

# 고온/고압 하에서 물로 윤활되는 스테인레스 강의 마찰 특성

## Frictional characteristics of stainless steel lubricated with pressurized high temperature water

이재선, 김은현, 김지호, 김종인

한국원자력연구소

**ABSTRACT:** The fatigue life of support bearings is one of the most critical factors for the performance of a control rod driving mechanism. They are operated at high temperature and high pressure and especially lubricated with dramatically low viscosity water. The support bearing is made of standardized 440C stainless steel, and it supports thrust load including the weight of the driving system and external force. Friction and wear characteristics of this material operating under severe lubrication condition is not well known yet, although it is expected to be changed with respect to temperature and boundary pressure. So the friction characteristics are investigated in sliding conditions using the reciprocating tribometer which can simulate the operating conditions. Highly purified water is used as lubricant, and the water is heated up and pressurized. Friction force on the reciprocating specimens is monitored by the load cells. The results of the experiments are presented in this paper.

**Key Words:** Stainless steel, Reciprocating tribometer, Friction coefficient, High temperature, Water lubrication

### 1. 서론

일반적으로 스테인레스강 베어링은 수분, 증기, 알칼리 용액, 현상액, 또는 산에 대해 내구성을 갖는다. 특히 STS440C 강은 방출 가스가 적고, 경하중 하에서 약 400°C까지 운전이 가능하므로 방사선 분위기 또는 진공 하에서도 사용되어지고 있어, 현재 개발 중인 신형 원자로에서도 지지용 베어링 재료로 사용이 검토되고 있다. 원자로 내에서 운전되는 베어링은 고온, 고압의 물로 윤활되기도 하는데 이 경우에 물의 점도는 공기 점도의 약 10 배 정도에 해당하는 수준으로 크게 감소되기도 한다[1]. 따라서 베어링의 윤활 조건은 매우 열악하게 되고, 이로 인해 마찰력은 급격히 증가될 것으로 예측된다. 스테인레스 강 베어링의 마찰 특성은 온도에 따라 크게 영향을 받을 것으로 예측되지만, 온도 증가에 따른 마찰력 또는 토오크의 변화를 연구한 실적은 미미한 실정이다. 현재까지의 많은 연구는 표면처리 효과 또는 물에 비해 상대적으로 고점도인 고온 오일의 영향, 또는 고온에서의 고체 윤활제를 이용한 세라믹 재료의 마찰, 마모 특성의 연구에 치중하고 있다[2-5]. 또는 상

이한 재료의 물 윤활 영향을 고려한 연구 결과가 알려져 있다[6].

본 논문에서는 고온에서 운전되는 STS440C 스테인레스 강의 마찰 특성을 마찰, 마모시험기를 이용하여 연구하였다. 본 시험에 이용한 마찰, 마모시험기의 형상은 Fig. 1 과 같다.

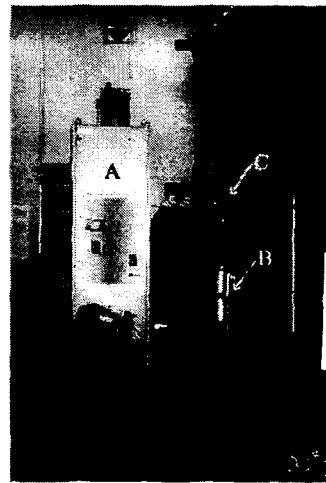


Fig.1 Photograph of the tribometer system

마찰, 마모시험기는 수화학 및 전기제어

부(A), 가열기(B)와 왕복동 시험기(C)로 구성된다. 가열기 내부의 물은 최대 350℃까지 가열 가능하며, 압력은 최대 17MPa까지 조절할 수 있다. 본 시험기는 볼베어링 시험을 위한 회전형 시험기와 일반 재질의 마찰 특성연구용인 왕복동 시험기(Fig. 2)로 구성이 되는데, 본 논문에서는 왕복동 시험기를 이용한 시험 결과를 정리하였다.

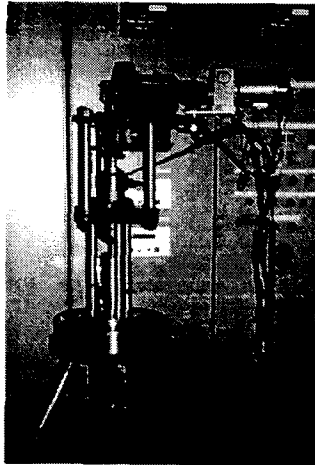


Fig.2 Photograph of the reciprocating tribometer

## 2. 시험 방법

왕복동 시험을 위해서 핀-플레이트 시편을 사용하며(Fig. 3), 시편의 설치 방법은 Fig. 4와 같다.

