

유체 윤활 미끄럼 베어링의 표면 손상

하현천* · 방경보* · 박영철** · 김일봉**
한국중공업 기술연구원

Damages of the Sliding Surface in Fluid Film Bearings

Hyun Cheon Ha, Kyung Bo Bang, Young Chul Park, and Il Bong Kim,
Research and Development Center, Korea Heavy Industries & Construction Co. (HANJUNG)

Abstract - Because the journal and bearing surface are fully separated by the oil film during the normal operation, fluid film bearings operating in the hydrodynamic lubrication region are expected to have an infinite life. However, there are many parameters that lead to interfere with the normal operation of the bearing and lead to its failure. In this paper, both the causes and countermeasures of the bearing failure are described. Also, the characteristics of wiped bearing surface are investigated through mechanical and chemical test.

Key words - fluid film bearing, bearing surface, wear, wiping

1. 서론

베어링은 회전기계에서 가장 중요한 기계 요소 중의 하나이다. 회전기계의 운전 신뢰성은 베어링의 성능에 의해 평가된다. 따라서 베어링에서 발생하는 사소한 문제점이 기계 시스템 전체에 영향을 미치는 큰 문제점으로 확대될 수 있다.

회전기계의 문제점은 주로 베어링을 통해 검출되고 베어링의 직접적인 손상으로 나타난다. 따라서 베어링에서 발생하는 많은 손상은 베어링 자체의 결함이나 또는 기계의 다른 문제들과 연관되어 발생하고 있다.

유체 윤활 영역에서 운전되는 미끄럼 베어링은 이론적으로 무한한 수명을 가진다. 이는 저어널과 베어링 면이 유막(fluid film)에 의해 완전히 분리되어 운전되므로 어떠한 표면 접촉이나 마모가 발생하지 않기 때문이다. 하지만 베어링의 운전을 방해하고 베어링을 손상시키는 여러 가지 요인이 항상 존재하기 때문에 운전 중에 베어링이 손상될 가능성이 항상 존재한다. 베어링이 손상되면, 생산 손실과 유지

비용에 따른 영향은 매우 크다. 기계의 지속적인 운전을 방해하고 기계요소의 신뢰성과 성능을 저하시키게 된다. 따라서 운전자들은 베어링의 손상을 가능한 빨리 검출하여 더 이상의 손상이 진전되지 않도록 올바른 조치를 취해야 한다.

본 연구는 베어링에서 발생하는 손상 현상과 원인, 손상 분석 절차, 그리고 방지 및 보수 대책 등을 체계적으로 분류하여 제시함으로써 베어링 손상에 의한 손실을 최소화하고자 하는데 그 목적이 있다. 그리고, 실제 wiping 손상이 발생한 베어링에 대해 babbitt metal의 기계적 및 화학적 분석을 통하여 wiping 표면 손상된 베어링의 특성을 고찰하였다.

2. 표면 손상의 형태

유체 윤활 베어링은 여러 가지 요인에 의해 손상이 발생된다. 이러한 손상은 각각의 원인에 의해 독특한 표면 손상 형태로 나타난다. 미끄럼 베어링에서의 표면 손상의 형태를 발생 원인별로 구분하면, 다음과 같은 네 가지로 분류된다.

* 정회원 한국중공업(주) 기술연구원 진동연구팀

** 한국중공업(주) 기술연구원 소재개발팀

2-1 표면 긁힘(Scratch)

가) 연삭 마모(Abrasive wear)

이것은 유막 두께 보다 큰 이물질(debris)에 의해 마주하는 표면에 손상이 발생하는 손상 형태이다. 이물질은 베어링 전체 표면에 연속적인 자국을 남길 수 있다. Fig.1은 연삭마모에 의해 손상된 베어링의 표면상태를 보여준다. 연삭마모의 다른 요인은 거친 표면을 가지는 저어널(journal)이나, 이전의 연삭 손상 및 긴 정지(down time)시간 후에 형성된 녹(rust)에 의한 것이 있다.

육안으로 보아 로터가 손상되었을 때는 새로운 베어링을 설치해서는 안된다. 연삭마모를 방지하기 위해서는 윤활유의 정제, 적당한 메쉬(mesh)를 가지는 필터(filter)의 사용, 조립된 베어링과 오일 저장소(oil reservoir)를 세척하는 방법 등이 있다.

