

수윤활 볼베어링의 리테이너 설계 특성

이재선[†] · 최 순 · 김지호 · 박근배 · 지성균

한국원자력연구소

Design Characteristics for Water Lubricated Ball Bearing Retainer

Jae-Seon Lee[†], Suh-Choi, Ji-Ho Kim, Keun-Bae Park and Sung-Quon Zee

Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract – Deep groove ball bearing is installed in a control element of an integral nuclear reactor, where water is used as coolant and lubricant. This bearing is made of STS440C stainless steel for the raceways and the balls to use in radioactive environment and water. It is known that the retainer design affects ball bearing operability and endurance life, however there is no verified retainer design and material for water lubricated ball bearing. Four kinds of retainers are manufactured for the endurance test of water lubricated deep groove ball bearing. Three of them are commercially developed types and the other is designed for this research. It is verified that ball bearings with steel pressed and general plastic retainer can not survive to required life in the water, however bearings with machined type and cylinder type retainer can survive. This proves that one of the major design parameters for water lubricated ball bearing is retainer type and material. In this paper, experimental research of endurance test for water-lubricated ball bearing are reported.

Key words – ball bearing, retainer, reciprocating tribometer, water lubrication, endurance life.

1. 서 론

상용의 원자로로는 고온의 증기를 발생시켜 전력을 생산하는데 주로 이용되었으나, 최근에 들어서 해수를 담수화하거나 지역난방용 및 수소 생산 에너지원으로 그 이용 영역을 다변화하고 있다. 원자로를 이용하여 고온의 증기를 얻기 위해서는 핵연료가 장착된 원자로심에서 고온, 고압으로 가열된 일차냉각수를 증기발생기에 통과시켜 이차냉각수를 고온 증기로 변환하게 된다. 원자로에는 일차냉각수를 원자로 내에서 순환시키기 위한 냉각재펌프, 원자로의 출력을 제어하기 위하여 노심의 반응도를 제어하기 위한 제어봉구동장치가 설치된다. 일체형원자로로는 증기발생기, 냉각재펌프 및 제어봉구동장치 전체를 원자로 압력경계 내에 모두 위치시키는 구성을 갖도록 하여 외부 배관의 파단성을 제거하여 원자로 안전성이 증가하도록 설계하고 있다. 제어봉구동

장치는 노심 출력의 미세 제어를 위하여 볼스크류를 구동하여 제어봉을 노심 내로 삽입, 인출시키도록 하고 있으며, 구동모터 및 볼스크류를 포함한 구동부는 볼베어링으로 지지된다.

일체형원자로에 사용되는 볼베어링은 120°C의 고온 환경 뿐 아니라 15 MPa의 고압 환경에서 운전되기 때문에 시일 등을 이용한 밀봉형 베어링의 적용이 불가능하다. 따라서 그리이스 윤활이 불가능하고, 원자로 내부 냉각수에 베어링 윤활에 필요한 윤활 성분을 포함시킬 수 없기 때문에 증류수에 가까운 원자로 냉각제만으로 운전되어야 하므로 수윤활 상태에서의 볼베어링 특성 검증이 요구된다.

수윤활에 사용되는 베어링은 내식성과 윤활성이 우수한 세라믹 또는 고분자 소재가 널리 사용되고 있다[1-4]. 그러나 방사선 환경 내에서 고분자 소재는 열화되어 내구성이 보장되지 않아 사용이 제한되고, 세라믹 소재도 순수 그래파이트 외에는 사용 가능성이 검증되어 있지 않다. 반면에 스테인레스 강은 수분, 증기, 알칼리 용

[†]주저자 · 책임저자 : leejs@kaeri.re.kr

액, 현상액 또는 산에 대해 내구성을 지니고 있으며, 특히 STS440C 강은 방출가스가 적고 경화층 하에서는 약 400°C까지도 운전이 가능할 뿐 아니라 방사선 분위기에서도 사용이 가능한 것으로 검증되어 있다. 그러나 STS440C 소재 자체의 윤활 특성은 수윤활 특이 고온 환경 하에서 세라믹이나 고분자 소재에 비해 열악하기 때문에 조기 파손이 발생할 가능성이 크므로 원자로용 볼베어링으로 적용되기 위해서는 수명에 대한 검증이 요구되고 있다.