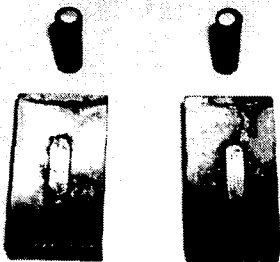


Fig.3 The pins and the plates

플레이트 시편의 크기는 길이 32mm x 폭 16mm이며, 정지되어 있는 핀에 대해 상하

왕복운동을 하는 구조를 갖는다. 핀은 5mm 지름을 갖는 원통 형상이며, 플레이트와의 접촉 표면에는 51mm의 구형 형상이 가공된다. 왕복 행정은 11.75mm이며, 15cycle/min.으로 운전한다. 본 실험에 있어 동수압 효과는 고려하지 않는데, 시편 간의 상대 속도가 매우 저속이며, 저점도의 물로 윤활되기 때문이다. 가열기 내에는 고순도의 물이 채워지는데, 수화학 성분은 Table 1과 같이 제어되며, 이 물이 마찰 시편 간의 윤활제로 작용하게 된다.

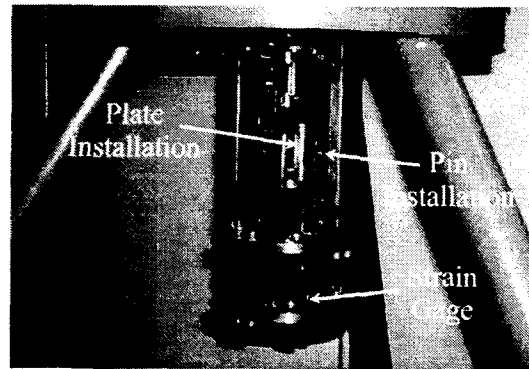


Fig.4 Specimen installation on the tribometer

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

Table 1: Water chemical composition

본 실험에 있어 핀에 작용되는 하중은 980N이며, 이 값은 13 μm 내부 틈새를 갖는 6010 깊은 홈 볼베어링에 4900N의 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 범위의 축방향 하중에 속한다. 본 실험은 미끄럼 마찰에 대한 마찰 특성을 얻게 되므로, 구름 접촉이 주로 발생하는 스테인레스강 볼베어링의 마찰특성 예측에는 바로 사용될 수는 없지만, 볼베어링의 타원접촉부

내에 발생하는 미소미끄럼 영향을 고려하는 경우와 스테인레스강의 일반적인 마찰 특성 예측에 적용이 가능하다[7].

30°C, 100°C 및 150°C 3 단계의 온도에 대해 실험을 수행하였으며, 각 경우에 대해 가열기 내부 압력은 14.7MPa로 일정하게 설정하였다. 시편에 발생하는 마찰력은 방수, 고온용 스트레인게이지를 이용하여 측정하였다.

STS440C 스테인레스강은 자성체이므로, 실험 전 탈자하였으며, 초음파세척기로 세척하여 이물을 제거하였다.

각 시편은 시험 전 열처리하여 표면 경도는 평균 60.5 H<sub>R</sub>를 나타내었으며, 180°C에서 템퍼링하였다.

### 3. 시험 결과

Fig. 5는 스트레인게이지로부터 얻어진 마찰력을 오실로스코프를 통해 출력한 결과이다. 그래프에서 큰 한칸은 시험 전 계량 하중을 이용하여 650N에 해당됨을 확인하였으므로, 본 시험 결과는 520N의 마찰력을 나타내게 되고, 마찰 계수는 약 0.53에 해당된다. 각 운전 조건에서 측정된 스트레인게이지 출력은 상기와 동일한 방법에 의해 마찰력으로 평가된다. 그림의 윗 부분에 나타난 그래프는 왕복동 운동 중 LVDT로 측정된 결과이며, 편에 대한 상대적인 플레이트의 위치를 나타내게 된다.

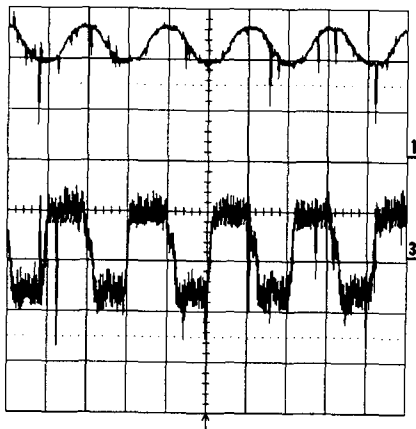


Fig.5 Raw data type

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

마모량과 표면 거칠기는 측정 전, 후에 측정되었으며, Talysurf로 측정된 마모부의 표면 형상은 Fig. 6과 같다. 본 측정은 30°C에서 실험한 시편으로 수행하였으며, 약 6µm의 마모 깊이를 보이고 있다. 질량 감소량은 매우 적어 전저저울의 오차범위 내에 존재함에 따라 본 논문에서는 결과를 비교하지 않았다.

