

## 고온 고압 하에서 물로 윤활되는 스테인리스 강 440C의 마찰 특성

### Frictional Characteristics of Stainless Steel 440C lubricated with water at Pressurized High Temperature

김은현, 이재선, 김지호, 김종인  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

베어링의 피로 수명은 구동 시스템의 성능을 결정하는데 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 원자로에서 구동 시스템에 장착된 베어링은 고온/고압의 조건과 특히 점성이 낮은 물로 윤활이 되기 때문에 베어링 재질의 마찰 및 마멸 특성을 연구하는 것은 매우 중요하다. 원자로의 제어봉 구동 장치를 지지하는 베어링은 대개 스테인리스 강과 세라믹 재질의 미끄럼 베어링으로 만들어져 있다. 본 연구는 SMART의 제어봉 구동 장치에서 사용되어질 지지용 볼베어링에 중점을 두었다. 볼 베어링은 규격화된 스테인리스 강 440C로 만들어졌고, 구동부의 자중과 외력을 포함한 축방향 하중을 지지한다. 극한 윤활 조건하에서 440C의 마찰과 마멸특성은 온도와 경계 압력에 의해서 베어링의 특징을 변화시킬 수도 있지만, 아직까지 제대로 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 SMART와 유사한 조건을 만들 수 있는 왕복동 시험기에서 스테인리스 강 440C의 마찰 특성을 실험적으로 고찰하였다. 고온/고압의 순수로 윤활시켰으며, 왕복동 시스템의 마찰력은 로드셀에 의해서 측정하였다.

#### Abstract

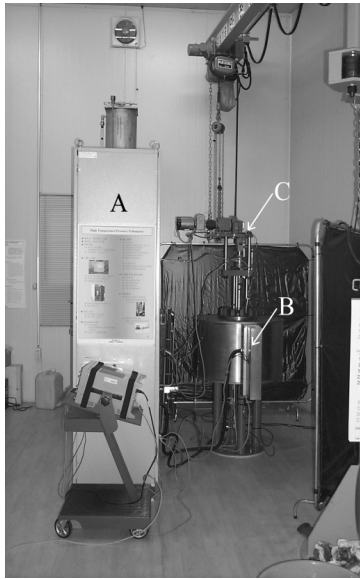
The fatigue life of stainless steel bearings is one of the most critical factors to determine the performance of the driving system. Because the bearings which are installed on the driving mechanism in the nuclear reactor are operated at high temperature and high pressure and especially lubricated with water with low viscosity, the friction and wear characteristics of the bearing material should be investigated thoroughly. In many control element drive mechanisms in the nuclear reactor the support bearings are made of the stainless steel and the sliding bearings ceramic material mainly. This study is focused on the characteristics of support

bearings which may be used in the SMART. The ball bearings are made of standardized 440C stainless steel, and it supports thrust load including the weight of the driving system and external force. The friction and wear characteristics of this material operating under severe lubrication condition are not well known yet, however it will be changed with respect to temperature and boundary pressure. In this paper the friction characteristics are investigated experimentally using the reciprocating tribometer which can simulate the SMART operating conditions. Highly purified water is used as lubricant, and the water is warmed up and pressurized. Friction forces on the reciprocating specimens are measured insitu strain gages.

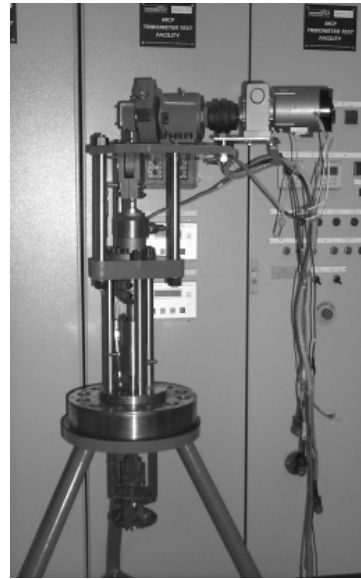
## 1. 서론

일반적으로 스테인리스강 베어링은 수분, 증기, 알칼리 용액, 현상액, 또는 산에 대해 내구성을 지니게 된다. 특히 STS440C 강은 방출가스가 적고, 경하중 하에서 약 400°C까지 운전이 가능하므로 방사선 분위기 또는 진공 하에서도 사용되어지고 있다. 따라서 STS440C는 현재 개발 중인 SMART의 제어봉 구동장치에서도 지지용 베어링으로 사용이 검토되고 있다. SMART의 제어봉 구동장치에서 운전되는 베어링은 고온, 고압의 물로 윤활되는데 이 경우에 물의 점도는 공기 점도의 약 10배 정도에 해당하는 수준으로 감소되기도 한다[1]. 따라서 베어링의 윤활 조건은 매우 열악하며, 베어링의 하중 지지용량이 급격히 감소하고 저점도 윤활제로 인해 마찰력은 급격히 증가될 것으로 예측된다. 스테인리스 강 베어링의 마찰 특성은 온도에 따라 크게 영향을 받을 것으로 예측되지만, 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 있다[2-5]. 또는 상이한 재질의 물 윤활 영향을 고려한 연구가 알려져 있다[6].

