

고온 고압하에서 물로 윤활되는 스테인레스 강의 마찰 특성

이재선[†] · 김지호 · 김종인

한국원자력연구소

Frictional Characteristics of Stainless Steel Lubricated with Pressurized Water at High Temperature

Jae-Seon Lee[†], Ji-Ho Kim and Jong-In Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract – The 440C stainless steel is used for ball bearings and bevel gears in the control rod drive mechanism for the integral reactor, SMART. The friction characteristics of 440C stainless steel are investigated in sliding motion using the reciprocating tribometer which can simulate the operating conditions of the control rod drive mechanism. Highly purified water is used as lubricant, and the water is heated and pressurized in the autoclave. Friction force on the reciprocating specimens is measured by the load cells and transformed into friction coefficient. It is verified that frictional characteristic of the 440C steel is not drastically changed up to operating temperature and variation of friction coefficient at operating temperature from room temperature to 160°C is within 5%.

Key words – stainless steel, reciprocating tribometer, friction coefficient, high temperature, water lubrication.

1. 서 론

일반적으로 스테인레스 강 베어링은 수분, 증기, 알칼리 용액, 현상액, 또는 산에 대해 내성을 지니고 있어 내부식성이 필요한 분위기에 널리 사용되고 있다. 특히 440C 스테인레스 강은 방출가스가 적고, 경하중 하에서는 약 400°C까지 운전이 가능하므로 방사선 분위기 또는 진공 하에서도 사용되어지고 있다. 따라서 본 소재는 정밀하고 확실한 제어봉 구동을 필요로 하는 일체형원자로(SMART) 제어봉구동장치의 베어링과 베벨기어의 소재로 선정하였다. 일체형원자로는 제어봉구동장치, 냉각재순환펌프, 증기발생기, 가압기 등이 모두 원자로용기 안에 놓여져 원자로의 안정성을 향상시킨 원자로로, 제어봉구동장치는 원자로 위에 설치되어 일차냉각수가 밀봉되는 구조로 고온, 고압의 물이 채워지고, 이 일차냉각수가 베어링의 윤활제로 사용되어진다. 따라서 제어봉구동장치에 사용되는 볼베어링도 고

온, 고압의 물로 윤활되어야 하는데, 이 조건에서 물의 점도는 공기 점도의 약 10배정도 밖에 안 되는 수준으로 감소되기도 한다[1]. 따라서 베어링의 윤활 조건은 매우 열악하여 지며, 베어링의 안전 운전 영역에서의 하중 지지용량이 급격히 감소하고 마찰력은 급격히 증가될 것으로 예측된다. 물의 점도 특성 또한 온도 변화에 매우 민감하게 변화되므로 스테인레스 강 베어링의 마찰 특성 또한 온도에 따라 크게 영향을 받을 것으로 예측되지만, 온도 변화에 따른 마찰력 또는 회전토크의 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], 상이한 재질의 물 윤활 영향을 고려한 연구가 알려져 있다[6]. 그러나 원자로와 같이 베어링의 운전 특성과 내구성이 주요한 적용부위에 베어링을 적용하기 위해서는 소재의 특성 파악이 매우 중요하다. 특히 볼베어링의 온도에 따른 마찰 특성은 베어링의 내부 틈새 변화와 주변 부품의 열변형으

[†]주저자 · 책임저자 : leej@skaeri.re.kr

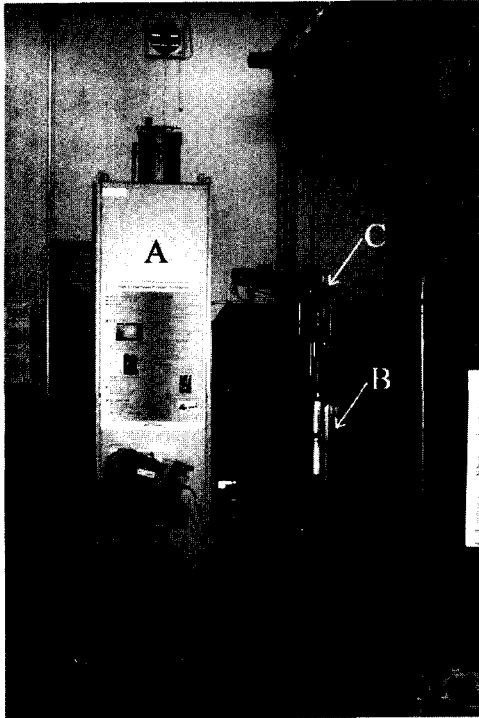


Fig. 1. Photograph of the tribometer system.



