

자동차용 깊은홈 볼베어링의 조기파손 : 1보 - 파손기구의 규명

현준수 · 박태조*

FAG한화베어링(주)

* 경상대학교 BK21사업단, 항공기부품기술연구센터

Premature Failure of Deep Grooved Ball Bearing for Automobiles : Part 1 - A Failure Mechanism

Joons Hyun and Tae Jo Park*

FAG Hanwha Bearings Corp.

* Gyeongsang Natl. Univ., ReCAPT

Abstract - This paper deals with a premature failure mechanism of deep grooved ball bearing for automobiles. A close examination of used bearings revealed that the premature failure could be arose by dents on the ball. Universal testing machine with specially designed tools is used to simulate the practical dents on the ball and test bearings are assembled with dented balls and new bearing components. The endurance test results showed that the dents on the balls were printed on the races and these phenomena come to premature failure.

Key Words : Deep Grooved Ball Bearing, Premature Failure, Dent, Printing, Failure Mechanism

1. 서론

구름베어링의 수명을 KS규격에서는 구름피로에 의한 재료손상이 발생할 때까지의 회전수가 회전한 총회전수, 일정회전 속도에서는 편의상 시간으로 정의하고 있다. 1950년경에 발표된 Lundberg-Palmgren모델[1-2]에 기초한 피로수명이론은 현재 구름베어링 제조업체에서 뿐만 아니라 ISO, KS, AFBMA, JIS, DIN 등과 같은 규격에서 수명계산의 기초식으로 사용되고 있다. 이러한 피로수명은 산포가 매우 크기 때문에 10%가 파손되는 L_{10} 수명이 대표값으로 널리 사용되고 있다. 하지만 이 시간에 도달하기 전에 10% 정도의 베어링은 파손될 수 있다는 의미이므로 높은 신뢰성이 요구되는 적용조건에서는 보증수명으로 해석할 수 없다.

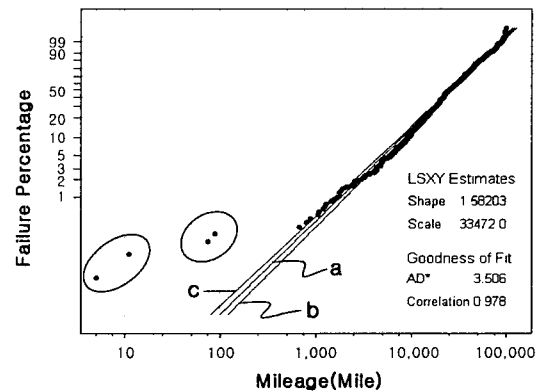


Fig. 1 Weibull plot of rolling bearing system.

구름베어링의 수명은 Fig. 1과 같이 대수값으로 표시되는 Weibull 그래프를 이용하여 나타낼 수 있다. 그림에서 선(a)는 최소제곱법으로 계산된 분포의 추세선, 선(b)와 (c)는

±10% 오차한계를 각각 나타내는 선이다. 하지만 좌측에 원으로 표시된 수개는 조기에 파손된 것으로 통계에 의한 수명예측결과와는 전혀 다른 거동을 보이고 있다. 지금까지 이러한 데이터는 비정상적인 것으로만 간주되었을 뿐 이의 발생원인은 정확하게 규명되지 않고 있다. 하지만 현실에서는 한 개의 베어링파손도 용납되기 어려운 시장상황으로 전개되고 있기에 구름베어링의 조기파손문제는 새롭게 관심의 대상이 되고 있다.

지금까지 구름베어링에서 조기파손을 유발시키는 원인으로 가장 많이 연구된 것은 윤활제의 오염이나 마멸입자에 따른 이물질과 윤활표면에 존재하는 압흔(Dent) 등이다. 윤활제 중에 이물질 등이 함유된 경우에 피로수명이 현저하게 감소하는 것은 이것이 구름접촉면의 표면을 손상시키기 때문이다[3-5]. 또한, 구름베어링 접촉면에서의 압흔의 존재는 압흔 주변의 응력장 및 윤활상태를 열악하게 하여 결과적으로는 조기파손을 유발시킨다[6-8]. 참고로 청정조건에서 사용되는 정상적인 볼베어링의 조기파손 대한 연구결과는 아직 보고되지 않았으며, 지금까지의 압흔에 관련된 부품에 대한 연구에는 대부분 모의시험기를 사용하였다.

