

베어링강의 개발동향

유선준

(POSCO 기술연구소)

The Current Status of the Development of Bearing Steels

S. J. Yoo

Abstract

Several alloy bearing steels have been starting to replace for conventional high carbon and high chromium bearing steel since 1980. In this paper the global bearing developing trends were summarized in several important aspects; developments in alloy bearing steels for improved service life, development of inclusion rating method in bearing steel and developments in bearing service life testing.

Key Words : Alloy, Bearing Steel, Inclusion Rating, Bearing Service Life Testing

1. 서 론

베어링강은 전세계으로 40 여개의 생산업체에서 생산되고 있으며, 대표적인 규격은 [SAE52100, SUJ2, 100Cr6]로써 탄소는 약 1% 크롬은 약 1.5%를 함유하고 있다. 이 고탄소 고 크롬강은 약 100년 간 dir 200 만톤에 달하고 있다. 베어링강의 역사는 100년 정도이지만 그 표준화는 1940년에 시작되었고, 표준화 이후 제강 설비의 대형화 및 연속주조 가능으로 생산원가를 절감하는 노력을 하고 있다. 또한 개재물을 감소시키기 위해 탈가스 공정 도입, 용강제조 후 2차 래들 정련법의 개선, 정확한 조성 제어, 내식성이 우수한 내화물을 개발하고 있다. 이와 더불어 고청정강에서의 비금속 개재물의 평가방법이 개발되고 있다.

또한 합금원소를 이용하여 기존의 고탄소 고 크롬강 이외에 특수 사용 목적을 위한 다양한 강종의 개발을 시도하고 있으며, 이러한 특수용도의 베어링 강의 품질평가를 위해 다양한 품질 평

가 방법이 개발되고 있다. Table 1에 일반적인 베어링강의 개발 동향을 개괄적으로 나타내었다

2. 강종 개발 현황

2.1 SAE52100(SUJ2) 변형 강종개발

기존의 고탄소 고크롬강은 연속주조 후 편석지수가 높아 균질화처리에 많은 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 독일 FAG 사는 연속주조 후 기존의 고탄소 고크롬강 동등 이상의 성능을 갖고 연속주조에 유리하게 하기 위해 C, Cr 함량을 줄이고 Mr을 증가시킨 5280(80CrMn4) 해당 강을 Macsteel USA 와 개발하였다.⁽¹⁾

또한 France의 ASCOMETAL 사는 강의 청정도 향상에 따라 베어링의 신뢰성은 가공거칠기 및 이물체에 의한 레도 찍힘 등 표면 기점형 파손에 좌우되므로 이에 대응해 100Cr6를 기준으로 Mn, Si 함량을 높여 잔류 austenite량을 높이고 Si를 증가시켜 tempering resistance를 높인 개량강을 개발

하고 있다. 한편 일본 NSK 에서도 기존의 1%탄소를 0.85%로 낮추어 연속주조시 편석의 민감도를 줄이고, 크롬을 기존의 1.5%에서 0.5%로 경제성을 부여하고, 낮추는 대신 망간을 0.4%에서 1.0%로 높여 경화능을 보상해 주는 강을 개발하여 기존강과 피로수명이 유사하다고 보고하였다.⁽²⁾ Fig.1 에 이 결과를 나타내었다.

Table 1 General trend in bearing steel

Period	Past & Present	Present & Future
Casting method	Ingot casting & continuous casting	Only continuous casting
Kinds of steel	High carbon and high chromium	Developing alternative steel (Alloys, Carburized bearing) Idea for surface initiation crack
Testing method	Room temperature fatigue test (clean and contaminated environment)	Diversification of fatigue test
Inclusion rating method	ASTM and JIS	Inclusion rating for high purity teel (below 15ppm, oxygen)