본 논문에서는 고온에서 운전되는 440C 스테인리스 강의 마찰 특성을 특수한 마찰, 마모시험기를 이용하여 연구하였다. 본 시험에 이용한 마찰, 마모시험기의 형상은 Fig. 1-a와 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 17MPa 까지 조절할 수 있다. 본 시험기는 볼베어링 시험을 위한 회전형 시험기와 일반 재질의 마찰 특성연구용인 왕복동 시험기(Fig. 1-b)로 구성이 되는데, 본 논문에서는 왕복동 시험기를 이용한 시험 결과를 정리하였다.



(a)



(b)

Fig.1 Photograph of the tribometer system(a) and the reciprocating tribometer(b)

## 2. 실험 방법

왕복동 시험을 위해서 핀-플레이트 시편을 사용하며(Fig. 2), 시편의 설치 방법은 Fig. 3과 같다. 플레이트 시편의 크기는 길이 32mm x 폭 16mm 이며, 정지되어 있는 5mm 지름을 갖고 접촉표면에 51mm의 구형 형상으로 가공된 핀에 대해 상하 왕복운동을 하는 구조를 갖는다. 왕복 행정은 9.6mm이며, 15cycle/분으로 운전한다. 본 실험에 있어 동수압 효과는 고려하지 않는데, 시편 간의 상대 속도가 매우 저속이며, 저점도의 물로 윤활되기 때문이다. 가열기 내에는 고순도의 물이 사용되는데, 수화학 성분은 Table 1과 같이 제어되며, 마찰 시편 간의 윤활제로 작용하게 된다.



Fig.2 The pins and the plates

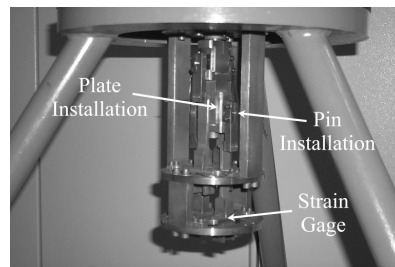


Fig.3 Specimen installation on the tribometer

Chemical Composition	Value
Ph	9 <sup>o</sup> C).5 ~ 10.6 (25
Ammonia	10 ppm
Dissolved Hydrogen	≤0.5 ppb
Dissolved Oxygen	≤5 ppb
Conductivity	35microsiemens/cm

Table 1 Water chemistry

핀에 작용되는 하중은 980N이며, 이 값은 13 $\mu$ m 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 범위 하중에 속한다. 본 실험 결과는 미끄럼 마찰을 실험하게 되므로, 구름 접촉이 주로 발생하는 스테인리스강 볼베어링의 마찰특성 예측에는 바로 사용될 수는 없지만, 볼베어링의 타원접촉부 내에 발생하는 미소미끄럼 영향을 고려하는 경우에 적용이 가능하다[7].

30 $^{\circ}$ C에서부터 160 $^{\circ}$ C까지 가열시킨 후 다시 40 $^{\circ}$ C까지 냉각하는 동안 실험을 수행하였으며, 각 경우에 대해 오토클레이브 내부 압력은 14.7MPa로 일정하게 설정하였다. 시편에 발생하는 마찰력은 방수, 고온용 스트레인게이지를 이용하여 측정하였다.

440C 스테인리스강은 자성체이므로, 실험 전 탈자하였으며, 초음파세척기로 세척하여 이물질을 제거하였다.

각 시편은 시험 전 열처리하여 표면 경도는 평균 60.5 HRC를 나타내었으며, 170 $^{\circ}$ C에서 템퍼링하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 4는 스트레인게이지로부터 얻어진 마찰력 결과를 출력한 결과이다. 1사이클을 측정하는 동안 약 220개의 데이터를 사용하였으며, 그래프에서 0.015mV/V는 시험 전 계량 하중을 이용하여 98N에 해당됨을 확인하였으므로, 본 시험 결과는 915N의 마찰력을 나타내게 되고, 상하 왕복운동을 하므로 편방향으로는 약 457.5N의 마찰력이 작용하게 된다. 이때의 마찰 계수는 약 0.467에 해당된다. 마찰력 측정 결과는 상기와 동일한 방법에 의해 마찰력을 평가한다.

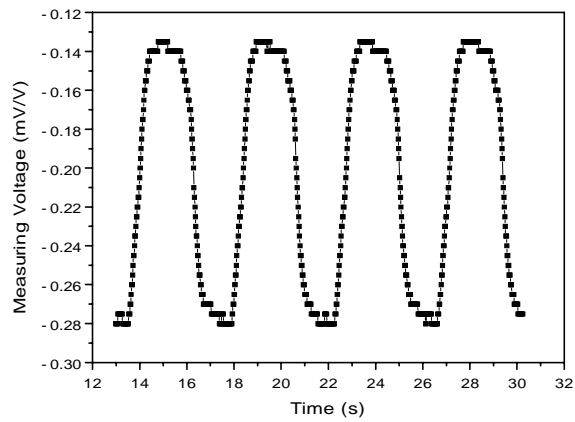


Fig. 4 Raw data type

시편에 형성된 마모 흔적은 Fig. 2와 같다. 마모 길이는 행정과 동일하며, 마모 폭은 2.4mm에서 3.7mm로 분포한다.

