

## SMART 냉각재순환펌프용 스러스트 베어링의 윤활 해석

### Lubrication Analysis of the Thrust Bearing in the Main Coolant Pump of SMART

이재선, 박진석, 김지호, 허형, 김종인

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

일체형원자로에 사용되는 냉각재순환펌프에는 회전축계의 원활한 회전을 위하여 저어널베어링과 함께 스러스트베어링이 사용된다. 냉각재순환펌프는 원자로의 구조 상 수직으로 배치되며, 특히 기계적 밀봉장치가 필요 없는 캔드모터가 사용됨에 따라 별도의 윤활유 공급 없이 원자로 냉각재를 이용하여 베어링 윤활이 이루어지므로 저점도의 물 특성으로 인해 충분한 하중지지용량의 발생을 기대할 수 없어 실리콘 그래파이트 재질의 자기윤활 특성을 동시에 이용한 베어링 설계가 필요하다. 본 논문에서는 냉각재순환펌프의 스러스트 하중을 지지하는 스러스트 베어링의 윤활 해석 방법을 제시하고, 베어링 설계 인자의 고찰 및 윤활 특성 규명을 위해 레이놀즈 방정식을 이용한 윤활 해석 결과를 고찰하고자 한다..

#### Abstract

Thrust bearing and journal bearings are installed in the main coolant pump for SMART to support the rotating shaft with proper lubrication. The canned motor type main coolant pumps are arranged vertically on the reactor vessel and especially the MCP bearings are lubricated with water without external lubricating oil supply. Because axial load capacity of the thrust bearing can hardly meet requirement to acquire hydrodynamic or fluid film lubrication state, self-lubrication characteristic of silicon graphite materials would be needed. Lubricational analysis method for thrust bearing for the main coolant pump of SMART is proposed, and lubricational characteristics of the bearings generated by solving the Reynolds equation are examined in this paper.

#### 1. 서 론

일체형원자로에서 냉각재순환펌프는 원자로에 수직으로 고정되어 작동되는 축류형 캔드모터펌프로써 원자로의 일차 냉각수를 순환시키는데 사용된다. 펌프를 구성하는 주요 부품들은 펌프몸체, 모터집합체, 축집합체, 베어링, 임펠러, 보조임펠러, 디퓨저 등이 있으며, 각 부품들은 펌프가 운전되는 동안에 기계적 반복하중, 마찰 및 마모, 열취성, 열응력, 부식 및 침식 등과 같이 다양한 기계적 하중과 화학적 변화를 겪게 된다. 냉각재 순환펌프의 효율 및 운전 특성은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 상, 하부에 설치된 저어널베어링과 스러스트 베어링의 윤활 및 운전 특성에 큰 영향을

받게 된다. 특히 일체형원자로의 냉각재순환펌프는 상용원자로에서 고장의 주원인이 되는 소형 냉각재 상실사고를 유발하는 기계적 밀봉장치를 사용하지 않으므로, 모터 자체의 유지보수가 유리하게 되었다. 독립순환 회로의 일차수는 회전축과 함께 회전하는 보조 임펠리에 의하여 펌프 내부를 순환하며 전동기를 냉각시킨다. 이 일차수는 베어링의 윤활제로 사용되며, 따라서 냉각재 순환펌프의 베어링은 고온, 고압의 낮은 점도를 갖는 물로도 충분히 윤활되어 마찰 및 마모가 적게 일어날 수 있는 구조로 설계되어야 한다. 베어링의 재질은 자기 윤활성이 우수한 그래파이트를 함유한 실리콘 재질로 만들어진다. 본 기기에 사용되는 특이한 형상의 저어널베어링의 윤활 해석에 관하여는 이재선[1]등에 의해 연구가 이루어졌다.