Fig. 2는 볼베어링 사용자가 소음이 발생한다고 불만을 제기한 기계장치의 소음발생원인을 대략적으로 조사한 결과로서 가장 주된 원인은 압흔이고 다음으로 비정상적인 치수변화, 이물질, 녹 등의 순서였다[9]. 이와 같이 구름베어링이 장착된 기계장치는 문제가 발생할 때까지 일반적으로 분해하지 않기 때문에 조기파손은 베어링의 초기상태와 매우 밀접한 관련이 있을 것으로 예상할 수 있다. 하지만 체계적인 원인규명이 없이 단지 사용상의 실수로 취급되고 이의 방지법을 강구하는 수준에 머물고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 내부부품에 의한 압흔의 발생과 이로 인한 조기파손과의 관계를 실험적으로 규명하고자 한다. 이를 위하여 조기파손된 볼베어링 샘플을 분석하여 압흔의 발생기구를 추정한 후 제작한 시험용 베어링을 수명시험기를 사용하여 시험하였다.

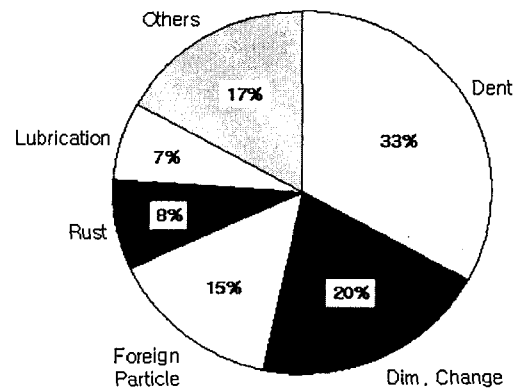


Fig. 2 Cause analysis results of noisy bearings[9].

2. 조기파손 베어링의 분석

본 논문에서는 깊은홈 볼베어링의 볼에 압흔이 생길 수 있는 가능성을 제시하기 위하여 축방향 하중을 받는 상태에 대한 케도륜의 턱모서리와 볼에서의 응력분포를 Fig. 3에 개략적으로 나타내었다. 즉, 과도한 축방향 하중은 볼과 내륜 턱면이 접하는 곳(화살표로 표시)에 큰 응력집중을 유발시키므로 여기서 압흔이 쉽게 발생할 수 있다.

이러한 가능성을 조사하기 위하여 승용차와 소형트럭의 기어박스용으로 사용되는 깊은홈 볼베어링의 조기파손된 샘플을 수집하여 분석하였다. 이 베어링은 내·외경이 각각 25.0mm와 68.0mm이고 폭은 18.0mm인 중형 베어링이다.

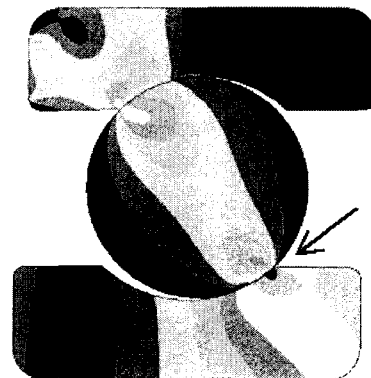


Fig. 3 Schematics of dent formation under axial load.



Fig. 4 Inner ring of failed bearing.

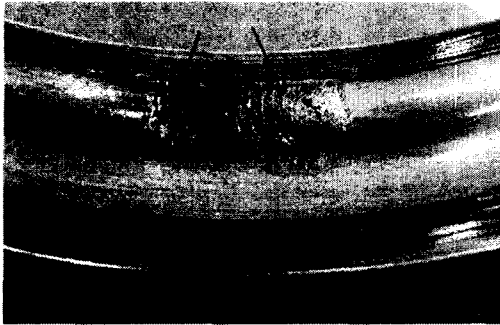


Fig. 5 Outer ring of failed bearing.



