

## SMART 냉각재순환펌프 및 제어봉구동장치의 베어링 마찰·마모시험(I)

### Friction and Wear Tests for Bearing of the MCP and CEDM on SMART(I)

조용후, 박진석, 김지호, 허형, 김종인

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요약

원자로 주기에 사용되는 베어링의 신뢰성은 원자로의 안전성 및 이용율에 직접적인 영향을 미친다. 일체형원자로 SMART에 사용되는 냉각재순환펌프는 기계적인 밀봉이 없는 캔드모터형을 채택하고 제어봉구동장치는 미세반응도 조절이 가능한 스텝모터 구동 볼스크류형이 사용된다. 이들에 사용되는 베어링 및 마찰쌍은 고온의 일차냉각수에서 장기간 운전되어야 하기 때문에 안정성과 고온 내마모성을 가진 재료를 사용하여 유체운할 상태가 유지되도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 MCP 및 CEDM에 채택된 베어링의 설계개념을 제시하고 선정된 소재의 마찰·마모 특성을 검증하기 위한 시험계획을 수립하였다.

#### Abstract

The reliability of the friction pairs in the primary major components is important to the safety and performance of the reactor. The bearings and friction pairs of the main coolant pump (MCP) and the control element drive mechanism (CEDM) for the integral reactor SMART are operated for very long period in the high temperature primary coolant. In this paper, the design features of the tribological couples in the MCP and CEDM are presented and plans for the friction and wear tests are established in order to justify the selected bearing materials.

#### 1. 서론

원자로의 안전성은 원자로 전체의 배치 혹은 계통에 의해 영향을 받지만 무엇보다 개개의 기기에 대한 구조적 건전성, 신뢰성에 의해 영향을 받는다. 주냉각재펌프(MCP)와 제어봉구

동장치(CEDM)의 회전체를 지지하는 베어링의 경우 상대면과의 마찰·마모가 적은 윤활영역에서 지속적으로 운전되는 것이 중요하지만 때로는 운전조건에 따라 유막이 충분히 형성되지 못하는 경우가 발생하게 된다. 예를 들면 윤활제의 점도나 미끄럼 속도가 너무 작은 경우, 일시적인 과하중으로 유막두께가 급격히 줄어드는 경우, 혹은 축을 기동하거나 정지시킬 때 경계윤활영역에서 운전될 수 있다. 이 영역에서 운전이 오래 지속되면 접촉면 마모에 의해 베어링 및 축의 수명단축과 마모입자 성장결과로 seizure 현상이 발생될 수도 있으며 이로 인해 회전체 시스템의 파손을 초래하므로 반드시 피해야 할 현상이다.<sup>[1]</sup> 이를 위해서는 유막두께를 결정하는 인자들 즉, 하중, 윤활제 점도, 미끄럼속도가 각 윤활영역에서 어떤 특성을 나타내는가를 이해하는 것이 필요하다. 유체윤활을 유지하는 이상적인 윤활조건을 위해서는 미끄럼 베어링이나 저널 베어링의 마찰·마모가 일어나는 기계요소에서 윤활면의 두 접촉면 거동에 관한 이해가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 MCP 및 CEDM의 고온의 일차냉각수에서 장시간 운전되는 베어링 및 마찰쌍의 설계특성을 제시하고 선정된 소재의 마찰·마모특성을 검증하기 위한 시험계획을 수립하였다.

## 2 베어링의 마찰·마모 평가요소

### (1) 주냉각재펌프

베어링 집합체는 그림 1과 같이 저널베어링과 추력베어링으로 크게 구분되며, 그림 2는 MCP 평가요소이다. 고온과 고압의 환경에서 원자로의 일차 냉각수를 윤활유로 사용하기 때문에 마찰 및 마모가 적게 일어나는 형상이어야 한다. 저널베어링의 케이스는 축방향으로 홈이 있다. 이 홈은 펌프내부를 순환하는 일차냉각수의 유로를 형성시키는 것과 동시에 저널베어링의 동특성을 향상시키는 역할을 한다. 저널베어링은 회전축의 상부, 중간, 하부에 각각 위치한다. 추력베어링은 회전자의 추력을 지지함과 동시에 추력베어링의 끝단밀봉에 의해 원자로 내부 고온의 일차 냉각수가 독립순환 회로로 전달되는 것을 방지한다.