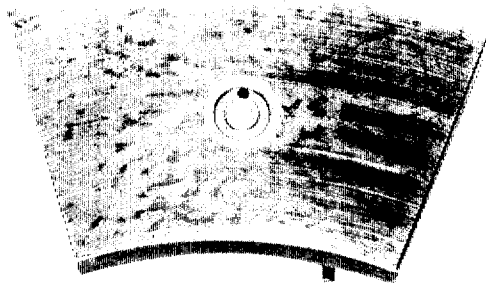


Fig.1 Abrasive surface of thrust pad

나) 와이핑(Wiping)

Wiping은 미끄럼 운동을 하는 두 표면 사이의 접촉에 의해 베어링 표면이 손상된 형태이다.

표면상으로 베어링 성능에는 큰 영향을 주지 않는 wiping은 순간적인 과하중(overload)이나 윤활유의 부족으로 인하여 발생한다. 만일 과하중이나 윤활유 부족이 장기간 지속되면, 심한 표면 손상을 야기하게 된다. Wiping 손상은 흔히 베어링-로터의 축정렬불량(misalignment)에 의해 주로 발생된다. Wiping 손상에 대한 방지책은 과하중이 발생하지 않도록 설계, 윤활유의 원활한 공급 및 misalignment 상태가 되지

않도록 하는 것이다. 베어링이 wiping에 의해 경미한 손상을 받았을 경우에는 래핑(lapping)이나 스톤닝(stoning) 등의 방법으로 복구하고 심하게 손상을 받았을 경우에는 베어링을 교체한다.



Fig.2 Wiping surface

2-2 탈색(Discoloration)

가) 주석 산화물 손상(Tin oxide damage)

손상은 주석을 포함하는 베어링 메탈에서 발생하며, 고온, 고압하에서 윤활유와 염수 등과 전기 화학적 반응에 의해 발생하는 현상이다. 손상형태는 베어링 메탈 표면에 단단하고 어두운 갈색이나 검은 막으로 보이는 층으로 되어있다. Fig.3은 주석 산화물 손상을 받은 베어링 표면상태를 보여준다.

윤활유가 오염되었을 경우, 윤활유를 교체하고 윤활유가 고온, 고압 상태가 되지 않도록 윤활유의 온도를 잘 조절한다. 손상된 표면은 래핑(lapping)이나 스톤닝(stoning) 등의 방법으로 복구한다.

나) 과열(Overheating)

순간적 또는 지속적인 마찰에 의한 발열 현상에 기인하여 베어링 표면이 변색, 손상 및 변형된 형태이다. 과열에 의한 변색은 윤활유 내에 있는 각종 첨가제가 고온상태에서 베어링 면에 접촉되어 발생한다. 반복적인 열에 의해 thermal ratcheting을 만들 수 있다. Fig.4는 thermal ratcheting된 베어링의 상태를 보여주고 Fig.5는 과열된 베어링 표면을 보여주고 있다. 과열은 축정렬 불량(misalignment), 베어링 틈새의 작아짐, 고하중 상태, 부적당한 윤활유 공급, 단속된 유막의 형성 등에 의해 발생할 수 있다.

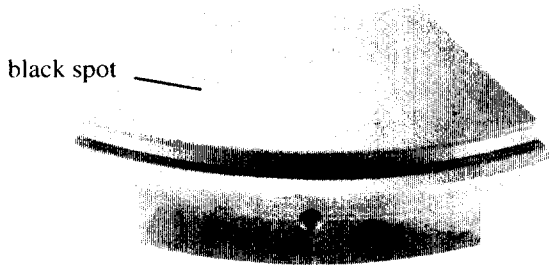


Fig.3 Tin oxide damage

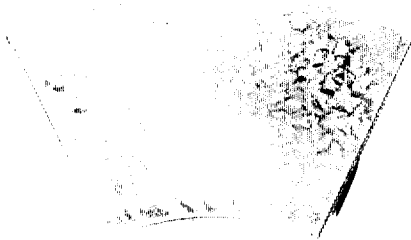


Fig.4 Thermal ratcheting

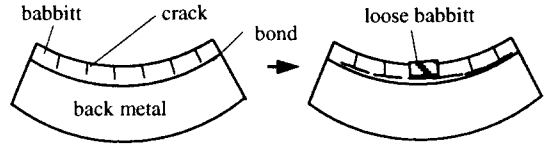


Fig.5 Overheated bearing

2-3 피로(Fatigue)

피로에 의한 손상은 베빗(babbitt)에서 헤어크랙(haircrack)으로 나타난다.

