

스테인레스강 볼베어링의 수윤활 마찰 특성

이재선[†] · 김종인 · 김지호 · 박홍윤 · 지성균

한국원자력연구소

Frictional Characteristics of Water-lubricated Stainless Steel Ball Bearing

Jae-Seon Lee, Jong-In Kim, Ji-Ho Kim, Hong-Yune Park and Sung-Qunn Zee

Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract – Water-lubrication ball bearings are required to install in aqueous medium where water is used as coolant or working fluid. However water-lubricated frictional characteristics of stainless steel ball bearing is not well known compared to oil-lubricated frictional characteristics. Furthermore study on friction at high temperature is rare because bearing maintenance strategy for water-lubricated or chemicals-lubricated bearings of equipment is mostly based on change of failed bearings and parts. Ball bearings and ball screws are used to transmit power in the control rod drive mechanism for an integral reactor and are lubricated with high temperature and high pressure chemically-controlled water. Bearings and power transmitting mechanical elements for a nuclear reactor require high reliability and high performance during estimated lifetime, and their performance should be verified. In this paper, experimental research results of frictional characteristics of water-lubricated ball bearing are reported.

Key words – stainless steel ball bearing, rotational tribometer, friction torque, high temperature, water lubrication.

1. 서 론

구동부가 작동부와 일체형으로 제작됨으로 인해 얻어지는 구조적 잇점을 구현하기 위해 작동유체 또는 냉각제를 직접 윤활제로 사용하여 구동되는 베어링 요소의 적용 사례가 늘고 있다. 또한 여러 산업용 기계 요소 설계에 있어 윤활유를 사용함으로 인해 발생하는 환경오염 요인을 제거하기 위해 물 등을 윤활제로 적용하려는 시도가 증가하고 있다. 원자로의 경우에는 원자로 냉각제의 순환을 위한 냉각제펌프와, 원자로심의 반응도 조절을 위한 제어봉구동장치 등의 필수적인 구동기기가 있으며, 이들 구동기기는 원자로의 고온과 고압의 기밀을 유지하기 위해 특수 시일을 사용하여 구동축을 압력경계 밖에 위치시키거나, 또는 구동부 전체를 압력경계 내에 위치시키는 구성을 갖게 된다. 그

러나 구동부가 압력경계 내에 위치할 경우에는 기밀 보장을 위해서 뿐만 아니라 원자로 냉각재의 오염 방지를 위해서 베어링 부의 별도 윤활은 불가능하게 되므로 베어링은 원자로 냉각재인 물로 윤활되어야 한다.

수윤활의 적용에 있어 내식성과 윤활성이 우수한 소재로 세라믹 또는 고분자 소재가 많이 적용되고 있으나 고하중을 전달하고 방사선에 오랜 시간 견디기 위해서는 스테인레스강의 적용이 불가피하다. 스테인레스강은 수분, 증기, 알칼리 용액, 현상액, 또는 산에 대해 내구성을 지니고 있으며, 특히 STS440C 강은 방출가스가 적고, 경하중 하에서는 약 400°C까지도 운전이 가능하므로 방사선 분위기 또는 진공 하에서도 사용되어지고 있다. 또한 일부 원자로 내에서 운전되는 유체베어링은 300°C 이상의 고온에서 물(순수)로 윤활되는데, 이 경우에 물의 점도는 공기 점도의 약 10배 정도에 불과한 수준으로 감소되기도 하며[1], 구름베어링의 경우에도 100°C 이상의 고온에서 운전성이

[†]주저자 · 책임저자 : leejs@kaeri.re.kr

보장되어야 한다. 이와 같이 원자로에 적용되는 베어링은 지극히 낮은 점도의 물만으로 윤활되어야 하기 때문에 윤활 상태는 매우 열악하며, 이로 인해 접촉부에서의 마찰력은 매우 클 것으로 예측된다. 하지만 이와 같은 극한의 윤활 조건에서의 스테인레스 강 베어링의 마찰 특성과 특히 온도 증가에 따른 마찰력 또는 토크의 변화를 연구한 실적은 미미한 실정이다. 현재까지의 많은 연구는 표면처리 효과 또는 물에 비해 상대적으로 고점도인 고온 오일의 영향, 또는 고온에서의 고체 윤활제를 이용한 세라믹 재질의 마찰, 마모 특성의 연구에 치중하고 있거나[2-5], 또는 스테인레스강 이외 소재의 물 윤활 영향을 고려한 연구가 일부 알려져 있다[6].