일체형원자로의 MCP에 쓰이는 베어링은 고온의 환경에 노출됨에 따라 점도가 낮은 고온 고압의 물을 윤활재로 쓰는 베어링부는 마찰 및 마모 등으로 손상될 가능성이 크다. 그러므로 저널베어링 및 추력베어링에 대한 열유체 윤활해석을 통하여 유체윤활상태에서 경계윤활상태로 전이되는 운전조건을 결정할 필요가 있다.<sup>[2]</sup> 특히 경계윤활 상태에서 저널과 부싱이 접촉하기 시작하는 영역으로 마찰계수가 증가되기 때문에 유체윤활영역에서 작동할 수 있도록 설계하여야 한다. 저널 베어링과 부싱의 표면거칠기가 유막의 두께에 가까워지면, 고체접촉이 생겨서 타 붙는(seizing)현상이 일어나기 때문에 저널베어링과 부싱의 미끄럼 면을 충분히 다듬질하는 것은 매우 중요한 일이다. 베어링 집합체는 고속으로 회전하는 축을 지지하고 있기 때문에 각 부품들 상호간의 형상 공차(동심원, 수직도, 평면도)와 끼워맞춤등이 그 기능에 맞게 설계되어야 한다.<sup>[3]</sup>

베어링재질은 열전도성 및 마찰특성이 우수한 재질을 사용하여야 하고 설계수명은 최소 70,000시간의 유효 운전수명을 갖도록 설계해야하고 수명기간동안 250회의 기동과 정지에 대하여 안정적이어야 한다. 그래서 MCP의 베어링 재질은 일차계통의 냉각수를 윤활유로

사용하는 실리콘을 함유한 흑연(graphite)재질로 만들어진다. 이때 윤활유로 사용되는 물의 온도는 305℃, 압력은 15MPa이기 때문에 내열 및 내마모성을 가지는 재질이어야 한다. 반경방향 베어링과 축방향 베어링의 재질은 같은 것을 사용하며, 흑연에 강한 압력으로 실리콘(silicon)을 주입시켜 만든다. 베어링재질의 마찰계수는 0.02이다. 베어링은 저속에서 900rpm 고속에서 3600rpm으로 베어링에 작용하는 압력은 저널베어링이 0.62Mpa이고 추력 베어링에 작용하는 압력은 1.17MPa이다.