Fig. 6 Ball of failed bearing.

Fig. 4는 내륜의 사진으로 궤도부의 전체적
에 걸쳐서 파손이 발생하였으며, 부하측의 궤
도 한쪽편으로는 턱부까지 과도하게 마멸되었
다. 즉, 그림에서 B면에 비하여 A면이 매우
얇아진 것은 편측하중이 작용하는 사용조건
때문으로 추정되며, 파손의 정도는 국부적인
플레이킹(Flaking) 단계를 넘어선 총체적인 마
멸파손이었다. 한편, 외륜에서는 내륜과는 달
리 부분적인 플레이킹 형태의 파손과 함께 이
주변에 여러 개의 압흔이 관찰되고 있으며

(Fig. 5), 볼에서는 내륜의 경우와 동일하게
전체에 걸쳐서 재료가 탈락되었을 뿐만 아니
라 부분적으로는 파임(Ploughing)도 보이고
있다(Fig. 6). 이상과 같이 조기파손된 베어
링에서 미끄럼흔적(Skid mark)과 입자에 의한
연삭마멸 등의 복합적인 마멸흔적이 모두 관
찰되었다. 특히, 내·외륜의 궤도면에는 플레이
킹과 함께 많은 수의 눌린 형태의 압흔이 플
레이킹 주변부 뿐만 아니라 여기서 떨어진 곳
에서도 발견되었다. 각 부품의 치수변화를 측
정한 결과, 내륜은 반경 및 축 방향으로 $143\mu\text{m}$
와 $518\mu\text{m}$ 로 아주 크게 나타났으며, 외륜은 반
경방향으로는 무시할 수 있는 수준이었으나
축방향으로는 $117\mu\text{m}$ 정도였다. 또한, 볼은 직경
이 $221\mu\text{m}$ 정도 줄어들어 큰 변화를 보였다.

이상에서 제시한 이러한 파손양상은 이물질
에 의한 것이 아니라 볼베어링 부품의 손상으
로 인하여 발생한 것으로 판단된다. 즉, 과도
한 축방향 하중으로 인하여 내륜 턱면에 접하
는 볼에 압흔이 생성되고 이 압흔이 베어링의
운전에 따라 궤도면으로 전사되어 조기파손에
이르게 한 것으로 추정된다.

3. 시험용 베어링의 제작 및 시험장치

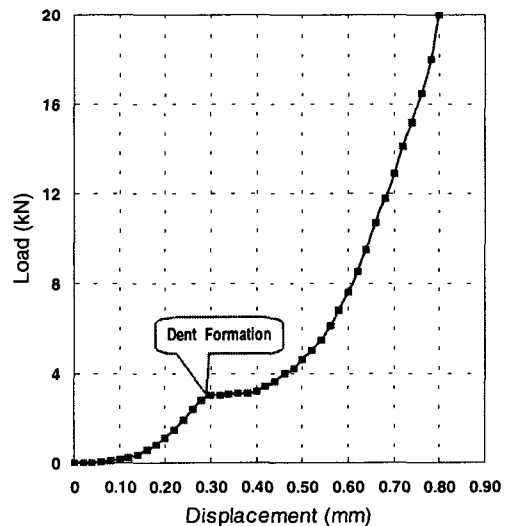


Fig. 7 Applied load vs. axial displacement.

앞에서 분석한 조기파손에 대한 원인을 규

명하기 위하여 표면에 압흔이 있는 볼과 이를 사용한 시험용 베어링을 제작하여 시험하고자 한다.

베어링의 장착이나 작동 중에 생성될 수 있는 압흔과 형태가 동일한 압흔이 있는 볼을 제작하기 위하여 ISO 6303 깊은홈 볼베어링을 사용하였으며, 윤활조건을 균일하게 하기 위하여 그리이스를 봉입하고 밀봉형태로 제작하였다. 또한, 손상정도를 쉽게 확인할 수 있도록 분해가 용이한 플라스틱 리테이너를 채용하였다. 다음으로 특별히 고안된 치구를 만능시험기에 설치하고 하중을 작용시키면서 축방향 변위량을 측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 중간의 변곡점을 시작으로 축방향 변위량이 증가하는 것은 이 부근에서 압흔이 발생하였기 때문인 것으로 추정된다. 특히, 변곡위치에서의 축방향 하중은 3.5kN 정도로 이는 계산으로 구한 베어링의 축방향 내하중과 거의 일치하였다.