이와 같이 수윤활에 관한 연구가 미진한 원인으로 산업계에서 수윤활 볼베어링의 마찰 및 윤활 특성을 고려한 베어링의 적용을 검토하기보다는 손상된 베어링의 교체를 통한 기기 운전 전략에 의존하고 있다는 것을 들 수 있다. 그러나 일체형원자로에 적용되는 볼베어링은 그 내구 신뢰도가 매우 중요하며, 따라서 볼베어링 자체의 수윤활 특성의 검증이 중요한 설계인자가 되고 있다. 일체형원자로는 압력 14.7 MPa, 온도 310°C에서 운전되나, 볼베어링과 볼스크류가 설치된 제어봉구동장치 내부로 유입되는 일차냉각수는 120°C 이하가 되도록 냉각된다. 일차냉각수의 온도가 20°C에서 120°C까지 올라가면 물의 점도는 $0.997 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 에서 $0.236 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 로 감소한다(Fig. 1). 이와 같이 약 73% 정도 감소되는 물의 점성으로 인해 베어링에서 발생하는 마찰력은 온도 변화에 영향을 받을 것으로 예측되며, 이의 검증이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 원자로 환경을 모사한 실험 조건에

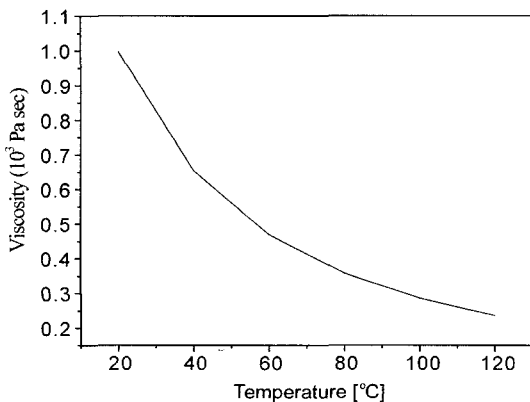


Fig. 1. Viscosity drop according to water temperature.

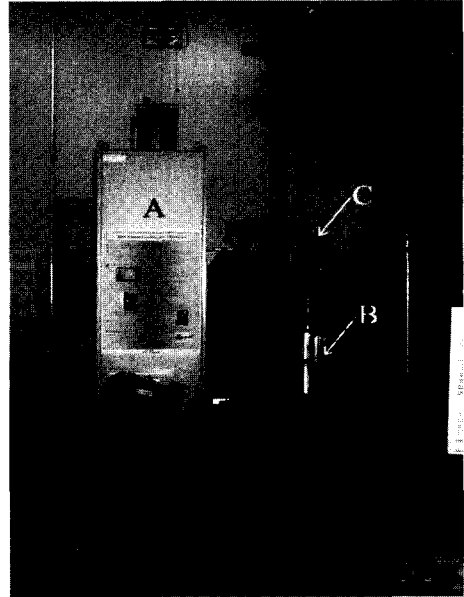


Fig. 2. Photograph of the tribometer system.

서 볼베어링의 마찰 특성을 고찰한 실험 결과를 정리하였다.

2. 시험 방법

고온에서 운전되는 STS440C 스테인레스 강 마찰 특성을 얻기 위해 마찰시험기를 이용하였다. 본 시험에 이용한 마찰시험기의 구성은 Fig. 2와 같다.