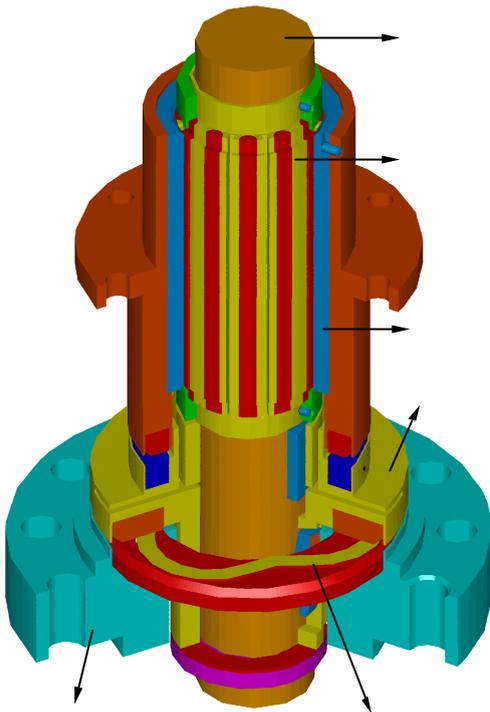


그림 1 MCP 중간베어링 집합체

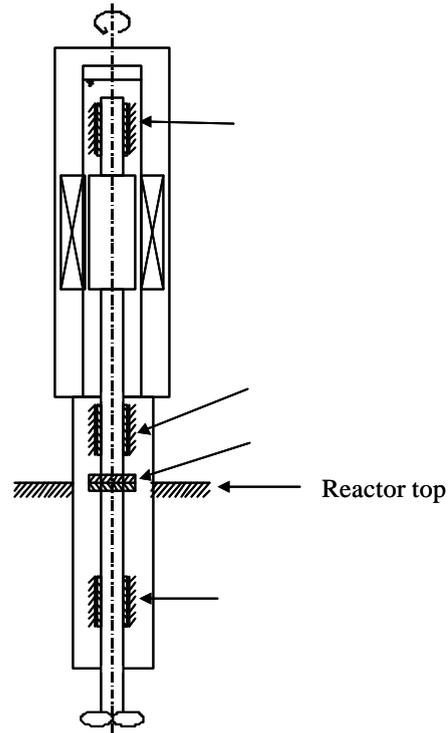


그림 2 MCP 평가요소

## (2) 제어봉구동장치

볼스크류집합체의 주요부품은 그림 3과 같이 스크류와 볼너트, 볼베어링, 베벨기어 등으로 평가요소는 그림 4와 같다. 스크류의 위쪽에는 상부용기의 설치오차등에 의한 굽힘 하중이 스크류로 직접 전달되는 것을 방지하기 위하여 스크류상단에 이동안내를 위한 안내축을 힌지 조인트로 연결하며, 또한 이 안내축은 스크류의 회전 방지 및 상하 이동중의 마찰저항 감소를 위한 미끄럼베어링과 연결되어 있으며 이 미끄럼베어링에는 양쪽에 홈이 있고 이 홈이 상부용기에 설치된 베어링가이드를 따라 움직이게 된다. 볼너트의 볼이 구동하는 내부에는 외부로부터의 이물질이 침입하는 것을 방지하기 위하여 볼너트 상하에 이물질차단베어링을 설치하는데 이 베어링의 한쪽면은 스크류의 홈에 물리도록 설계되어 있으며 특수 그라파이트 베어링을 사용한다. 이 베어링의 회전 미끄럼 방지를 위하여 베어링케이스를 설치하고

밀착성의 향상을 위한 스프링을 베어링위에 설치한다. 볼베어링과 볼스크류의 재질은 크롬 니켈 티타늄 알루미늄의 합금으로 17MPa, 120℃에서 견딜 수 있는 재질이어야 하고 베어링에 작용하는 하중은 볼베어링이 200kgf이고 슬라이딩 베어링이 50kgf이다. 볼베어링은 200rpm으로 회전하며 슬라이딩베어링은 50mm/s로 움직인다.