베어링용 강재를 Sweden 의 스웨덴의 Ovako 사에서 개발하였다. 이의 화학성분은 0.87 - 0.93C, 1.62 - 1.80Si, 0.50 - 0.70Mn, 0.025≥ P, 0.008 - 0.015S, 1.25 - 1.35Cr, 0.25≥ Ni, 0.25≥ Mo, 0.3 ≥ Cu, 0.1 - 0.2V, 0.010 - 0.050Al 이다. 또한 Ovako 677 이라 명명되는 강은 공냉 경화강으로 환경 친화적이며 열처리 변형이 52100 기름담금질의 경우에 비해 1/10 정도로 적으며, 열간 전조로 제조되는 medium size 베어링 소재로 적합하다고 하였다. 이는 기존의 고탄소 고크롬강이 오일 또는 염욕 담금질 강이 열처리 담금질 매질이 환경 오염을 야기할 뿐 아니라 열처리 변형이 많다는 단점을 보완한 것이다. 이 강의 화학조성은 0.67C - 1.5Si - 1.4Mn - 1.1Cr - 0.25Mo 이다. 한편 일본의 Koyo 사에서도 기존의 고탄소 고크롬강보다 준고온 안정성이 우수한 KUJ7(1.0C - 1.0Si - 2.0Cr - 0.5Mo - 0.5Mn)강을 개발하고 있다. Table 2 에 합금원소의 Bearing 강에서 합금원소 첨가의 원리를 개괄적으로 나타내었다.

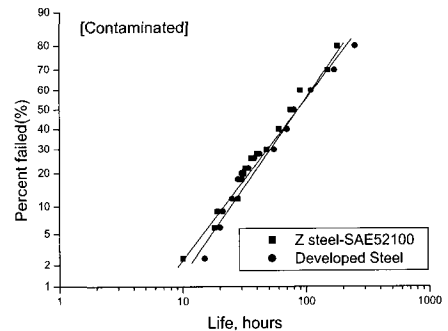


Fig. 1 The RCF life of bearing of developed steel and SAE52100 under contaminated lubrication⁽²⁾

2.2 합금원소를 이용한 기능의 다양화
2.2.1 SAE52100(SUJ2)의 고기능화⁽³⁻⁴⁾

고탄소 고크롬강으로 제조된 베어링은 사용 최고 온도가 120℃ 정도에 불과하고, 그 이상의 온도에서는 경도의 저하 및 치수변화가 야기된다.

경도저하는 수명 저하를 야기하고 치수변화는 회전불량을 야기하므로, 이를 방지하기 위해서는 잔류 Austenite 분해 및 탄화물 석출에 미치는 합금원소의 영향을 고려할 필요가 있다. 잔류 Austenite 는 오염유회환환경 수명에 유리하므로 열적으로 안정한 Austenite 를 생성시키는 것에 주목하고, 250℃ 까지 경도저하 및 치수변화가 없는

2.2.2.표면 경화처리강 개발현황⁽⁵⁻⁸⁾

기존의 고탄소 고크롬강은 상용시 비금속 개재물 주위에서 파단이 시작되며, 파단의 전파속도가 매우 빠르다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하여 이물환경에서 사용되는 베어링강의 소재 즉, 표면에서 파단이 시작되는 부품(이물환경에서 사용되는 부품)에서의 피로수명을 증대시킬 목적으로 표면경화 처리강이 개발되었다.

Table 2 Concept of alloy design in bearing steel

Alloy	Concept	Increase or decrease
Si	*Stable retained austenite *Increase temper resistance	Increase
Cr	*Increase precipitation	Increase
V	*Increase MC type precipitation	Increase
Mn	*Increase hardenability	Increase
C	*Decrease segregation	Decrease