베어링의 성능은 강구와 궤도륜 간의 접촉 특성, 강구와 리테이너 간의 상호 간섭, 소재 특성 등에 의해 결정된다. 이중 리테이너 포켓과 전동체 간에 발생하는 마찰은 베어링 동력 손실과 수명 등 베어링 전체의 성능에 큰 영향을 미치게 된다[5]. 따라서 베어링 성능 향상을 위해 여러 형태의 리테이너가 설계 검토되었으며[6], 베어링 적용 조건에 따라 적절한 리테이너 설계가 진행되고 있다.

본 연구에서는 수윤활 환경 하에서 볼베어링의 수명에 미치는 리테이너 형상 영향에 대해 실험적으로 고찰하고, 이의 결과를 검토하고자 한다.

2. 실험 방법

일반적인 깊은 홈 볼베어링은 궤도륜과 강구의 열처리 조건에 의해 약 120°C 이내에서 운전되도록 제작되며, 이는 일반 STB2 고탄소크롬베어링강과 스테인레스강 베어링에 대해 대개 동일하다. 120°C 이상의 고온에서 사용되는 베어링은 베어링 제조 시 열처리 조건을 변경하여 고온 사용이 가능하도록 제작하나 궤도와 강구의 경도가 저하되어 하중지지용량이 감소하게 된다. 일체형원자로 내부의 일차냉각수는 300°C 이상의 고온으로 가열되나 볼베어링이 설치된 제어봉구동장치는 별도의 냉각장치에 의해 냉각되어 120°C 이하에서 운전되므로 일반 스테인레스강 볼베어링의 적용이 가능하다.

선행 연구를 통하여 수윤활 하에서 온도 상승에 따른 베어링 소재(STS440C)의 마찰계수 변화는 160°C 까지 크게 변화하지 않음을 확인하였으며[7], 베어링 회전 토오크의 변화 고찰[8]에서 PEEK 소재를 사용한 강관보강 리테이너를 사용한 경우 상온에서 120°C까지의 온도 상승 시 베어링의 마찰 토오크는 크게 변화하지 않음을 확인하였다. 따라서 일체형 원자로의 제어봉구동장치에 사용되는 스테인레스강 깊은 홈 볼베어

링 소재의 마찰특성과 내구성에 영향을 주는 인자 중 궤도륜과 강구 접촉부의 온도변화에 따른 마찰, 마모 특성 변화는 베어링 전체 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되며, 그 외의 설계 특성 인자를 고찰하여 수윤활용 볼베어링 개발에 적용하여야 한다.

깊은 홈 볼베어링에 적용되는 리테이너는 가장 일반적으로 강판프레스 리테이너가 사용되고 있으며, 고력 황동 등을 기계가공한 기계가공 리테이너, 윤활성을 보완하고 조립 편의성을 증대시킨 플라스틱 리테이너 등이 여러 종류 개발되어 적용되고 있다.

수윤활용 볼베어링의 설계 인자로는 강구지름, 궤도 홈반지름, 궤도 및 강구의 경도 등 궤도륜과 강구의 설계/재료 변수와 리테이너 형상, 강도 등 리테이너 설계/재료 변수가 있다. 궤도륜의 설계 인자 중 궤도홈반지름은 궤도 윤활에 미치는 영향이 다른 인자에 비해 클 것으로 예측되나 본 연구에서는 궤도륜 및 강구는 기존 일반 볼베어링 상용품을 적용하였으며, 리테이너의 소재 및 형상에 따른 베어링 수명에 대한 영향을 고찰하도록 하였다.

2-1. 시험 리테이너 형상

일체형원자로 기기에 사용 가능한 소재는 수중(원자로 냉각수)에 사용이 가능하고, 방사선에 대해 내성이 있어야 한다. 따라서 일반 볼베어링과는 달리 소재 선정에도 제약이 가해지게 된다. 본 연구에서는 다음 4가지 종류의 리테이너에 대해 수윤활 특성 비교 시험을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

