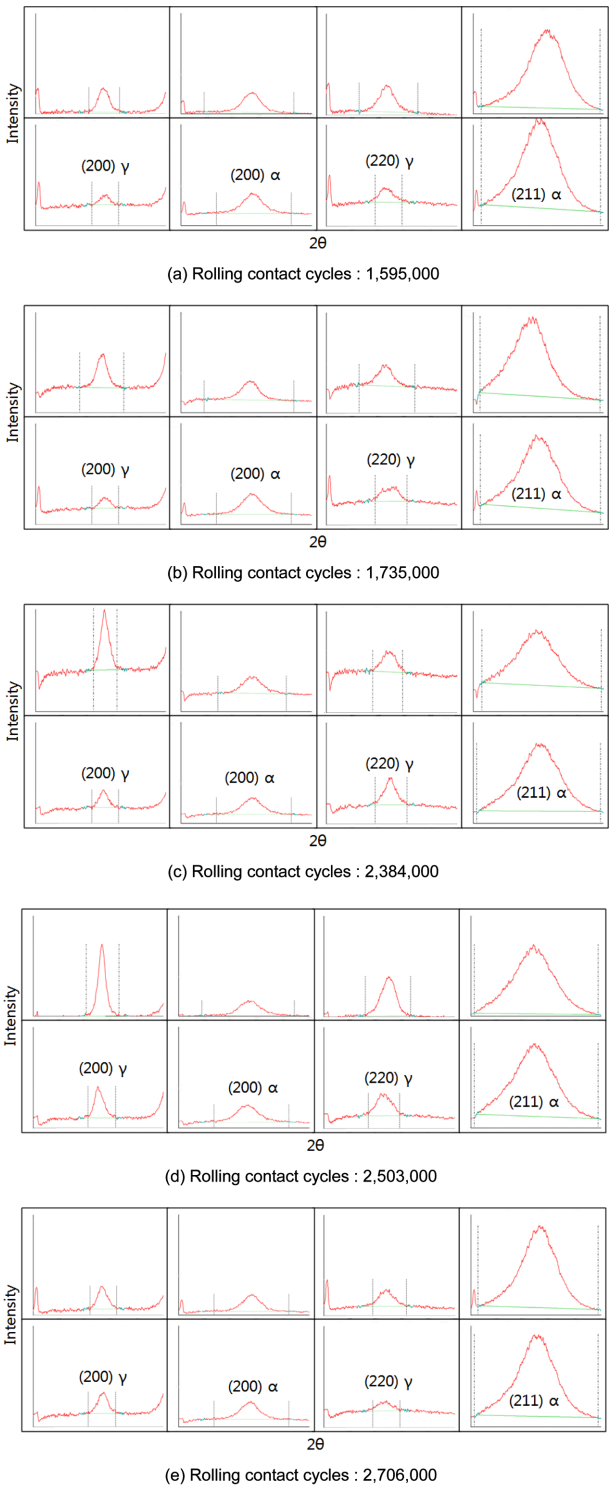

Fig. 4. X-ray diffraction peaks for the tempered martensite and retained austenite phase.

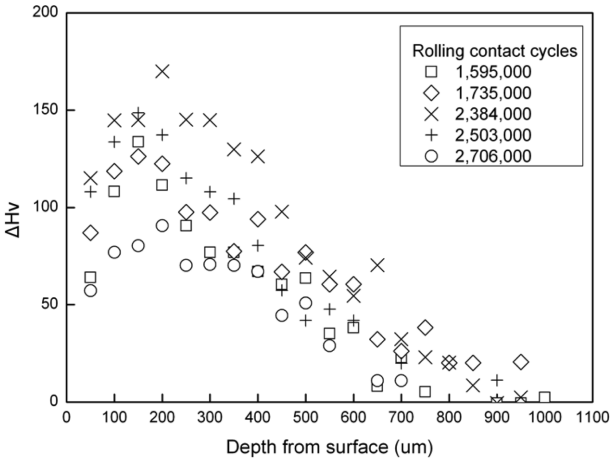

Fig. 5. Variation in ΔHv as a function of depth from surface after rolling contact fatigue tests.

축잔류응력이 형성된다고 생각된다. 이와 같이 표면층에 형성된 잔류오스테나이트와 잔류응력은 회전접촉 피로시험시 시편과 볼의 회전접촉면, 즉, 궤도면에 반복적으로 가해지는 하중에 따라 그 값이 달라질 것이다. 이에 X-선 회절 시험에 의해 회전접촉 피로시험 후 시편의 궤도면의 잔류오스테나이트 함량을 측정한 결과 표 3에서 보는 바와 같이 6 ± 1~16 ± 1%로 나타나고 잔류응력 값은 표 4의 결과와 같이 −101 ± 15~−170 ± 9 ksi로 나타났다.