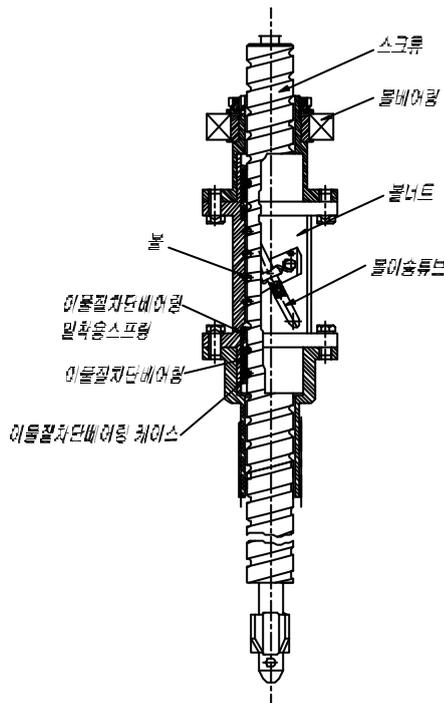


그림 3 CEDM 볼스크류집합체

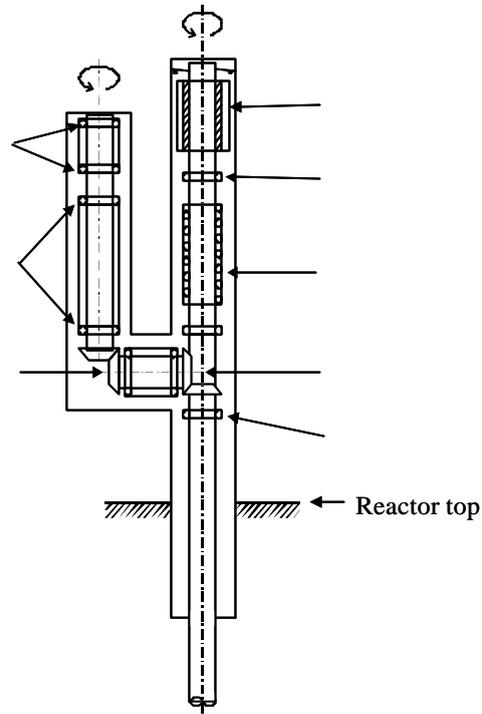


그림 4 CEDM 평가요소

### 3. 실험장치

미끄럼운동을 시뮬레이션할 수 있는 마모시험 방법으로는 pin-on-flat, pin-on-disk, ball-on-disk, ball-on-three-flat, ring-on-block, pin-on-block등 많이 쓰이고 있지만 가장 보수적으로 마모량의 정량화가 간편하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 pin-on-flat 타입을 선택하였고, 구름운동의 시뮬레이션은 베어링 한 쌍을 테스트 할 수 있는 볼베어링 시험기를 선택하였다. 시험은 하중, 미끄럼 속도, 온도, 윤활유의 공급 등과 같은 트라이볼로지적 조건을 실제조건과 일치하도록 해야한다.<sup>[40]</sup> 실제조건의 트라이볼로지적 특성을 시뮬레이션하기 위한 평가 시험기는 시험기의 기하학적인 조건, 윤활제의 도입조건, 접촉조건을 실제조건과 유사하게 해야 한다. 따라서 본 연구에서는 가장 적합하다고 판단되어지는 실험장치는 원자로 냉각시스템에서 주냉각재펌프나 제어봉구동장치의 고온, 고압의 실제조건과 유사한 환경분위기를 만들 수 있는 영국 AEA Technology 의 NCT(The National Centre

Tribology)사의 마찰·마모시험기로 그림 5와 같이 오토 클레이브와 워터 케미스트리, 트라이보메타, 컨트롤 판넬로 구성되어있다. 오토클레이브는 직경이 150mm×300mm 깊이로 재질은 SUS316으로 온도와 압력을 시험조건에 맞도록 구성해 준다. 워터 케미스트리는 순수한 물을 오토클레이브에 공급하고 트라이보메타는 왕복 마찰·마모시험기와 볼베어링시험기로 구성되어 있으며 오토클레이브내에서 마찰과 마모시험이 행해진다. 컨트롤 판넬은 하중, 속도, 스트로크, 온도, 마찰력측정 및 제어한다.



그림 5 실험장치

#### (1) 왕복 마찰·마모시험기

그림 6은 왕복 마찰·마모시험기로 MCP의 저널베어링과 추력베어링, CEDM의 미끄럼베어링을 실제 조건과 유사하게 시험할 수 있는 시험기로 최대 미끄럼속도는 450mm/min이다. 이 속도는 15mm까지 크랭크를 움직여 분당 1에서 15싸이클 사이를 선택적으로 조정할 수 있다. 하중범위는 26000N까지의 하중범위내에서 일반적으로 작동한다. 시험 시편의 하중은 시험 셋업시 측정하고 입력속도와 스트로크는 컨트롤 판넬에 의해 조정하고 테스트 회전수가 표시된다. 스트레인게이지의 출력값을 이용하여 마찰력을 측정할 수 있다.

표준 시편은 16mm×32mm×6.4mm 두께인 평판과 끝의 반경이 51mm인 직경이 4.8mm×14mm 길이를 가진 핀으로 구성되어 있다. 시편의 기하학적 형상으로 다양한 하중과 핀의 반경에 의해 접촉응력을 변화시킬 수 있다.