피로에 의한 손상은 반복적인 하중의 변화에 의해 표면 또는 표면하의 균열에 의해 발생하며, 이 균열이 성장하여 결과적으로 베어링 표면의 일부가 떨어져 나가게 된다. Fig.6은 babbitt의 피로 손상 메카니즘을 도식적으로 나타내었다. 초기에 발생한 크랙은 점점 성장하여 결합선(bond line)까지 성장한 후 방향을 바꾸어 점점 성장하여 결국에는 Fig.6(b)와 같이 베어링 조각이 떨어져 나가게 된다. Fig.7은 피로에 의해 파손된 베어링의 상태를 보여준다.



(a) Initial fatigue

(b) Fracture of babbitt by fatigue

Fig.6 Mechanism of fatigue

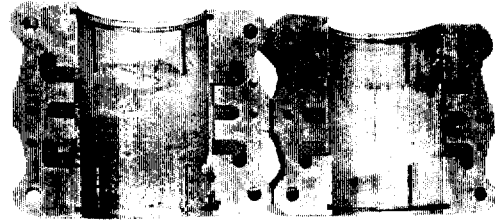


Fig.7 Fatigue of journal shell

흔하지는 않지만 어떤 베어링에서는 운전 중 결합파괴(bond failure)가 발생된다. 이것은 babbitt과 back metal을 완전히 분리하는 것을 의미한다. 높은 온도에서 babbitt은 결합선(bond line) 근처에서 녹을 수 있고, 그 후 동적 하중 효과에 의해서 babbitt은 분리된다.

피로손상과 결합파괴는 비슷한 손상 형태를 나타내는데 이들은 각각 다음과 같이 구분된다. 결합파괴(bond failure)는 back metal이 노출되어 babbitt과 완전히 분리되는 반면에 피로손상된 베어링은 작은 babbitt층이 back metal에 잔존하여 붙어있다.

2-4 공동(Void)

가) 전기적 피팅(Electrical pitting)

이는 베어링과 저어널 면 사이의 전류의 흐름, 즉 두 면 사이에서 발생하는 스파크(spark)에 의해 기인되며, 통상 유막이 가장 얇게 형성되는 위치에서 발생한다. 피팅이 진행되면 베어링 표면에 구멍이 나는 형태의 손상이 발생하게 된다. Fig.8은 전기적 피팅에 의해 손상된 베어링의 형상을 보여준다. 피팅손상은 흔히 윤활유를 검게 하고, 이물질(debris)을 생성시킨다.

전기적 피팅은 윤활유, 구동벨터 및 충돌입자 등에 의한 정전기적 전류(electrostatic shaft current) 또는 자성을 띤 요소들의 회전에 의한 전자기적 전류(electro magnetic shaft current)에 의해 발생하는데 후자에 의한 손상이 더 심할 수 있다.

전기적 피팅을 제거하기 위해서는 다음과 같은 방법이 있다. 정전기적 전류는 접지 부러시(grounding brush)를 이용한 접지, 베어링 절연 등을 통해 제거할 수 있으며 전자기적 전류는 영향을 받는 요소의 자성을 제거하여 없앨 수 있다. 또한 오일의 교환, 오일 저장소 및 파이프(piping)의 세척 등의 방법이 있다.

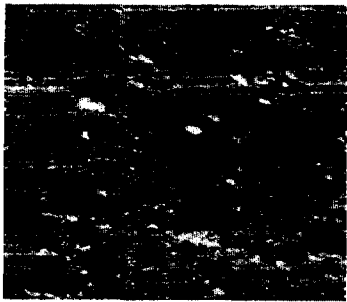


Fig.8 Electrical pitting by high current

나) 캐비테이션 침식 (Cavitation erosion)

캐비테이션에 의한 손상은 캐비테이션 침식(cavitation erosion)이라 불리며, 이는 유막내 기체 상태 공동(vaporous cavities)의 갑작스런 파괴로 인한 충격으로 윤활면에 생기는 변형이나 손상이다.