- 1) 일반 강판프레스 리테이너
- 2) 일반 플라스틱 리테이너
- 3) 기계가공형 리테이너
- 4) 실린더형 리테이너

일반 강판프레스 리테이너는 STS304 소재로 제작된 프레스 성형 리테이너이며, 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 일반 플라스틱 리테이너는 양산 베어링에 일반적으로 적용되는 형태로 PEEK 소재로 제작되었다(Fig. 1(b)). 기계가공형 리테이너는 Superple PVX100 소재를 기계가공하여 제작한 후 양 폭면을 강판으로 보강한 리테이너로 Fig. 1(c)와 같다. 실린더형 리테이너는 강도 보안을 위해 내부에 실린더형의 STS304 스테인레스 튜브를 사용하고, 실제 리테이너 역할을 수행하는 외부 실린더로 Superple PVX100 소재 및 IG43 탄소 소재를 사용한 리테이너로 Fig. 1(d)와 같다. 기계가공형 리테이너와 실린더형 리테이너는 전동체 안내를 기

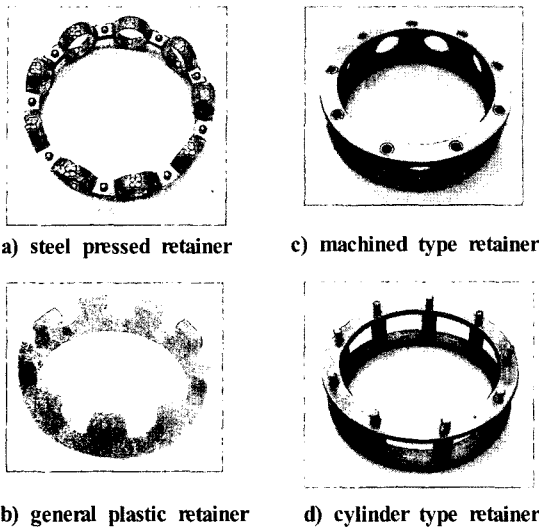


Fig. 1. Retainer types.

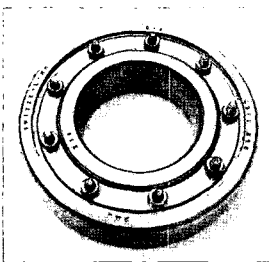


Fig. 2. Assembled bearing.

Table 1. Test conditions

Rotation speed (rpm)	Thrust force (N)	Water temp.	Water pressure
200	500	normal	

본으로 하고, 내륜안내 되도록 설계한다. Fig. 2는 기계가공형 및 실린더형 리테이너가 조립된 베어링의 형상을 나타낸다.

선행 연구를 통하여 온도 변화에 따른 베어링 토크 변화는 크지 않은 것으로 고찰되었으므로 본 연구에서는 상온, 상압 하에서 시험을 수행하도록 한다. 시험에 적용된 운전 조건은 Table 1과 같다.

2-2. 일체형원자로용 베어링의 수명 조건

일반적으로 구름베어링이 하중을 받아 회전하면서, 내륜, 외륜의 궤도면 및 전동체의 전동면은 끊임없이 반복하여 하중을 받으므로 재료의 피로에 따라 플레이

킹이라 불리는 비늘형태의 손상이 궤도면 혹은 전동면에 나타나게 되는데, 이 최초의 플레이킹이 생기기까지의 총회전수를 구름피로수명으로 정의하며, 상당한 정확성을 갖고 예측이 가능하다. 그러나 수운할 볼베어링의 경우에는 일반적인 오일윤활 베어링에 대해 정의된 베어링 수명예측 방법이 적용되기 어렵고, 특히 이물질에 매우 민감하게 반응하기 때문에 플레이킹에 의한 피로손상보다는 표면 결함에 의한 조기 손상이 발생할 가능성이 매우 크다.

시험에 의해 볼베어링의 수명을 검증할 때 베어링에 발생한 최초의 플레이킹 시점을 찾는 것은 불가능하므로, 일반적으로 수명시험 시 발생하는 진동이나 소음을 측정하여 베어링의 파손을 판단하게 된다. 수운할 베어링의 수명 시험에서도 동일한 방법을 적용하여 베어링의 손상을 검증하여야 하는데 본 연구에서는 2개의 베어링을 한쌍으로 하고, 스프링에 의해 가해지는 스트레스 하중 하에서 회전 토크의 변화를 측정하여 베어링의 파손 여부를 검증하도록 하였다. 제어봉구동 장치에 사용되는 볼베어링은 운전 중 베어링의 손상에도 불구하고 원활한 회전이 가능하여야 하므로 회전 토크에 의해 손상 여부를 판단하는 것이 가장 적절하다. 베어링 시험한계 회전 토크는 0.7Nm이며, 이는 회전형 시험기의 비접촉 커플링의 최대 전달 토크에 의해 결정된 값이다.