마찰시험기는 수화학 및 전기제어부(A), 가열기(B)와 회전형 시험기(C)로 구성된다. 가열기 내부의 물은 최대 350°C까지 가열 가능하며, 압력은 최대 17 MPa까지 가압할 수 있다. Fig. 3은 볼베어링의 회전토크를 측정할 수 있는 회전형 시험기를 보이고 있다.

시험에 사용한 물의 화학성분 조성은 원자로의 분위기를 모사하기 위하여 Table 1과 같이 제어하였다. 시험에 사용한 볼베어링은 6208 스테인레스강(STS440C) 베어링의 내륜, 외륜 및 강구를 적용하였으며, 리테이너는 윤활성이 우수한 PEEK 소재를 이용하여 제작하여 개방형 베어링으로 조립하였다. Fig. 4는 시험베어링에 적용된 리테이너를 보인다. 강판으로 양 옆면을 보강한 리테이너는 리벳으로 최종 조립된다. 2개 1쌍의 시험 베어링은 Fig. 3의 3번 하우징에 장착되어 auto-clave내에서 운전된다. 베어링의 조립 상태는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 두 베어링 사이

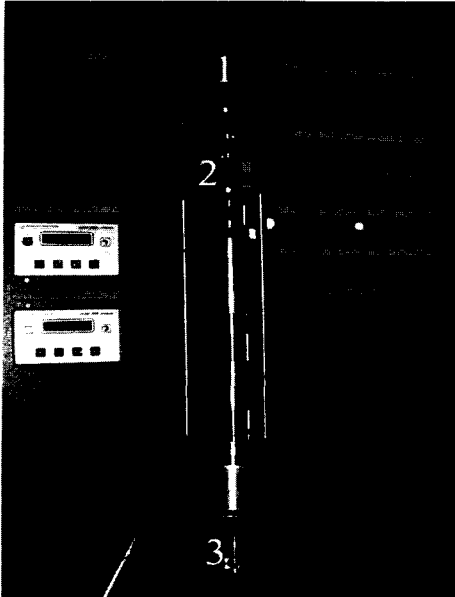


Fig. 3. Photograph of the rotational tribometer.

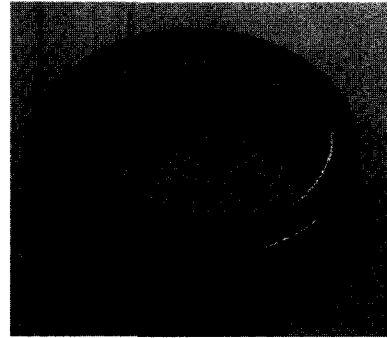


Fig. 4. Plastic retainer.

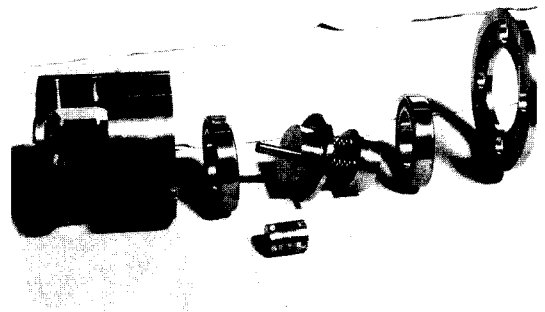


Fig. 5. Test ball bearing Assembly.

Table 1. Water chemical composition

Chemical composition	Value
Ph	9.5 ~ 10.6 (25°C)
Ammonia	10 ppm
Dissolved Hydrogen	≤ 0.5 ppb
Dissolved Oxygen	≤ 5 ppb
Conductivity	35 microsiemens/cm

에 있는 스프링에 의해 축방향 하중이 작용되는 구조를 갖는다.

시험하중은 저하중의 경우 10 N, 중하중의 경우 1,000 N을 적용하였으며, 회전속도는 300 rpm 정속운전을 하였다.

시험온도는 스테인레스강인 내륜, 외륜 및 강구의 뜨임온도 이하인 120°C까지 시험하였다.