Fig.9는 캐비테이션에 의해 손상된 베어링 표면 상태를 보여준다. 오일은 발산하는 베어링 영역에서 캐비테이션이 되어 증기방울을 발생시킨다. 증기방울은 압력이 오일의 포화압력 이상으로 증가될 때 파괴되고 이때 베어링 표면을 손상시키게 된다. 캐비테이션을 방지하기 위해서는 베어링 그루브의 변경, 베어링 간극 감소, 베어링 원호 감소, 윤활유 유량 증가, 윤활유 공급압력 변경 등이 있다.

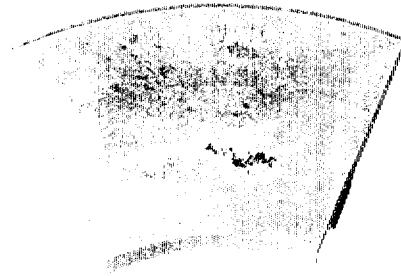


Fig.9 Cavitation erosion in babbitt

다) 부식(Corrosion)

부식은 화학적 작용에 의해 베어링 표면을 폭 넓게 손상되는 현상으로서 주로 격자형 무늬 형상으로 나타난다. 부식에 강한 부분은 건전하고 부식에 취약한 부분은 화학적으로 손상되어 넓게 퍼진 녹(rust)이나 피팅된 것처럼 보인다. Fig.10은 부식에 의해 손상된 베어링 표면상태를 보여준다.

부식은 윤활유 첨가제, 각종 산화물, 윤활유 내에 포함된 수분이나 냉각제의 유입 등에 의해 발생된다. 부식을 방지하기 위해서는 부식이 발생하지 않는 윤활유 첨가제의 사용, 각종 산화물, 수분 및 냉각제 등이 베어링 하우징(housing)에 유입되지 않도록 밀봉하고 오염된 윤활유의 교체 등을 통한 방법이 있다.

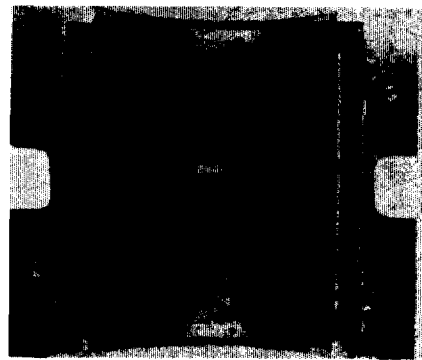


Fig.10 Corrosion in bearing

3. 손상 분석 및 절차

손상분석은 기계 장치의 결함을 지적하고 그 발생주기를 줄이기 위해 이용된다.

그리고 손상 상태의 분석을 통해 손상원인을 결정하고, 대응책의 제시를 통하여 손상으로 야기되는 비용손실을 줄이거나 제거할 수 있다.

유동압 베어링의 손상은 베어링 간격, 오일의 열화, 이물질(debris)의 침입, 축정렬 불량, 조립 불량 등의 여러가지 원인에 의해 야기될 수 있으며 그 원인에 따라 손상형태도 각각 달라진다. 따라서 각각의 손상형태 분석하여 그 손상원인 파악 및 손상 방지책의 제시를 통하여 차후에 발생 가능한 원인들을 제거할 수 있다.

베어링의 손상분석을 위한 일반적인 단계는 문제의 성질에 따라 달라질 수 있다. 다음 절차는 산업계에서 통상적으로 사용되는 베어링 손상 분석 단계를 나타낸다.

Step 1 손상된 요소의 육안 조사

베어링이 손상되었을 때 가장 먼저 해야 할 조사는 손상된 요소를 분해하여 그 상태를 조사하는 것이다. 이때 모든 세부 사항을 놓치지 않도록 주의해야 한다. 육안조사는 손상분석의 첫번째 단계로서 빠른 결론을 내려고 서두르지 않고 자세히 조사해야 한다. 종종 손상의 진짜 원인을 모르고 간과할 수도 있다.