Fig. 2. Photograph of the reciprocating tribometer.

로 인한 영향이 동시에 발생하게 되므로, 베어링 소재 자체의 마찰 특성에 관한 연구가 필요하였다.

본 논문에서는 고온에서 운전되는 440C 스테인레스강의 마찰 특성을 특수한 마찰, 마모시험기를 이용하여 연구하였다. 본 시험에 이용한 마찰, 마모시험기의 형상은 Fig. 1과 같다. 마찰, 마모시험기는 수화학 및 전기제어부(A), 가열기(B)와 왕복동 시험기(C)로 구성된다. 가열기 내부의 물은 최대 350°C까지 가열 가능하며, 압력은 최대 17 MPa까지 조절할 수 있다. 본 시험기는 볼베어링 시험을 위한 회전형 시험기와 베어링 소재의 마찰 특성연구용인 왕복동 시험기(Fig. 2)로 구성이 되는데, 본 논문에서는 왕복동 시험기를 이용한 시험 결과를 정리하였다.

2. 시험 방법

왕복동 시험을 위해서 Fig. 3과 같은 핀-플레이트 시편을 사용하며, 시편의 설치 방법은 Fig. 4와 같다. 플레이트 시편의 크기는 길이 32 mm × 폭 16 mm이며, 5 mm 원통에 51 mm의 구형 형상으로 접촉표면이

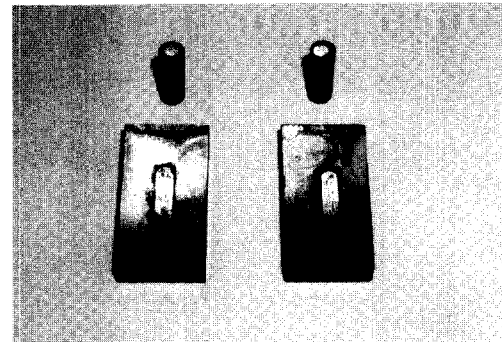


Fig. 3. The test pins and plates.

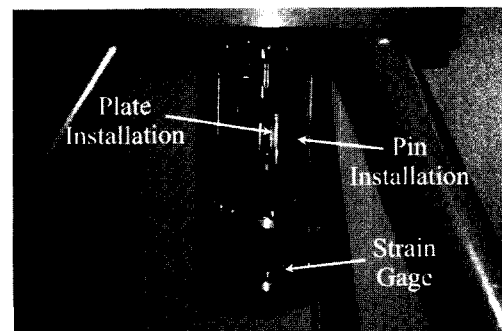


Fig. 4. Specimen installation on the tribometer.

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	35microsiemens/cm

가공된 핀에 대해 상하 왕복운동을 하는 구조를 갖는다. 왕복 행정은 11.75 mm이며, 15 cycle/분으로 운전하였다. 시편 간의 상대 속도가 매우 저속이며, 저점도의 물로 윤활되므로 본 실험에 있어 동수압 효과는 고려하지 않는다. 가열기 내에는 고순도의 물이 사용되는데, 수화학 성분은 Table 1과 같이 제어되며, 이와 같은 수화학 성분은 일체형원자로의 일차냉각재 조성을 모사한 것이다.

핀에 작용되는 하중은 980 N이며, 이 값은 13 μm 내부 틈새를 갖는 6010 깊은 홈 볼베어링에 4900 N의 축방향 하중이 작용할 때에 접촉점에 형성되는 하중과 동일한 값이다[7,8]. 이 하중은 6010 볼베어링 하중지지용량의 약 1/4 값으로, 깊은 홈 볼베어링에 일반적으로 적용될 수 있는 범위 하중에 속한다. 본 실험 결과는 미끄럼 마찰을 실험하게 되므로, 구름 접촉이 주로 발생하는 스테인레스 강 볼베어링의 마찰특성 예측에는 바로 사용될 수는 없지만, 볼베어링의 타원 접촉부 및 베벨기어 치면에서 발생하는 미소미끄럼 영향을 고려하는 경우에 적용이 가능하다[7].