본 시험에 앞서 스테인레스 강 소재 자체의 고온 수윤활 마찰 특성을 고찰한 시험 결과에서 상온에서 160°C까지 마찰계수는 약 0.5를 기준으로 5% 이내로 크게 변동되지 않는 것을 확인하였으며, Fig. 6에 보이는 바와 같이 상온에서 120°C까지는 큰 변화가 없음을 알 수 있었다[7]. 베어링 소재의 마찰특성 연구결과를 바탕으로 구름베어링의 마찰특성도 시험온도 범위인 상온 ~ 120°C에서는 크게 변화되지 않을 것으로 기대되나 이를 시험적으로 검증하고자 하였다.

마찰시험기가 갖고있는 자체 시스템토크는 0.07

Nm로 측정되었으며, 베어링 시험 결과에서 감소, 정리하였다. 시스템 토크는 속도, 온도 변화에 대해 영향을 받지 않음도 확인하였다.

3. 시험 결과

Fig. 7과 8은 상온에서부터 120°C까지 윤활제인 물을 가열하면서 각각 10 N과 1000 N 축방향 하중 하에서 베어링의 회전 토크 측정 결과 예를 보인다. 이때 회전 토크는 1쌍 2개 볼베어링의 합성 결과를 나타낸다. Fig. 9는 측정값을 평균하여 하나의 그래프로 정리한 결과이다.

저하중 시험결과에서는 수온 30°C에서의 회전 토크에 비해 수온 120°C에서 약 0.07 Nm의 증가가 측정되었으며, 중하중 시험결과에서는 동일 온도 증가에 대해 약 0.12 Nm의 증가가 측정되었다. 이와 같은 회전 토크 증가는 회전 토크가 거의 변화하지 않는 것으로 예측된 STS440C 소재 자체의 온도-마찰계수 변화의 연구 결과[7]와는 다소 상반되는 결과를 보이고 있으나, 이는 강구와 웨도룬 사이의 마찰 특성 뿐 아니라

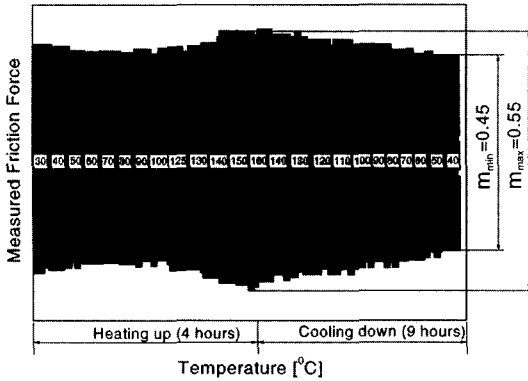


Fig. 6. Thermal friction of STS440C.

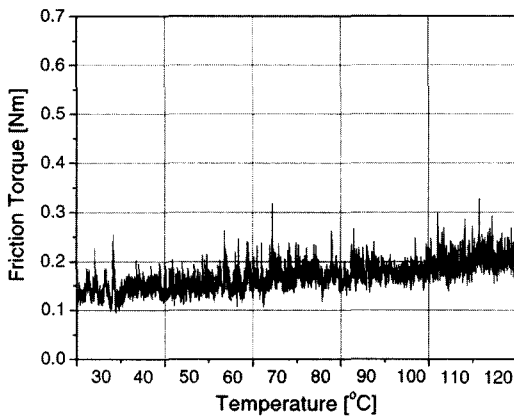


Fig. 7. Small load test result (10 N Thrust).

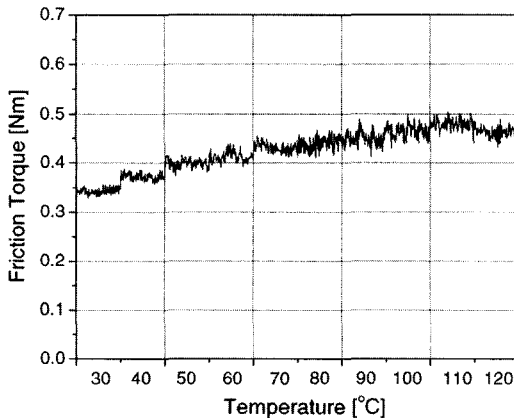


Fig. 8. Medium load test result (1,000 N Thrust).