Step 2 사진 기록

이것은 차후의 참고자료로서 이용될 수 있는 중요한 기록이 되고 베어링 손상에 대한 영구적인 비교자료가 되며 육안조사에서 빠뜨린 사항을 알 수 있게 한다. 손상형상을 전체적으로 보기 위한 사진분석과 SEM, TEM등을 통한 사진 분석방법이 있다.

Step 3 실험 분석

오일 샘플(oil sample)은 오일이 사양범위 내에서 사용될 수 있는가를 검사하기 위하여 분석된다. 또한 babbitt속에 박혀 있는 이물질의 입자 분석을 통해 이물질의 발생지나 그 발생 원인에 대한 정보를 제공한다.

Step 4 거시적인 조사(운전환경)

오일 배출온도, 베어링 표면 온도, 진동, 유막 압력 그리고 손상을 진행시킬 수

있는 모든 운전 데이터를 구한다. 베어링 손상 이전의 운전이력(history), 유지보수 등에 관한 정보 등은 보다 정확한 결론을 유출할 수 있다.

Step 5 손상의 재구성

손상을 유추할 수 있는 하나 이상의 시나리오가 있을 수 있다. 초기에 손상의 원인에 대한 가능성이 잡힌다면 다음은 그 원인에 대한 확인 작업이 이루어져야 한다.

Step 6 손상 원인 제거

수정이 요구된다면, 그 수정이 다른 문제를 야기하지 않는다는 조건하에서 적절한 방법과 일련의 조치로써 손상 원인을 제거하고 필요한 부분을 수정한다.

Step 7 최종보고서 작성

손상분석은 문서를 이용하여 최종 정리한다. 보고서는 손상이 생길 때의 운전조건, 손상모드를 설명하는 사진이나 그림, 배경 데이터 등을 기록한다.

4. Wiping 손상 베어링의 특성

운전 중 터빈베어링의 babbitt표면에 wiping 손상에 의한 검은색의 흔적이 발견됨에 따라 손상부위에 대한 기계적인 특성과 화학적 특성을 측정, 분석하였다.

4.1 기계적 특성

가) 육안 검사

손상된 터빈 베어링의 형상은 Fig.11과 같다. Fig.11에서 보든 바와 같이 베어링 중심부에서 검은 부분이 관찰되었다. 검은 부분을 중심으로 Fig.11의 A위치에서 40x360x70mm의 block를 채취하였다.

나) 표면상태

Fig.12는 각각 건전부위 및 손상 부위에서 AES(Auger Electron Spectroscopy)로 관찰한 표면 상태를 보여주고 있다. Fig.13은 상기 각 부위의 깊이별 재질특성을 나타낸다. Fig.13(a)에서 알 수 있듯이 건전부에서 Carbon은 표면 깊이에 따라 큰 변화가 없는 반면에 Fig.13(b)의 손상 부위에서는 표면부에서 탄소(carbon)가 다량

검출되었으며 표면에서 50Å까지는 감소하다가 일정한 경향을 나타내었다. 이를 통해 wiping손상에 의해 검게 된 표면두께는 50Å 정도인 것으로 추정된다.

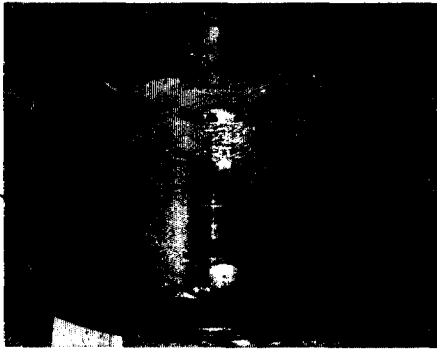
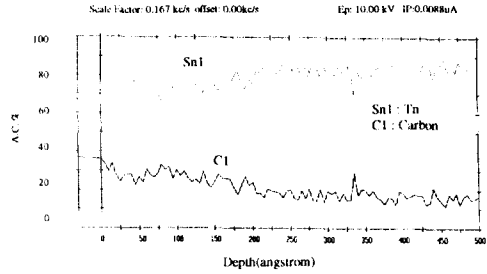
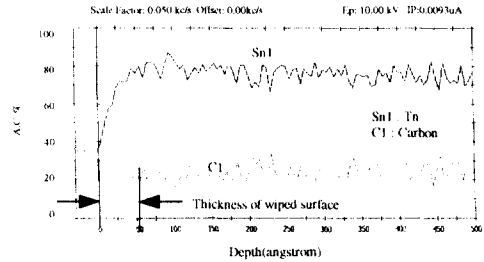