마멸량과 표면 거칠기는 측정 전, 후에 측정되었으며, Talysurf로 측정한 마멸부의 표면 형상은 Fig. 5과 같다. 본 측정은 30℃에서 실험한 시편에 해당하며, 약 6 $\mu$ m의 마멸 깊이를 보이고 있다. 질량 감소량은 매우 적어 본 논문에서는 결과를 비교하지 않았다.

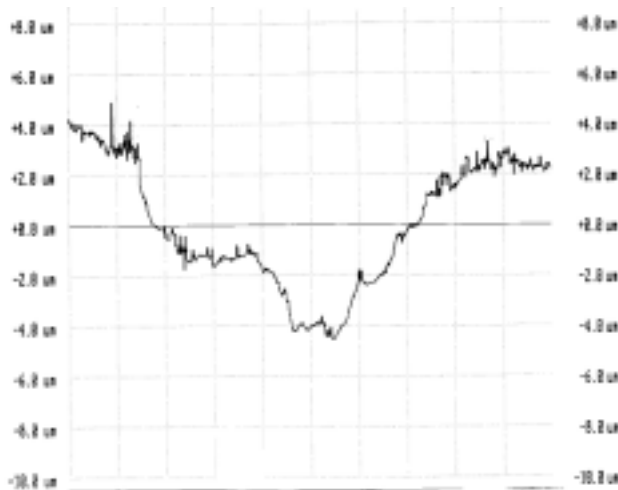


Fig.5 Wear shape after test

Fig. 6은 가열과 냉각을 하면서 10℃마다 전후로 10사이클을 추출한 그래프이다. 측정된 마찰력을 이용하여 구한 마찰계수  $\mu$ 는 0.45에서 0.55사이에 존재함을 알 수 있다. 30℃에서부터 160℃까지 가열을 하는 동안은 약 4시간이 소요되었으며 160℃에서 40℃까지 냉각하는데는 약 9시간이 소요되었다.

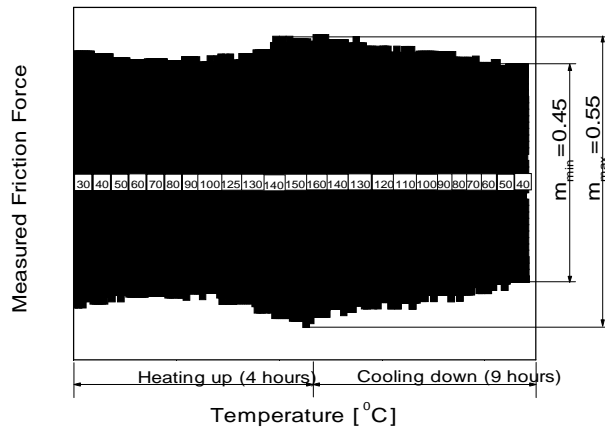


Fig. 6 Variation of friction coefficient with respect to temperature

상온에서 가열을 하면서 수행한 시험 결과, 시편의 표면거칠기에 따라서 마찰 계수는 작아지고 이후 온도 증가와 더불어 마찰계수도 커짐을 알 수 있었다. 또한 150°C 부근에서 급격한 마찰계수 증가가 이루어져 160°C에서 정점을 이루며, 160°C에서 상온으로 냉각상태에서는 140°C까지 비슷한 크기의 마찰계수가 일정한 시간동안 계속되다가 이후 낮아지는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고온, 고압의 물로 유회되는 스테인리스 강의 마찰 특성을 실험적으로 연구하였다. 440C 스테인리스 강은 원자로의 지지용 베어링으로 사용되는 경우에 세심한 주의가 요망되는데, 이는 하중 하에서 온도 증가에 따른 마찰 계수의 증가 뿐 아니라 재질 경도 감소로 인한 과다 마멸이 예측되기 때문이다. 특히 150°C 부근에서는 심각한 마멸 증가가 우려된다. 본 실험을 바탕으로 추후 스테인리스 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.

#### 참고 문헌

1. Daugherty R. L., Franzini J. B. and Finnemore E. J., "Fluid Mechanics with Engineering Applications." 8ed. 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, 13 vol. 5n. pp.409-415, 1997
3. Vairis A. "Investigation of Friction Behaviour of Various materials under sliding conditions", European Journal of Mechanics A/Solid, 16v. 6n. 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, 100v., pp.1131-1160, 1991
  5. Dumont B., Blau P. J. and Crosbie G. M., "Recirpocating friction and wear of two silicon nitridebased ceramics against type 316 stainless steel", Wear, 238v. 2n. 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", 3ed. 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, v3, pp94-99, 1998(14)