하중을 작용시킨 베어링은 분해하여 내·외륜은 폐기하고 볼만 추출한 후 초음파 세척기로 표면의 이물질을 제거하였다. 다음으로 압흔이 있는 볼만 골라서 신제품인 케도륜 등과 조합하여 시험용 베어링을 제작하였다. 이때, 볼압흔의 크기를 고려하여 베어링의 반경방향 틈새는 보통급 틈새보다 큰 30~40 μ m의 내부 틈새가 되도록 내·외륜의 치수조합을 선정하였다. 조립된 시험용 베어링은 다시 초음파 세척과정을 거치고 시험후에 분해·조립을 쉽게 하기 위하여 플라스틱 리테이너를 채용하고 그리이스를 주입한 후 시일로 밀봉하였다.

압흔이 있는 볼을 가진 시험용 베어링은 Fig. 8에 나타난 FHBC형 볼베어링 수명시험기로 시험하였다. 시험기 상부에 설치된 유압 액츄에이터(Actuator)로 시험기 축의 좌·우에 2개씩 장착된 4개의 시험베어링(#1-#4)에 하중을 가한다. 이때, 2부분으로 분리된 하우스징 구조는 가운데 2개의 베어링(#2, #3)은 유압 액츄에이터에 의해 위로 끌어올려지만 양단의 베어링 2개(#1, #4)는 하우스징 실린더 안에 고정된다. 한편, 이들 4개의 베어링은 동일축에 설치되기 때문에 각 베어링에는 같은 하중이 작용한다.

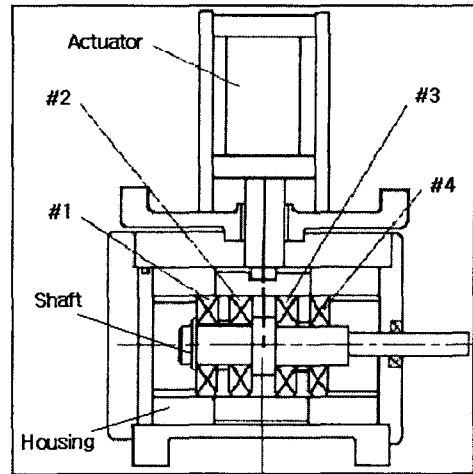


Fig. 8 FHBC type bearing endurance life tester

시험하중은 정격하중의 25%인 3.48kN을 반경방향으로 작용시키고 내륜의 회전수는 2,900rpm으로 하였다. 목표시험시간은 1,300시간으로 이는 계산 L_{10} 수명의 약 3.5배에 상당하며 이를 표준 Weibull 기율기로 계산하면 L_{50} 수명에 상당한다. 따라서, 본 시험조건에서 베어링이 1,300시간 이상의 수명일 경우에 정상적인 피로파손으로 분류할 수 있다고 판단하였다.

베어링의 파손으로 크게 진동이 발생하거나 목표시험시간에 도달하였을 때 시험기를 정지시키고 시험시간을 기록하였다. 시험이 완료된 베어링은 외관을 조사하고 이상이 없으면 시일, 그리이스, 리테이너 순으로 베어링을 분해한 다음 내륜, 외륜, 볼, 리테이너의 손상유무를 정밀하게 조사하고 파손부위를 기록하였다. 또한, 수명시험에 따른 베어링강의 조직변화를 조사하기 위하여 현미경으로 금속미세조직을 관찰하였으며, 피로정도를 확인하기 위하여 X-선시험기로 잔류응력 등을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 1.에는 시험베어링중에서 파손된 9개 베어링의 파손부품에 대한 초기의 볼 압흔의 평균크기와 평균파손시간을 나타내었다. 파손