Fig.11 Turbine Bearing by wiping



(a) Normal surface



(b) Wiped surface

Fig.13 Composition of material properties

다) 경도 실험

경도실험은 브리넬 경도 실험법으로서 30 초간 직경 10 mm의 볼(ball)을 시편에 500 kg의 하중으로 가하였고 총 3 회 실시하였다. 건전부와 손상 부위의 경도변화는 표1과 같다. 표1을 통하여 건전부와 검은 부위의 표면 경도변화는 거의 없음을 알 수 있다.

Table1 Comparison of brinell hardness(HB)

No.	1	2	3	Avrg.
Normal surface	23.8	22.8	22.5	22.5
Wiped surface	24.9	23.3	21.8	23.3

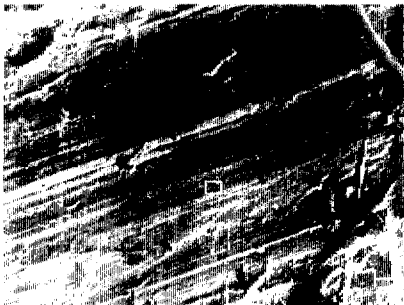
4.2 화학적 특성

표2는 손상부위와 정상부의 화학성분을 측정 한 것이다.

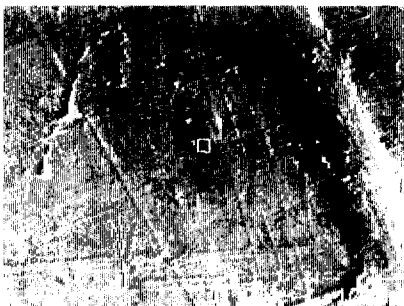
Table2 Composition of normal and wiped surface wt%

ID	Sb	Cu	Pb	As	Br	Fe	Cd	Al	Zn	C	S
Normal Surface	7.50	3.74	0.01	0.01	-	0.02	0.01	0.01	0.01	-	R
Wiped surface	7.47	2.35	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	R

표2를 통해 알 수 있듯이, 손상부위에서 carbon이 미소하게 증가하지만, 베어링



(a) Normal surface



(b) Wiped surface

Fig.12 Picture of AES

성능에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

5. 결론

미끄럼 베어링에서의 손상은 베어링 자체의 결함뿐만 아니라 여러 가지 외부요인에 의해 손상될 수 있으며 손상형태는 각각의 원인에 따라 다양하게 나타난다. 베어링의 손상은 기계 시스템의 성능을 저하시키며 아울러 생산손실을 유발할 수 있다. 따라서 베어링의 손상에 대한 정밀 분석을 통하여 시스템의 안정성과 신뢰성을 평가할 수 있어야 한다.

저어닐베어링에서 wiping 손상이 발생할 경우 babbitt 표면에 윤활유가 소착됨으로써 베어링 면에 carbon이 소착되어 손상 표면이 검게 나타난다. 그러나, 손상 부위는 건진부와 비교하여 유사한 정도치를 가지며, 화학적 성분도 거의 유사함을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Fouad Y. Zeiden, Bernard S. Herbage, "Fluid film bearing fundamentals and failure analysis," Proceedings of the 20th Turbomachinery Symposium, pp.161-186, 1991
2. H. N. Kaufman, "Sliding bearing damage," CRC Handbook of lubrication, Vol.2, pp.477-494, 1984
3. K. F. Dufrance, J. W. Kannel, R.D.Stockwell, "Wear of steam turbine journal bearings and low operating speeds," CS-2281 EPRI, 1982
4. Elwell, H. N., "Foreign object damage in journal bearing," Lubr. Eng. 34, 187, 1978
5. F.T.Barwell, "Bearing system," Oxford university 1979
6. G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, "Engineering tribology," Tribology series, Vol.24, 1993