강구-리테이너 간의 마찰 특성 및 미세한 끼워맞춤 등의 변화가 회전 토크에 영향을 미친 것으로 예측된다. 회전 토크의 절대값 변화량으로 볼 때 수온 120°C까지는 볼베어링 회전 토크의 변화가 크지 않은 것으

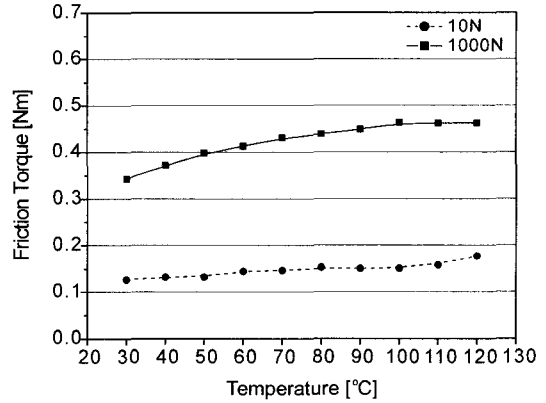


Fig. 9. Friction torque.

로 판단할 수 있다. 유체 온도의 증가에 따라 베어링의 회전 토크가 증가되는 원인은 Fig. 1에 보이는 바와 같은 윤활제인 물의 점도 감소에 따른 윤활 상태 변화에 따른 원인과, 소재의 경도 감소 등에 따른 접촉점에서의 점접촉 상태 변화에 기인한 것으로 예측된다.

특히 유체 온도의 증가에 따른 강구-궤도 접촉부에서의 윤활 상태 변화에도 불구하고 베어링 회전 토크 변화가 크게 관측되지 않는 것은 베어링 접촉점에서의 윤활 상태가 윤활제 온도 변화에 관계없이 동일한 상태를 유지하는 데 기인하는 것으로 판단되며, 수윤활 상태에서는 베어링이 경계윤활 상태로 운전되는 것으로 예측된다.

결론

1. 고온 수윤활되는 스테인레스 강 볼베어링의 마찰 토크는 경하중과 중하중 하에서 베어링 소재 자체의 마찰 특성과 동일하게 상온에서 120°C까지는 온도 증가에 따라 다소의 증가를 보이지만 크게 증가하지 않는 것을 확인하였다.

2. 윤활제인 물의 온도가 상온에서 120°C로 가열되면 윤활제의 점도는 약 73% 감소하지만 베어링의 마찰 토크는 변화가 크지 않은 것은 베어링 접촉점에서의 윤활 상태가 유체윤활이 아닌 경계윤활 또는 급속윤활 상태로 운전됨에 따른 것으로 예측된다.

3. 수윤활 조건에서의 베어링 회전 토크 변화는 베어링 수명 초기의 연구 결과에 한정되며, 윤활 조건에 따른 베어링 수명 변화 여부는 추후 수명시험을 통해 검증되어야 한다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 시험베어링 제작에 많은 도움을 주신 FAG Bearings Korea Co. 연구소 여러분들께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Daugherty R. L., Franzini J. B. and Finnemore E. J., "Fluid Mechanics with Engineering Applications," 8 ed., McGraw-Hill, 1985.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Ko Pak L. and Robertson M. F., "Friction and wear studies of nuclear power plant components in pressurized high temperature water-2," *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Aug 1-5. 1999. Boston MA
7. 이재선, 김지호, 김종인, "고온 고압 하에서 물로 윤활되는 스테인레스 강의 마찰 특성," *한국윤활학회지*, 제19권, 제1호, pp.21-25, 2003.