또한 기존의 고탄소 고크롬 베어링강 제조시 필수 공정인 구상화열처리 공정이 생략되므로 원가적인 측면에서도 매우 유리하다. Sweden의 SKF 사에서는 SAE 52100 및 4140의 침탄질화 특성(temper. Resistance 및 이물저항성)을 비교하여 침탄질화강이 우수하다고 발표하였으며, 일본의 Koyo 사에서는 이물환경 대응한 제품으로 기존 침탄강(SCr420 상당)에 針탄열처리 공정을 개선한 KE 베어링을 개발하였다. 또한 일본의 NSK 연속주조 안내 Roll 용 베어링은 매우 낮은 회전속도, 고부하, 이물환경, 물 침입 윤활 환경에서 작동되어 궤도의 마모가 심하고 외륜이 종종 파손되는데, 이에 대응해 SUJ2 보다 내마모성 및 침윤활환경에 강한 강으로, 0.4C-0.4Si-0.8Mn-1.5Cr-2.0V 강을 개발하였다.

한편 내식용 베어링 강재로 AISI440C 가 많이 사용되지만 고탄소 고크롬 함량으로 인해 조대한 공정탄화물이 형성되고 이는 접촉부에서 응력집중원으로 작용해 피로성능을 저해한다. 일본 NSK 사의 개량 강에서는 조대 탄화물 억제에 위해 440C(1C-18Cr)에서 탄소와 크롬을 낮추고 Ni 을 감량한 대신 질소를 첨가하여(0.45C - 13Cr - 0.14N) 탄화물 분포를 AISI 52100(SUJ2)에 비견하게 하여 장수명을 실현하였다. 탄소, 질소, 크롬의 적정한 배합과 통상의 제강법을 사용하여 원가의 큰 상승이 없도록 하였다.

한편 POSCO 에서는 FAG-환화 bearing 과 공동으로 중탄소강에 Al 을 첨가하여 austenite grain-size 를 미세화시켜 소입시 crack 을 방지해줌

으로써 소입성을 개선시키고 V 를 첨가하여 탄질화 열처리 후 표면경도를 향상시킴과 동시에 열처리 방법을 개선시켜 표면에 잔류 austenite 함량을 증가시킴으로써 이물환경에서 피로수명이 우수한 강을 개발하였다. Fig 2 에 피로시험 결과를 나타내었다

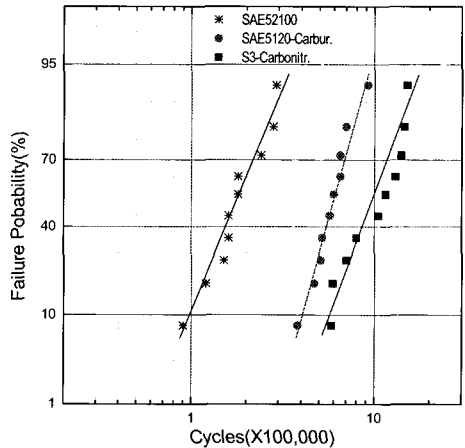


Fig. 2 Results of rolling contact fatigue test Under contaminated lubrication⁽⁶⁾

3. 비금속 개재물 검사방법의 발전⁽⁷⁻¹³⁾

강의 품질 특히 청정도 개선과 관련하여 제강업체는 공정변수의 정밀제어 능력 향상, 베어링 제조사는 품질평가 능력 확보를 위한 다음과 같은 분석 기법이 적용 발전되고 있다.

고내구성 베어링 조건을 만족하기 위해서는 마이크로-개재물은 물론 5 ~ 20 μm 범위 마이크로 비금속 개재물의 크기별 분포에 대한 보다 정밀한 분석이 필요하다. 전통적으로 금속현미경 검사, Blue Fracture Test, 산소함량 측정 등으로 품질평가가 이루어져 왔으나, 이러한 기존의 일상검사는 많은 비용과 시간이 소요되어 '전문 평가 시스템'의 도입으로 지속적인 품질수준 점검이 필요하다. 근래 강 중에 최대 마이크로-개재물 크기를 예측기 위한 극치통계법(SEV: Statistics of Extreme Value) 및 관련 기법이 고 내구성 베어링

소재 생산에 사용되고 있으나, 이러한 방법도 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 또한 초음파 탐상법이 발전되어 50MHz 이상의 고주파 초음파를 이용한 탐상법은 25 μm 이하의 마이크로-비금속개재물을 검출할 수 있다하나, 이 방법 또한 작은 체적의 샘플 검사 방법으로 많은 시간의 소요와 더불어 샘플의 준비와 검사절차에 상당한 주위를 필요로 한다.