본 논문에서는 매우 불리한 운전 조건에서 운전되는 냉각재순환펌프용 스러스트베어링의 윤활 해석을 통하여 최적의 베어링 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

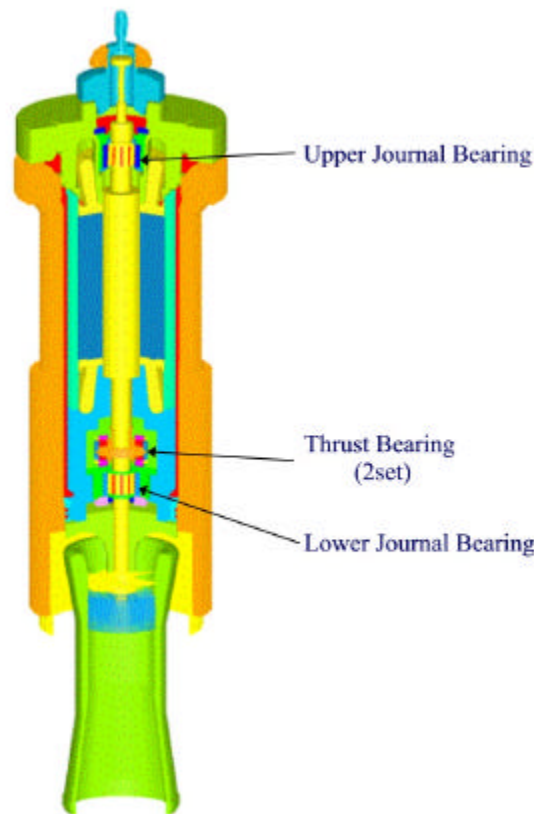


Fig. 1 Bearing arrangement of the main coolant pump

## 2. 베어링 윤활 해석

냉각재순환펌프에 설치되는 스러스트베어링은 Fig. 2와 같이 구성된다. 스러스트 하중의 방향이 상, 하로 변경되는 경우에 대비하기 위하여 스러스트베어링은 상부용 및 하부용으로 각각 구성되며, 상, 하부 베어링의 형상은 대칭형으로 표면 가공을 하게 된다. 2쌍의 스러스트베어링이 동시에 동수압을 형성하지 않게 하기 위해서는 스러스트 하중의 방향에 따라 하나의 베어링에만 동수압이 형성될 수 있도록 틈새가 필요하며, 따라서 냉각재순환펌프 축은 상하 스러스트베어링이 갖고 있는 틈새만큼 상하로 요동할 수 있는 구조가 된다. 저어널베어링은 축방향 하중이 작용하지 않도록 저어널집합체가 상하로 자유롭게 움직일 수 있도록 한다.

스러스트베어링에 도시된 큰 틈새는 스러스트베어링의 반지름 방향으로 냉각재가 순환할 수 있도록 깊은 홈을 가공한 것이며, 이 홈의 영향을 윤활 해석에 반영은 하지만 깊은 홈의 높이는 베

어링의 윤활 특성에는 거의 영향을 미치지 않는게 된다. 이는 베어링에 발생하는 동수압은 지극히 좁은 틈새 내에서 좁아지는 틈새로 유체가 밀려들면서 발생하게 되는데 이와 같은 큰 틈새에서는 동수압의 생성을 기대할 수 없기 때문이다.