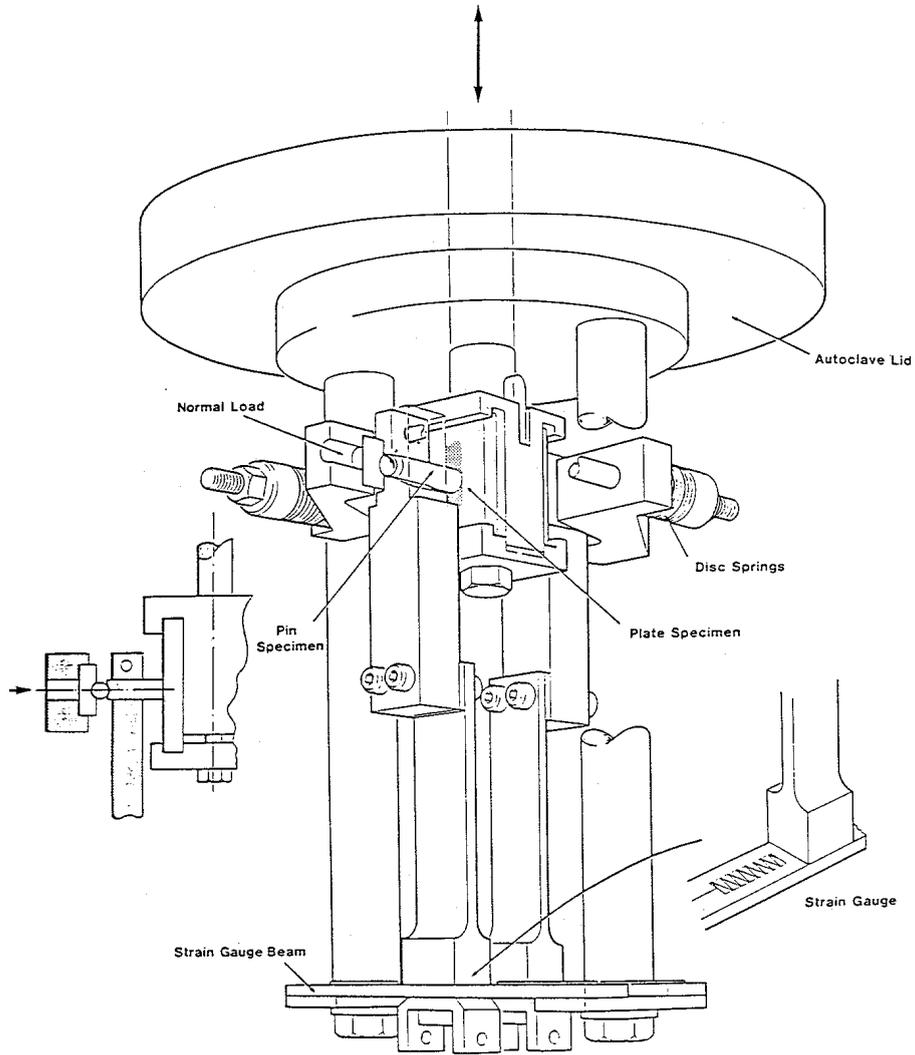


그림 6 왕복 마찰·마모시험기

(2) 볼베어링 마찰·마모시험기

그림 7은 볼베어링 마찰·마모시험기로 CEDM의 볼베어링의 마찰·마모특성을 시험하는 시험기로 베어링의 전체직경을 110mm까지 하우징을 교체해서 볼사이즈를 조정할 수 있고 회전속도는 1500rpm까지 조정이 가능하다. 하중범위는 10~500kgf 까지 베어링에서 스프링에 의해 미리 하중을 가한다. 모터는 베어링에서 접촉응력에 의해 제한된 하중으로 베어링 한 쌍을 회전시킨다.