일체형원자로용 베어링의 정상 운전 회전 속도는 최대 6.7 rpm이나 수명시험 중에는 200 rpm으로 가속시험한다. 회전 속도의 증가에 따라 리테이너 및 강구의 관성이 증가하여 리테이너의 마멸이 증가될 것으로 예측되나, 예비 시험 결과 200 rpm 이하에서는 이의 영향이 비교적 작은 것으로 확인하였다.

베어링의 수명 한계는 기기 특성에 따라 40만 회전으로 설정하였다.

2.3. 시험 방법

수운할 베어링 시험은 Fig. 3에 보이는 고온/고압용 마찰/마모시험기를 이용하며, Fig. 4와 같이 2개의 베어링을 한 쌍으로 하여 코일 스프링으로 스트레스 하중을 가하여 시험한다.

3. 시험 결과 및 고찰

Fig. 1에 보인 것과 같이 4종의 리테이너가 장착된 6208 스테인레스강 볼베어링에 대하여 수명 검증 시험

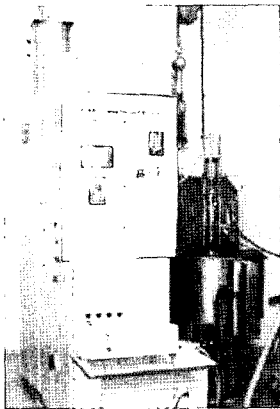


Fig. 3. Photograph of the tribometer system.

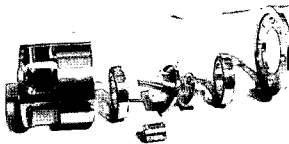


Fig. 4. Test bearing arrangement.

Table 2. Bearing survival results

Retainer type	Survival after 400,000 rev.	Remarks
Steel pressed	×	Early damage and wear (less than 30,000 Revs.)
General plastic	×	Early damage and wear (less than 95,000 Revs.)
Machined type	○	Wear on the retainer contact point
Cylinder type	○	

을 수행하였다. 각 리테이너 형식에 대해 총 40만 누적 회전수에 대한 베어링 생존 결과는 Table 2에 보이는 바와 같다. 요구 회전수를 만족하지 못한 일반 강판프레스 리테이너 및 일반 플라스틱 리테이너 장착 베어링에 대해서는 3회 이상의 검증 시험을 수행하였으나, 모든 경우에 있어 요구 수명을 만족하지 못하고 베어링의 회전 토크가 한계 토크 이상으로 증가하여 시험을 중지하였다. 일반 강판프레스 리테이너의 경우에는 강구와 리테이너 간 과다 마찰의 발생으로 인하여 접촉부에서 심한 마멸이 관측되었으며, 이로 인하여 강구의 공전이 방해되어 회전 토크가 급격히

증가되는 것으로 판단된다. 일반 플라스틱 리테이너의 경우에는 강구와 리테이너 간의 간섭구조가 기계가공형 리테이너의 경우와 유사하지만 리테이너 강성이 부족하여 강구 공전 속도 불일치로 인한 강구 간섭하중을 효과적으로 지지하지 못하여 조기 파손이 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 인접한 2개의 강구 사이에 발생하는 공전 속도 불일치는 리테이너 폭면을 사이에 두고 공전 속도가 낮은 강구를 공전 속도가 빠른 강구가 밀어주어 회전이 가능하지만 3개의 강구가 동시에 밀리게 되는 경우에는 리테이너의 강성이 부족할 경우 가운데 강구가 양 옆의 강구와 접촉된 리테이너 폭면에 끼이게 되어 회전이 불가능하게 되는 것으로 판단된다. 기계가공형 리테이너는 보강 철판에 의해 강성이 보완되어 3개의 강구가 동시에 서로 밀리는 경우에도 가운데 강구가 양 옆의 강구에 동시에 끼이는 현상이 발생되지 않아 요구 수명을 만족하도록 회전이 가능한 것으로 판단된다. 실린더형 리테이너는 3개의 강구가 서로 밀리는 현상이 발생되지 않는 구조이므로 항상 원활한 회전이 보장된다.