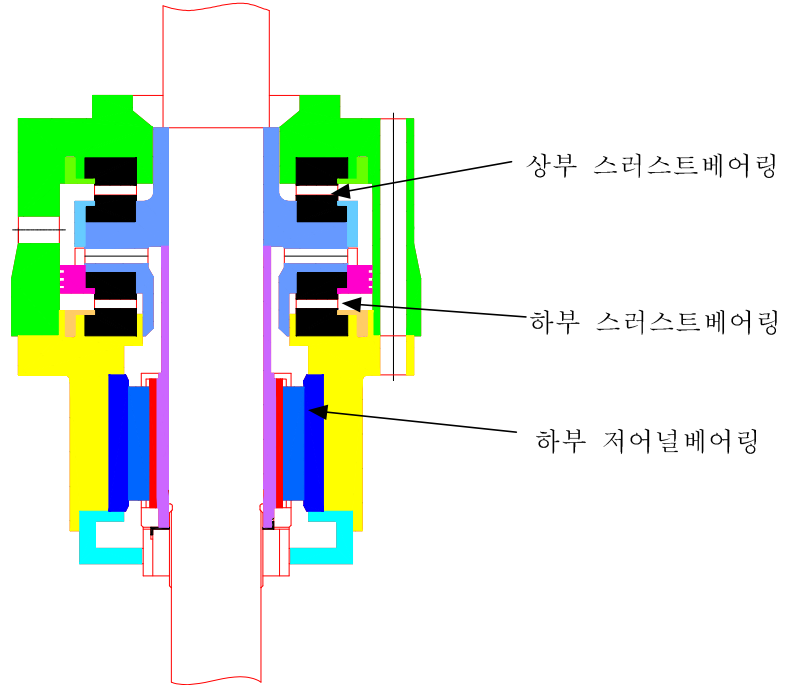


Fig. 2 Schematics of the lower bearing assembly

베어링의 윤활 해석을 위해 동일한 섹션으로 나누어진 고정 표면형 스러스트베어링을 고려한다. 각 섹션은 스러스트베어링에 편심이나 경사가 발생하지 않는 경우에 동일한 동수압을 형성시키게 되며, 본 연구에서는 추후 경사 발생에 의한 영향을 고려하기 위해 모든 섹션을 동시에 해석할 수 있는 2차원의 윤활해석을 수행하도록 하였다. 각 섹션 내에서 동수압 발생 시작단과 끝단은 동일한 높이 차이를 갖도록 설계하며, 가공성을 고려하여 한 반지름 구간에서 직선의 테이퍼 형상을 갖는 베어링이 되도록 하였다.

레이놀즈 방정식을 적용함에 있어 냉각재순환펌프 베어링은 일반적인 저어널베어링에 비해 틈새가 크고, 점도가 낮은 유체로 운전되므로 레이놀즈 수가 크게 되고, 이로 인해 난류가 발생되기 쉬워 이에 따른 영향을 고려하는 연구 방법이 제안되었다[2]. 그러나 난류의 발생으로 인해 하중 지지용량의 감소 효과[3]는 난류가 발생하는 큰 틈새 구간에서의 압력 형성이 극히 작은 적용 부위에서는 전체 하중 지지용량의 기여도가 극히 작게 되므로 본 연구에서는 이에 따른 영향은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 베어링의 안지름은 82mm, 바깥지름은 125mm인 경우에 대해 해석하였다. 고려된 베어링 크기는 SMART용 냉각재순환펌프의 베어링 설계 사양으로 확정지어진 데이터는 아니며, 스러스트베어링의 특성 고찰을 위해 참고로 해석에 적용한 값이다.

윤활 해석에 적용되는 2차원의 레이놀즈 방정식은 다음과 같다[4].

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r h^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = 6\mu U \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12r\mu V \quad (1)$$

좌표계는  $r, \theta$  좌표계를 이용하며, 각 인자는 다음과 같다.

$\mu$  : 유체점도

$U$  : 해석점에서의 베어링 면간의 원주방향 상대속도

$V$  : 베어링 면간의 수직방향 상대속도

$h$  : 해석점에서의 유막두께

본 해석에서는 냉각재순환펌프의 회전 조건에 따른 스러스트베어링의 틈새 영향을 고려하지 않기 때문에 레이놀즈 방정식의 우변 마지막 항에 의한 영향은 고려하지 않는다. 이 항은 두 베어링 표면간의 시간에 따른 높이 변화로 인한 짜내기 효과를 고려한다.