유형은 볼만 파손된 경우, 내륜만 파손된 경우, 내륜과 볼이 파손된 경우의 3가지가 있었으나 외륜이 파손된 경우는 발견되지 않았다. 시험베어링 중에서 볼만 파손된 결과는 압흔의 크기가 $4.07\mu\text{m}$ 로 가장 큰 경우로 수명도 20시간으로 가장 짧았다. 내륜만 파손된 경우와 내륜과 볼이 함께 파손된 경우의 시험전 압흔의 평균크기는 $2.33\mu\text{m}$ 와 $3.56\mu\text{m}$ 이고 각각의 평균수명은 526시간과 490시간이었다.

본 수명시험에서는 압흔이 볼에만 있는 베어링을 사용하였기에 볼만 파손되는 경우가 다수일 것으로 예상하였지만 결과는 초기에 압흔이 전혀 없었던 내륜이 파손된 경우가 더욱 많은 것이 주목할만하다. 이와 같이 초기에 압흔이 있는 볼보다 궤도륜(내륜)에서 플레이킹이 많이 발견된 연구결과는 아직 보고되지 않은 새로운 결과이다.

Table 1. Summary of endurance life test.

Flaked part	Number of bearings	Initial dent size (μm)	Operating hours
Ball	1	4.07	20
Inner ring & ball	4	3.56	490
Inner ring	4	2.33	526

Fig. 9는 파손된 베어링의 내륜에 대한 사진으로 플레이킹이 발생하였으며, 플레이킹 주변뿐 아니라 전면에 걸쳐서 많은 수의 압흔이 발견되었다. 특히, 압흔은 플레이킹이 많이 진행된 베어링일수록 발생정도가 심하게 나타났다. 한편, 외륜의 궤도면에는 플레이킹 발생은 없었지만 볼 궤적부를 확대한 Fig. 10에서 많은 수의 압흔이 선명하게 나타나고 있다. Fig. 11은 파손된 베어링의 내륜의 압흔주변을 100배 확대한 사진으로 화살표는 단차에 대한 윤곽을 나타내며, "A"로 표시된 부분은 판상의 압흔이다. 이러한 형상의 압흔은 궤도륜의 플레이킹부에서 생성된 파편이 베어링 내에서 볼과 궤도륜에 의해 눌러서 생성된 것으로 추정된다. 실제로 파손베어링에서 생성된

플레이킹 파편은 크기가 수 μm 에서부터 수백 μm 의 범위까지 넓게 분포되어 있으므로 플레이킹이 발생하면 이러한 형태의 눌림현상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

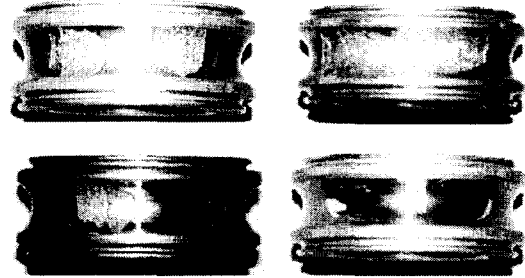


Fig. 9 Inner races track of tested bearings.

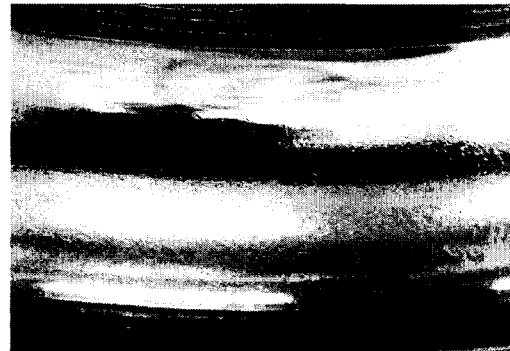


Fig. 10 Outer race track and dents.