그림 5는 시편의 궤도면의 표면에서부터 수직방향으로 깊이에 따른 경도의 변화를 회전접촉 피로시험 전과 후에 측정한 값의 차이로 나타낸 ΔHv의 최대치, 즉, 가장 큰 경도값의 증가량을 보이고 있다. 이는 다음과 같이 해석하여 그 원인을 규명할 수 있다. 회전접촉 피로시험 중에 궤도면 직하 약 150~200 um 깊이에서 반복적으로 시편의 궤도면에 가해지는 하중에 따라 최대 전단응력이 작용하여 전단변형이 일어나고[8], 그에 따른 변형경화와[9] 잔류오스테나이트의 소성유기변태에 의한 마르텐사이트로 변태에 기인한 잔류오스테나이트 함량이 12 ± 1~26 ± 1%에서 6 ± 1~16 ± 1%로 감소하여 그림 5와 같이 경도값이 회전접촉 피로시험 후에 증가한다고 생각된다. 아울러 궤도면의 잔류응력 값이 −30 ± 7~−119 ± 5ksi에서 −101 ± 15~−170 ± 9 ksi로 압축잔류응력의 크기 또한 증가하게 된다.

회전접촉 피로시험 후 접촉형상(contact geometry)을 그림 6에 각 시편의 궤도면의 프로파일을 정밀측정하여 나타내었다. 공통적으로 표면마모(surface wear)가 wedge forming mode의 마모형태로 일어나는[10] 것을 볼 수 있으며 궤도면 내에 micropits가 생성되어 나타났다. 그 중 그림 6(d)에 가장 많은 micropits가 생성되어 나타나며 이는 회전접촉 피로

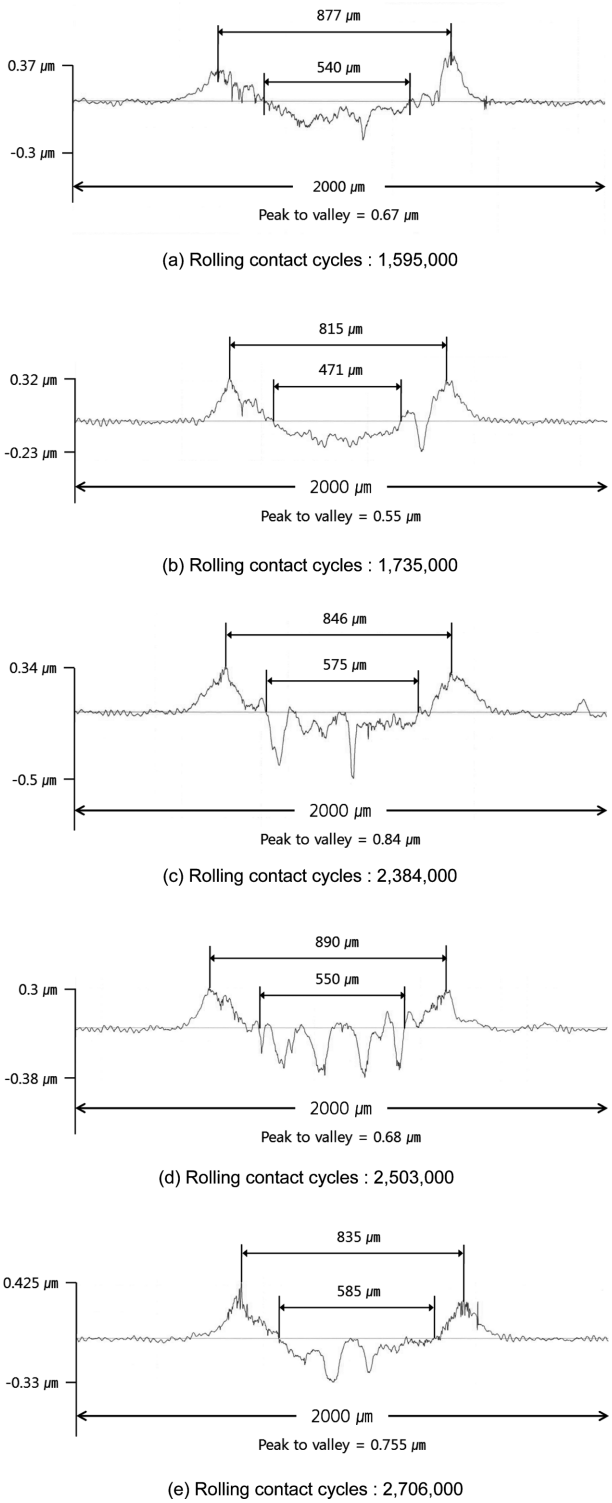

Fig. 6. Cross-section profiles of raceway after rolling contact fatigue test.