최근 강의 청정도 평가와 관련해 가장 주목받고 있는 방법으로 OES-PDA(Optical Emission Spectrometry with Pulse Discrimination Analysis) 방법이다. 이 방법은 재료표면에 스파크 방전 후 방출된 빛의 pulse를 분류하여 5 μm 이하의 비금속 개재물 까지도 그 분포를 정량화할 수 있는 방법으로 단시간에 다수의 샘플 분석 및 통계처리를 할 수 있다는 장점이 있어, 향후 원재 품질 전문 평가시스템으로 기대되고 있다. 현재 각사에서 도입하고 있는 개재물 주요 분석 방법은 다음과 같다.

Ascometal(France)는 상기에 소개한 OES-PDA 및 고주파 초음파 검사법을 사용하고 있으며, 영국의 University of Sheffield 에서는 작은 체적의 시편으로부터 최대 개재물 크기를 예측할 수 있는 통계적 방법으로 GDP(Generalized Pareto Distribution) 기법이라 하며, NSK의 극치통계법(SEV)에 비해 진보된 방법이라 발표했다.

또한 미국 Macsteel 사에서는 Advanced Analysis Technology 라 하여, 자동 시편 stage, Image Analyzer, EPMA를 갖춘 CCSEM (computer-controlled scanning electron microscope)를 이용 시정된 시야에서 자동으로 개재물의 크기, 형상, 조성 분류가 가능토록 구축한 시스템으로, ASTM E4 에서 분류되지 않는 상세 정보를 얻을 수 있어, 개재물 기원의 파악이 가능하고 제강 공정 개선에 이용할 수 있다고 했다. 일본의 Aichi Steel 사는 14 μm 이상의 비금속 개재물을 검출할 수 있는 고주파 초음파 검사법을 이용하여, 시료에서 개재물의 위치를 미리 확인하여 표시 후 구름피로 시험을 실시한 결과 flaking의 기점으로 작용하는 임계 비금속 개재물 크기가 20 μm 이상으로 확인되었음을 발견하였다.

독일의 VDEh(German Iron and Steel Institute) - FAG: 마크로 개재물 평가를 위해 기준 Blue Fracture Test 는 실효성이 없어, 훨씬 큰 체적의 시편을 대상으로 침적식 초음파 탐상(immersion ultrasonic testing)법이 개발되었으며,

이에 대한 모든 데이터는 독일 규격 SEP 1927 작성의 근간이 되었다고 보고 했다. 또한 일본의 Sanyo Special Steel 은 피로강도의 관점에서는 비교적 큰 20-100 μm 범위의 마이크로-개재물이 중요하다. 금속현미경 검사로는 그 분포를 평가하기가 현실적으로 불가하여, 산성용액 추출법 등만이 가능하였다. 50-100MHz 정도의 초음파 focus-type transducer 반향강도(echo intensity)가 개재물 크기에 비례하는 것을 사용하면 20 μm 이상의 구형 산화물을 검출할 수 있다. 개재물의 수, 크기 분포, 개재물의 3 차원 위치를 평면 scan 방식에 의해 검사할 수 있고, 큰 체적의 시편을 장시간 검사가 가능토록 자동화 시스템을 갖추었다고 발표하였다. Fig.3 에 이 측정원리의 개요를 도식적으로 설명하였다. France 의 INSA-Ascometal-SNR 은 베어링 수명 분포는 개재물 분포와 부하조건에 의해서 결정된다고 하였다. 즉, 파손 확률은 부하조건에서 접촉부(최대응력부) 균열이 시발될 크기의 개재물이 걸칠 확률에 좌우되므로 이를 근간으로한 수명 예측 모델을 개발하여, 여러 방법으로 개재물 분포가 확인된 시편에 대해 피로수명결과를 비교한 결과 모델에 의한 계산결과와 잘 일치하였다고 하였다.