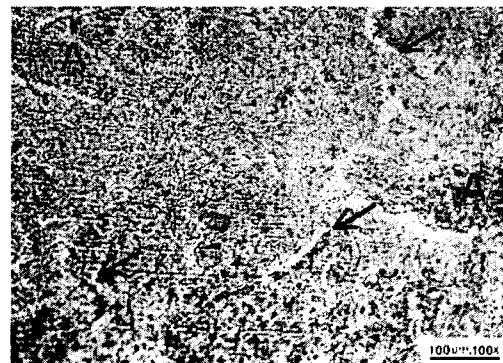


Fig. 11 Inner race track surface of failed bearing.

시험한 베어링의 궤도표면에서부터 표면하부에 대한 X-선시험결과인 잔류응력과 잔류오오스테나이트의 변화를 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. 분석한 베어링의 내륜은 216

시간 시험후에 파손된 베어링, 1,360시간 시험 후에도 파손현상이 관찰되지 않은 베어링, 그리고 시험하지 않은 신품베어링의 내륜 등 3종이었다. 이 결과, 표면하부의 잔류응력과 잔류오스테나이트는 베어링의 파손여부와는 관계없이 베어링의 시험시간에 따라서 모두 변화폭이 커졌다[11]. 이러한 결과는 216시간 시험후에 파손된 베어링은 피로파괴가 아닌 비정상적인 원인에 의해서 파손된 것임을 의미한다. 즉, 베어링 재료의 피로축적정도는 216시간 시험후에 파손된 경우가 1,360시간 동안에도 파손되지 않은 경우에 비해 매우 작은 사실에서 알 수 있다.

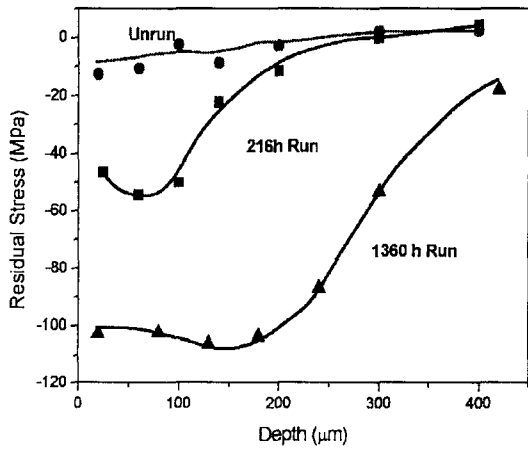


Fig. 12 Residual stress in tested bearing.

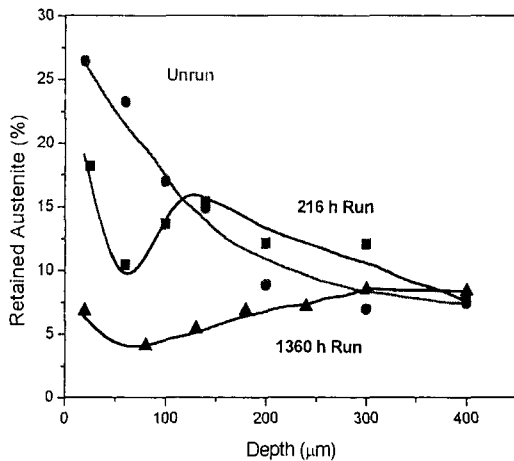


Fig. 13 Retained austenite in tested bearing.

일반적으로 피로가 진전되면 베어링표면 하부에 흰색띠(White band)라는 변형조직이 생성된다. Fig. 14와 Fig. 15는 시험한 베어링에 대한 미세조직사진을 각각 나타낸 것으로 Fig. 14의 216시간 운전한 후에 파손된 베어링에서는 크랙 주변과 궤도하부에서 재료의 조직변화가 관찰되지 않는 반면에 Fig. 15의 1,360시간 운전된 경우에는 표면하부에 변형조직이 존재함을 확인할 수 있었다. 즉, L_{10} 수명의 3배 이상인 1,360시간 운전된 시험편의 미세조직사진에서 재료의 피로축적이 확인되므로 216시간 작동후에 파손된 베어링의 파손원인은 피로파괴가 아니라는 것을 알 수 있다.



Fig. 14 Micro structures (Failed at 216 hours).