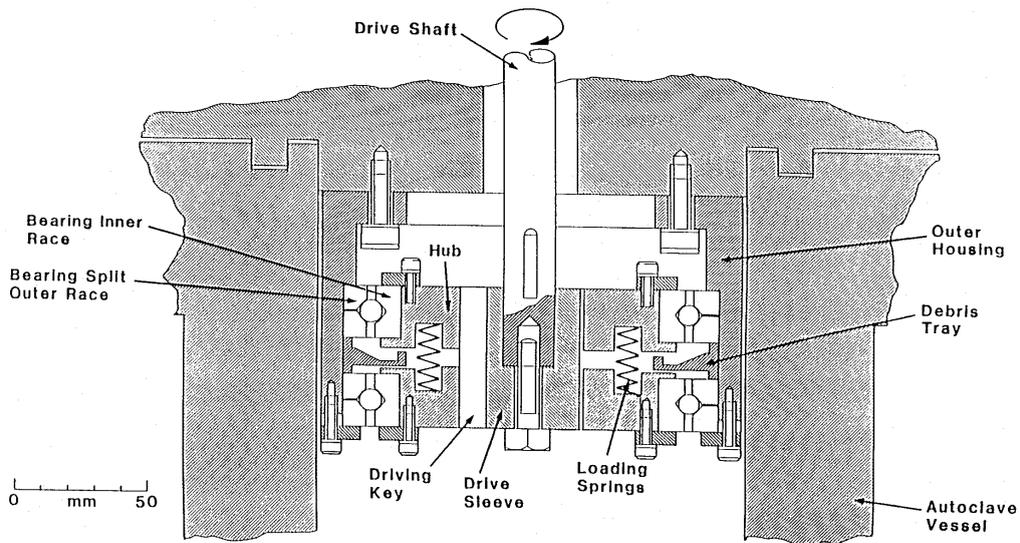


그림 7 볼베어링 마찰·마모시험기

#### 4 수명평가

표면의 마모흔적크기 및 표면의 미세 구조측정을 위해서 주사형전자현미경(SEM)을 이용하여 표면의 마모흔적크기 및 표면의 미세구조를 측정하고 Talysurf 등의 조도계를 이용하여 표면조도를 측정하여 표면의 마모거동을 고찰한다. 마모량 측정은 시편을 에틸알콜이나 아세톤, 헥사인등을 이용하여 초음파세척을 하고 0.0001g 까지 측정할 수 있는 전자저울을 이용하여 시험전과 후를 비교하여 마모량을 측정하거나 레이저 광학현미경을 이용하여 마모량의 체적을 구할 수 있다. 하중변화와 마찰력측정은 시험기에 부착된 스트레인게이지에 의해 측정되며 앰프를 통한 증폭과 필터링을 거친 뒤 A/D변환된다.

베어링의 수명평가방법은

$$k = \frac{W}{NS} \text{ 에서 마모를 } k \text{ 를 실험을 통해 구하고}^{[6]}$$

여기서 구한  $k$  를 이용해

$$S = \frac{Wk}{kN} \text{ 미끄럼거리 } S \text{ 를 예측할 수 있다.}$$

여기서  $W$  : 마모체적

$Wk$  : 허용마모체적

$N$  : 하중

$S$  : 미끄럼거리

따라서 수명을 평가하기 위해  $k$  값과  $Wk$  값을 구해야 한다.

$Wk$  값은 유막(h)과 관련이 있기 때문에 최소유막을 고려해  $Wk$  값을 정하고 미끄럼거리  $S$  를 통해 수명을 예측할 수 있다.

## 5. 결론

MCP와 CEDM 베어링시험을 위한 고온, 고압의 트라이보메타는 우리가 요구하는 환경을 만족시켜 주고 마모량 정량화 및 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다. 또한 주기기의 안정성을 확보하기 위하여 고온, 고압환경 중에서 실험이 필요하며 고온, 고압 트라이보메타를 이용한 마모량을 정량화하는 기술을 확립해야 한다. 기계요소와 마모상태나 파괴를 조기에 검지하여 예방조치를 하기 위해 마모입자를 분석기기를 통하여 그 특성을 파악하고 대책을 강구하여야 한다. 본 연구에서는 고온, 고압 환경 하에서 베어링의 마찰·마모시험을 위한 사전준비단계로 향후 트라이보메타를 이용한 지속적인 연구를 통하여 원자로내의 각종 베어링에 적용함으로써 개선점이 요구되면 다른 재질이나 설계를 변경하여 최적의 트라이볼로지 특성을 갖도록 해야 할 필요성이 있다.

## 후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 김종인외 다수, 일체형원자로 기기개발 및 검증시험 KAERI/RR-1889/98 -1단계 최종보고서, 한국원자력연구소, 1999
- [2] 정군석외 다수, “냉각재순환펌프 제작기술 개발 및 원형제작 KAERI/CM-249/98,” 한라산업(주) KAERI/CM-249/98, 1999
- [3] Joseph E. Shigley, “Mechanical engineering design,” McGRAW-HILL
- [4] 권오관외 다수, “Ceramics의 극한적용을 위한 마찰·마모 Mechanism 연구,” 한국과학기술원 N603(5)-3917-2, 1989
- [5] 조용후외 2명, “PVD방법에 의한 세라믹 코팅의 마멸특성 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제7호 pp.1229~1236, 1998