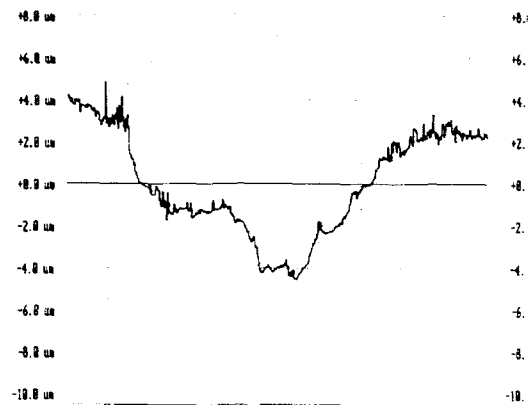


Fig.6 Wear shape after test

Fig. 7과 8은 30°C 및 100°C에서 운전한 시편의 마찰 계수 변화를 나타낸다. 그림에서 실선은 평균값을, 점선 내부는 최대 및 최소 측정값의 분포를 나타낸다.

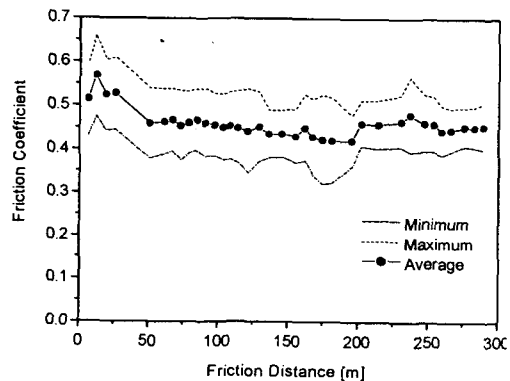


Fig.7 Friction Coefficient (at 14.7MPa, 30°C)

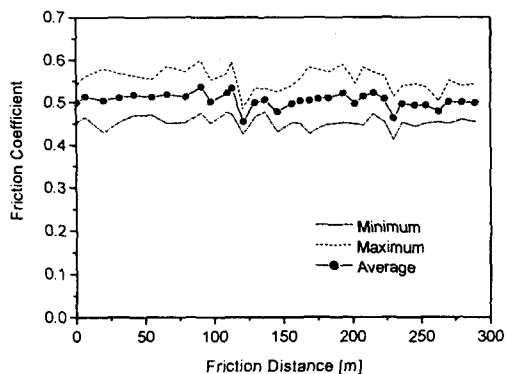


Fig.8 Friction Coefficient (at 14.7MPa, 100°C)

150°C에서 마찰시험을 수행한 결과, 시편 접촉부에 마모가 크게 발생하므로 인하여, 마찰계수가 다른 시험과 다르게 진동하는 양상을 나타내었다. 따라서 본 논문에는 결과 그래프를 생략하였다. 이는 고온에 따른 표면 경도 감소에 따른 원인으로 판단되며, 이때 마찰 계수는 약 0.4 부근에서 다소 진동하는 양상을 보이고 있다. 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.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고온, 고압의 물로 유회되는 스테인레스 강의 마찰 특성을 실험적으로 연구하였다. STS440C 스테인레스 강은 원자로의 지지용 베어링으로 사용되는 경우에 세심한 주의가 요망되는데, 이는 하중 하에서 온도 증가에 따른 마찰 계수의 증가 뿐만 아니라 재질 경도 감소로 인한 과다 마모가 예측되기 때문이다. 특히 150°C 부근에서는 심각한 마모 증가가 우려된다. 본 실험을 바탕으로 추후 스테인레스 강의 온도에 따른 마찰 계수 변화 및 한계 사용 온도 설정에 관한 보완 실험 및 검증이 요망된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[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 (1997). 13 vol. 5 n. 409-415

[3] Vairis A.: Investigation of Friction Behaviour of Various materials under sliding conditions. European Journal of Mechanics A/ Solid (1997). 16 v. 6 n. 929-945

[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 (1991). 100 v. 1131-1160

[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 (2000). 238 v. 2 n. 93-109

[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] 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, 14 (1998). 3. 94-99