170°C에서 텀퍼링한 440C 스테인레스 강을 이용하여 시험하였으므로 소재 특성이 변경되지 않도록 시험의 최대 온도는 160°C로 설정하였다. 시험 방법은 30°C, 100°C에서 일정 온도에서의 운전 거리에 따른 마찰 특성을 고찰하고, 별도의 시편을 이용하여 약 13시간에 걸쳐 연속적으로 실험 온도를 변경하여 마찰 특성의 변화를 관찰하였다. 가열기 내부 압력은 14.7 MPa로 일정하게 설정하였다. 시편에 발생하는 마찰력은 핀 시편 아래에 설치된 방수, 고온용 스트레인게이지를 이용하여 측정하였다.

각 시편은 시험 전 열처리하여 표면 경도는 평균 60.5 HRC를 갖고 있다.

3. 시험 결과

Fig. 5는 스트레인게이지로부터 얻어진 마찰력 결과

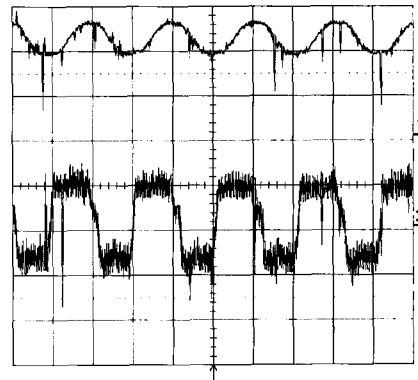


Fig. 5. Raw data type.

를 오실로스코프를 통해 출력한 결과이다. 그래프에서 한 칸은 시험 전 계량 하중을 이용하여 650 N에 해당됨을 확인하였으므로, 본 시험 결과는 520 N의 마찰력을 나타내게 되고, 마찰 계수는 약 0.53에 해당된다. 왕복운동하는 마찰력이 스트레인게이지로부터 측정되므로 실제 마찰력은 측정값의 최대-최소 차이의 반이 된다. 마찰력 측정 결과는 상기와 동일한 방법에 의해 마찰력을 평가한다. 그림의 위 부분에 나타난 그래프는 왕복운동 중 LVDT로 측정된 결과이며, 핀에 대한 상대적인 플레이트의 위치를 나타내게 된다.

시편에 형성된 마모 흔적은 Fig. 3에 보이는 바와 같다. 마모 길이는 행정과 동일하며, 마모 폭은 2.4 mm에서 3.7 mm로 분포한다.

마멸량과 표면 거칠기는 측정 전, 후에 측정되었으며, Talysurf로 측정한 마멸부의 표면 형상은 Fig. 6과 같다. 본 측정은 30°C에서 실험한 시편에 해당하며, 약 6 μm의 마멸 깊이를 보이고 있다. 질량 감소량은

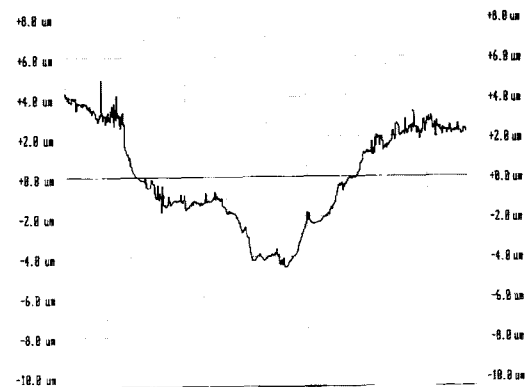


Fig. 6. Wear shape after test.

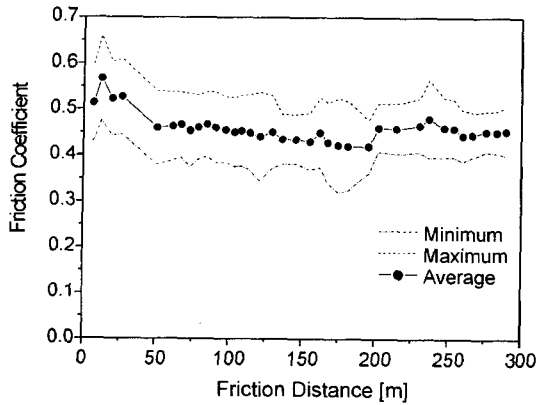


Fig. 7. Friction Coefficient (at 14.7 MPa, 30°C).