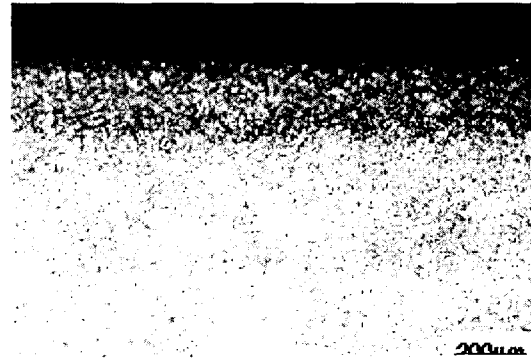


Fig. 15 Micro structure (Unfailed until 1360 hours).

이상의 결과로부터 깊은홈 볼베어링의 조기 파손은 베어링의 장착이나 운전중에 볼에 생성된 압흔이 원인이라는 사실을 처음으로 규

명하였다. 그리고, 내륜이 많이 파손되는 것은 압흔이 베어링의 운전에 따라서 궤도면으로 전사[11]되고 이곳이 볼과 접촉이 많기 때문이다.

5. 결론

볼베어링의 조기파손을 확인하기 위한 압흔을 갖는 볼로 만들어진 깊은홈 베어링의 성능 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 압흔이 있는 볼과 신품인 궤도륜을 조합하여 제작된 시험베어링은 내륜 > 볼 > 외륜의 순서로 파손도가 심하였다. 이는 초기에 압흔이 있는 볼로 제작된 베어링이기에 볼이 많이 파손될 것이라는 예상과는 다른 새로운 결과이다.
- 2) 파손된 베어링의 내·외륜의 궤도면에서는 플레이킹 마멸파편에 의한 눌림자국이, 파손되지 않은 베어링의 구름면에서는 볼의 압흔이 전사된 자국이 각각 관찰되었다.
- 3) X-선 잔류응력시험과 미세조직사진의 결과는 조기파손이 재료내부에서 발전되는 피로파손 형태가 아닌 압흔에 의해서 재료표면으로부터 시작되는 표면기점형태의 파손임을 증명하고 있다.

후 기

본 논문의 일부는 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lundberg, G. and Palmgren, A., Dynamic Capacity of Rolling Bearing, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series 2, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, No.3, 7, 1947.
2. Lundberg, G. and Palmgren, A., Dynamic Capacity of Roller Bearing, Acta

- Polytechnica, Mechanical Engineering Series 2, Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, No.4, 52, 1952.
3. Hamer, J. C., Sayles, R. S. and Ioannides, E., Deformation Mechanisms and Stresses Created by Third Body Debris Contacts and Their Effects on Rolling Bearing Fatigue, Pro. of the 14th Leed-Lyon Sympo. on Tribology, 1987.
4. Moyer, C. A., The Influence of Debris on Bearing Performance : Chapter II, SAE Paper 891906, 1989.
5. Tallian, T., Prediction of Rolling Contact Fatigue Life in Contaminated Lubricant : Part II - Experimental, Trans. ASME, J. of Lub. Tech., pp.384~392, 1976.
6. Sayles, R. S. and Ioannides, E., Debris Damage in Rolling Bearings and its Effect on Fatigue Life, Trans. ASME, J. of Tribology, Vol.110, pp.26~31, 1988.
7. Cheng, W., Cheng, H. S. and Keer, L. M., Experimental Investigation on Rolling /Sliding Contact Fatigue Crack Initiation with Artificial Defects, STLE Tribology Trans., Vol.37, pp.1~12, 1994.
8. Kozalas, M. N. and Harris, T. A. S., Fatigue Failure and Ball Bearing Friction, STLE Tribology Trans., Vol.43, pp.137~143, 2000.
9. Hyun, J. S. and Back S. H., A Report for Field Claim Analysis, FAG-Hanwha Bearing Corp., 2001.
10. Voskamp, A. P., Osterlund, R., Becker, P. C. and Vingsbo, O., Gradual Change in Residual Stress and Microstructure during Contact Fatigue in Ball Bearings, Metals Tech., pp.14~21, 1980.
11. 현준수, 박태조, 볼베어링의 압흔전사현상에 대한 고찰, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.928-93, 2003.