본 연구에서 고찰한 모든 리테이너에 있어 강구와 리테이너 접촉점에서는 마멸이 관측되는데 요구 수명을 만족한 실린더형 리테이너의 경우에도 Fig. 5에 보이는 것과 같은 실린더 마멸이 발생하였다. 마멸된 리테이너에서 탈락된 마모분은 강구와 케도륜 접촉부에서 유막의 파괴를 발생시킬 것으로 예측되나, 수윤활 상태에서 리테이너의 마멸을 완전 방지하는 것이 불가능할 것으로 판단되는 바, 유막 파괴 영향을 적게 발생시키고 베어링 밖으로 유출이 원활한 리테이너 소재의 선정이 중요하다.

IG43 및 Superple PVX100 소재를 사용한 실린더형 리테이너 비교 시험에서는 양 소재 모두 마멸이 관측되었으며, 마멸양은 IG43 소재에서 상대적으로 크게 발생하였다.

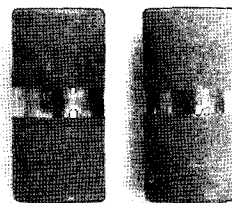


Fig. 5. Cylinder retainer wear (IG43).

4. 결 론

본 연구는 일체형원자리에 사용되는 스테인레스강 볼베어링의 초기 파손 원인을 분석하고, 수윤활 상태에서 적용 가능한 일반 강판프레스 리테이너, 일반 플라스틱 리테이너, 기계가공형 리테이너 및 실린더형 리테이너 등 4가지 형상의 리테이너를 이용하여 비교 시험을 수행하였으며, 이상의 연구 결과를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 물로 윤활되는 볼베어링의 설계에 있어 강구와 리테이너 간 상호 간섭에 의한 베어링 회전 불량이 베어링 초기 파손의 주요 인자임을 확인하였다.

2. 수윤활 환경 하에서 운전되는 볼베어링 설계에 적용이 가능한 리테이너 설계를 비교 검증 시험을 통하여 검증하여, 일반 강판프레스 및 일반 플라스틱 리테이너를 채용한 볼베어링은 기기요구수명을 만족하지 못하였으나 실린더형 리테이너 및 기계가공형 리테이너를 적용한 볼베어링의 경우 기기요구 수명을 만족함을 확인하였다.

3. 수윤활 조건 하에서 강구와 리테이너 간섭에 의한 마멸은 어느 경우에도 발생하는 것으로 확인되었으며, 이를 최소화할 수 있는 보완 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한 플라스틱 리테이너 제작과 시험 베어링 제작에 도움을 주신 FAG베어링코리아 R&D CENTER 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Zhao Xingzhong, Liu Jiajun, Zhu Baoliang and Miao Hezhou, "Sliding wear of ceramic/metal pairs under boundary lubrication of water and oil," *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 13, No. 5, pp. 409-415, 1997.
2. Vairis, A., "Investigation of friction behaviour of various materials under sliding conditions," *European Journal of Mechanics a Solid*, Vol. 16, No. 6, pp. 929-945, 1997.
3. Ovaert, T. C., Cheng, H. S. and Shen, M. C. "Temperature effects on friction and elevated temperature behaviour of base oil-additive combinations under boundary lubricated conditions," *SAE Transactions*, Vol. 100, pp. 1131-1160, 1991.
4. Dumont, B., Blau, P. J. and Crosbie, G. M. "Reciprocating friction and wear of two silicon nitride-based ceramics against type 316 stainless steel," *Wear*, Vol. 238, No. 2, pp. 93-109, 2000.
5. Molina, M.A. and Gohar, R., "Hydrodynamic design of ball bearing cage pockets," *Tribology International*, Vol.12, No.1, pp. 15-20, 1979.
6. Wood, R.A.E. "Rolling bearing cages," *Tribology*, Vol.5, No.1, pp. 14-21, 1972.
7. 이재선, 김지호, 김종인, "고온 고압 하에서 물로 윤활되는 스테인레스 강 마찰 특성," *Journal of the KSTLE*, Vol. 19, No. 1, pp. 21-25, 2003.
8. 이재선, 김종인, 김지호, 박홍윤, 지성균, "스테인레스강 볼베어링의 수윤활 마찰 특성," *Journal of the KSTLE*, Vol. 20, No. 3, pp. 140-144, 2004.