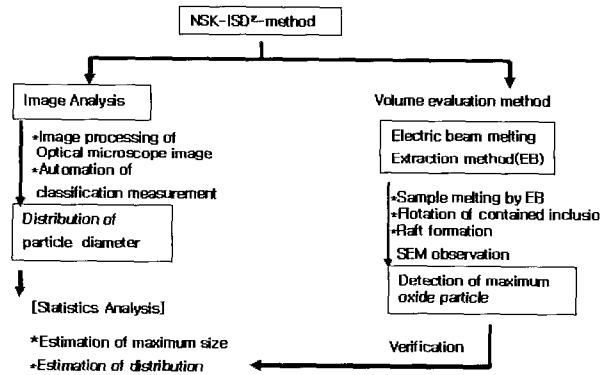


Fig. 3 The outline of the NSK-ISD² Method

4. Bearing 강 수명 평가기술⁽¹⁴⁻¹⁶⁾

베어링 강의 청정도가 이미 높은 수준에 이르게 따라 베어링의 수명이 표면하부기점 (Subsurface Originated), 즉 접촉부 직하의 비금속 개재물에 좌우된다는 고전적 관점 보다, 현재는 비정

상 윤활(오염윤활 또는 부적합 윤활에 의한 금속간 접촉 발생등)에 의한 표면기점(Surface Originated), 즉 궤도 압흔부의 응력집중에 따른 파손이 베어링의 신뢰성을 좌우한다는 개념으로 전환되고 있다. 일부 제강사를 포함 대부분의 베어링 메이커가 이물혼입조건에서의 베어링 수명 향상 방법으로 잔류 Austenite 안정화 및 제어 효과를 언급하였으며, 그 방법으로 침탄질화 그 효과에 대하여 연구하고 있다. 이와 보조를 맞추어 표면기점 파손 평가 방법과 관련 각사의 연구내용은 아래와 같다. 일본의 NTN 사는 이물환경에서의 수명예측 계산식에 대한 연구를 진행하고 있으며, 독일의 FAG 사는 수명시험 산포를 줄이기 위한 인공압흔(artificial dent) 시험 방법을 사용하고 있다. 또한 France SNR 사는 Pre-denting method(with hard particle) 에 의한 수명시험을 시행하고 있으며, 미국의 Torrington 사는 압흔(Rockwell 30N) 및 광간섭계(light interferometry - WYKO 사)를 이용한 압흔형태 조사 및 수명을 측정하고 있다. 한편 압흔에 의한 응력집중 효과를 설명하는 매개변수로 NSK 의 경구 압흔반경(C)

에 대한 모서리 (edge or lip) 곡률반경(r), r/C 를 고려한 반면(Fig 4), Koyo, FAG, Torrington 등은 압흔 모서리의 소성높이(lip height)가 중요하다고 하였다.