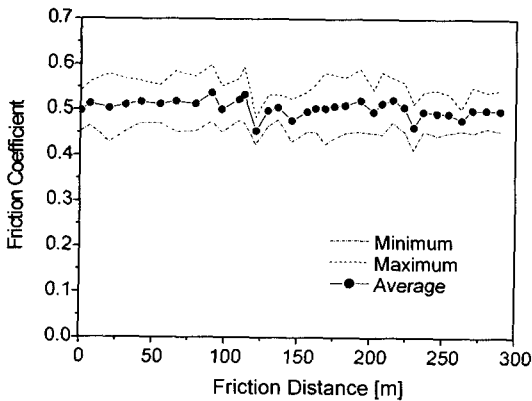


Fig. 8. Friction Coefficient (at 14.7 MPa, 100°C).

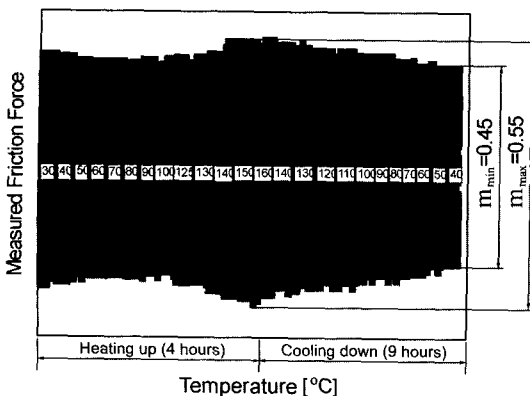


Fig. 9. Friction Coefficient Variation with Temperature.

매우 적어 본 논문에서는 결과를 비교하지 않았다. Figs. 7과 8은 30°C 및 100°C에서 운전한 시편의 마찰 계수 변화를 나타낸다. 실험 결과 스테인레스 강에 발생하는 마찰 계수는

30°C에서 0.42-0.47, 100°C에서 0.46-0.53을 나타내게 되어 다소 증가함을 알 수 있다. 운전 온도 증가에 따라 스테인레스 강의 마찰계수 변화를 고찰하기 위해 연속적으로 온도를 증가시키면서 마찰계수를 측정된 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 측정 결과로 미루어 440C 스테인레스 강의 마찰 특성은 온도 변화에 따라 약 5% 변동되며, 시험 범위인 160°C까지는 큰 변화는 없는 것으로 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 고온, 고압의 물로 윤활되는 440C 스테인레스 강의 마찰 특성을 실험적으로 연구하였다. 본 실험 결과는 볼베어링과 주변 부품의 열변형으로 인한 마찰력 변화의 영향을 배제한 베어링 소재의 마찰 특성에 관한 실험이었으며, 스테인레스 강의 마찰 특성은 온도 변화에 심각하게 영향을 받지 않는 것으로 검증되었다. 실온에서 160°C까지의 운전 온도 범위에서는 약 0.5의 마찰 계수를 갖고 5%정도 변동됨을 알 수 있다.

추후 본 연구 결과는 실제 440C 스테인레스 강 볼베어링을 이용한 고온, 고압에서의 회전 토오크 특성 연구에 있어 실험 결과 및 이론 해석의 검증에 이용될 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

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, pp409-415, 1997.
3. Vairis A., "Investigation of Friction Behaviour of Various materials under sliding conditions," *European Journal of Mechanics A Solid*, Vol. 16, No. 6, pp929-945, 1997.
4. Ovaert T. C., Cheng H. S. and Shen M. C. "Temper-

- ature effects on friction and elevated temperature behaviour of base oil-additive combinations under boundary lubricated conditions," *SAE Transactions*, Vol. 100, pp1131-1160, 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, pp93-109, 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* (Boston MA), Aug 1-5, 1999.
 7. Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis," 3 ed., John Wiley & Sons. 1991.
 8. J. S. Lee and D.C. Han, "The Static Equivalent Radial Load under the Moment and Radial Force for the Deep Groove Ball Bearings," *Journal of KSTLE*, Vol. 14, No. 3, pp94-99, 1998.