시험 전 잔류오스테나이트 함량이 26 ± 1%인 시편에 해당되고 가장 잔류오스테나이트 함량이 많은 경우이다. 이는 비교적 연성을 지닌 잔류오스테나이트 특성에 기인하여 소성변형이 일어나 asperities의 반복적인 접촉과 미소파단이 진행되어 나타난 것이라고 생각된다. 한편 회전접촉 피로시험시 가

장 회전수가 많은 경우는 그림 6(e)이며 궤도면의 중심영역에 뭉툭한 micropits가 생성된 것을 볼 수 있다. 이는 회전접촉 피로시험 전과 후에 각각 잔류오스테나이트 함량이 가장 적은 12 ± 1%와 6 ± 1%인 시편의 궤도면 프로파일이며 따라서 상대적으로 마르텐사이트 함량이 가장 많은 미세조직의 소성변형에 대한 저항성이 높은 특성을 보여 micropits의 깊이가 그림 6(d)의 경우에 비해 얕아지고 반복적인 asperities의 접촉과 미소파단이 진행되면서 뭉툭한 micropits가 생성된다. 결과적으로 궤도면의 곡률반경이 증가하면서 탄성유체윤활조건이 지속되어[11] 베어링의 내구성이 증가하는 요인으로 작용하게 된다고 생각된다.

이 탄성유체윤활조건에서 회전접촉 피로시험시 궤도면의 폭을 2b라고 하면 궤도면의 폭의 절반이 b가 되고 distortion energy hypothesis와 main shear stress hypothesis에 의해 궤도면 직하 0.7b의 깊이에서 최대 전단응력이 작용하게 된다[12]. 본 실험결과에서 그림 6(e)에 나타난 바와 같이 궤도면의 폭이 585 um이므로 최대 전단응력이 작용하는 깊이는 궤도면 직하 204.75 um이 된다. 이 값과 그림 5에 나타난 회전접촉 피로시험 후 그림 6(e)의 궤도면에 해당하는 동일한 시편의 경도 증가량의 최대치가 약 200 um 깊이에서 나타나는 실험결과가 거의 같다. 한편 풍력발전용 spherical roller 주 베어링에서 micropitting에 의해서 파손이 일어난다는 것이 최근 보고되고 있다[13]. 위의 결과를 토대로, 탄성유체윤활조건이 지속되는 접촉형상을 나타내고 그에 따라 베어링의 내구성을 높이려면 회전접촉 피로시험 전 뿐만 아니라 후에도 가능한 한 베어링 소재의 침탄층의 잔류오스테나이트 함량을 낮게 조절할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

풍력발전시스템의 주 베어링용 0.18C-3.5Ni-1.5Cr-0.2Mo강을 제조하고 그 표면특성을 진공침탄 및 템퍼링한 후 분석한 다음 그 결과를 회전접촉 피로시험 후 궤도면에 나타난 것과 비교평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진공침탄 및 템퍼링한 시편의 표면경화층에 잔류오스테나이트와 템퍼드 마르텐사이트의 혼합조직이 형성되었으며 압축잔류응력이 생성되었다.

2. 회전접촉 피로시험 후 위의 결과와 비교한 결과, 이 시편의 궤도면에 반복적으로 가해지는 접촉응력으로 인해 잔류오스테나이트 함량이 감소하였고 압축잔류응력은 증가하였다.

3. 회전접촉 피로시험 전과 후에 각 시편의 표면경화층과 궤도면에서 가장 낮은 잔류오스테나이트 함량을 나타낸 경우, 베어링이 높은 내구성을 나타낼 수 있음을 본 실험을 통해 밝히게 되었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지 기술개발사업(과제번호 20103010020030)의 일환으로 수행된 결과의 일부분입니다.

참고문헌

1. B.-Y. Choi, K. Kato, N. Umehara, J. Kor. Inst. Met. Mater., 39 (2001) 1016.
2. W. Gräfen, M. Hornung, O. Irretier, M. Rink, HTM Z. Werkst, Wärmebeh Fertigung, 62 (2007) 3, 97.
3. B.-Y. Choi, Kor. J. Met. Mater., 48 (2010) 1103.
4. B. Um, Special Steels (1978) 11.
5. Worldwide Guide to Equivalent Iron and Steels, 4th Ed., ASM International (2000).
6. B. Y. Yoon, B. Y. Choi, J. Kor. Inst. Met. Mater., 28 (1990) 634.
7. R. W. K. Honeycombe, Steels, Microstructure and Properties, Edward Arnold, U.K., (1981) 211.
8. J. M. Hampshire, Proceedings of 3rd Int. Conf. on Clean Steel, Inst. of Metals, (1987) 22.
9. N. P. Suh, Wear, 25 (1973) 111.
10. K. Hokkirigawa, K. Kato, Tribology International, 21 (1988) 151.
11. R. L. Norton, Machine Design, an Integrated Approach, Third Ed., Prentice Hall (1996) Chapter 6.
12. H. Schlicht, E. Schreiber, O. Zwirlein, Ball and Roller Bearing Engineering, 1 (1987) 14.
13. M. N. Kotzlas, G. L. Doll, Phil. Trans. R. Soc. A, 368 (2010) 4829.