5. 향후 개발 방향

철강사 및 베어링 제조업체에서는 다양한 합금원소를 이용하여 신강종 개발에 관한 연구를 지속해 나갈 것으로 예상되며, 향후 청정강 혹은 Bearing 제강기술을 한 단계 높이기 위한 개재물 분석 기술 및 Oxygen 분석기술 도입 혹은 개발에 많은 연구를 할 것으로 예상된다. 또한 고탄소 고크롬 베어링강의 제조원가를 감소하기 위한 제조공정 개선에 관한 연구가 더욱더 활발히 이루어 질 것으로 예상된다. 이의 한 예로 일본의 Sumitomo 제철소에서는 베어링강을 약 800°C 의 저온에서 가열후 cementite 와 austenite 가 공존하는 영역에서 압연하면 잔류탄화물이 구상화의 핵으로 작용하여 구상화율이 높은 조직을 얻을 수 있다고 발표하였으며,⁽¹⁷⁾ 카와사키 제철소에서는 720°C 의 저온에서 가열후 압연온도를 800-1100°C 로 변경후 압연한 결과 840°C 이하의 온도에서 압연시 석출한 탄화물이 냉각시 구상화의 핵으로 작용하여 구상화율이 높은 조직을 얻을 수 있다고 발표하였다.⁽¹⁸⁾

참 고 문 헌

- (1) P.V.Dimitry et al; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 3-26.
- (2) K.Furumura, T.Abe, and Y.Murakami; Bearing steels:Into the 21st century 1996 (STP1327) pp. 249-264.
- (3) H-Juergen Boehmer and Reiner Eberhard; Bearing steel technolog (STP 1419) pp. 244-262.
- (4) Thore B. Lund and L.J. Patrik Oelund; Bearing steel technolog (STP 1419) pp. 86-97.
- (5) Masamichi Shibata et al; Bearing steel technolog (STP 1419) pp. 285-296.
- (6) Kenji Yamamura and Manabu Oohori; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 309-319.
- (7) Sun-Joon Yoo et al; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 297-308.
- (8) Kyozauro Furumura, Yasuo Murakami, and Tsutomu

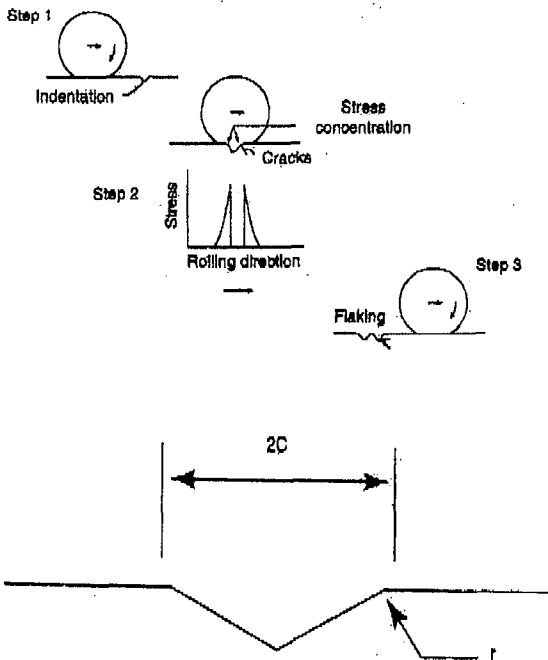


Fig. 4 Crack initiation and propagation with artificial dent and hard particles⁽¹⁶⁾

- Abe; Bearing steels:Into the 21st century 1996 (STP1327) pp. 293~306.
- (9) Boris K. et al; Bearing steels:Into the 21st century 1996 (STP1327) pp. 307~320.
- (10) Gilles Auclair and Pascal Daguier; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 101~112.
- (11) Yukitaka Murakami and Naoko N.Yokoyama; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 113~124.
- (12) G. Shi et al; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 125~37.
- (13) Tomoaki Nishikawa et al; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 148~163.
- (14) Narai,H., Niizeki,S, and Abe. T.,; CAMP-ISIJ, Vol.4, 1991, p. 231.
- (15) Alaim Vincent et al; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 459~473.
- (16) Gerard Lormand et al; Bearing steel technology 2001 (STP1419) pp. 493~508.
- (17) Beerbower, M.R. et al; SAE Technical Paper Series 94078, 1994 pp. 11~22.
- (18) T. Hamada, Camp ISIS 350 Vol. 9 (1996) 499.