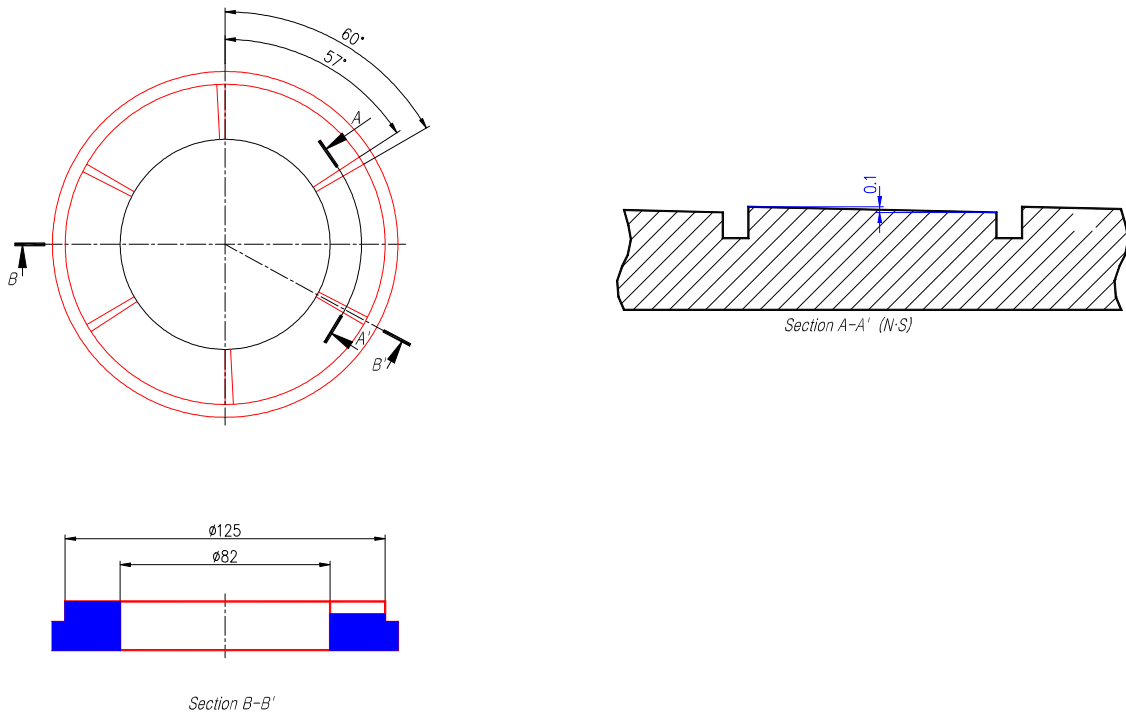


Fig. 3 Thrust bearing shape

식 (1)은 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하여 수치해석적으로 풀이되며, 수렴속도의 증가를 위하여 ADI (Alternating Direction Implicit) 방법을 적용하였다.

계산된 동수압은 베어링 면에 대해 적분하여 베어링의 최종 하중지지용량으로 산출하도록 하였다.

$$F_{sum} = \int_A p dA \quad (2)$$

### 3. 윤회 해석 결과

해석에 고려한 베어링 및 유체 데이터는 다음과 같다.

베어링 안지름 : 82mm

베어링 바깥지름 : 125mm

베어링 섹션 수 : 6개  
 깊은 홈 폭 : 3°  
 축회전속도 : 3600 rpm

본 연구에서는 100°C의 물로 윤활되는 조건에 대해 기본적인 해석을 수행하였으며, 온도 변화에 따른 윤활 특성 변화를 고찰하기 위하여 각 온도별 물의 점도를 다음과 같이 고려하였다.

80°C : 0.3587 cP  
 100°C : 0.286 cP  
 120°C : 0.236 cP  
 140°C : 0.200 cP

일반적으로 스러스트베어링은 운전하면서 변화하는 최소유막두께에 따라 하중지지용량이 크게 변화하는 특성을 갖게 된다. 저점도의 유체로 윤활되는 냉각재순환펌프용 베어링의 경우에도 이와 같은 일반적인 베어링 특성은 동일하게 발생될 것으로 예측되며, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

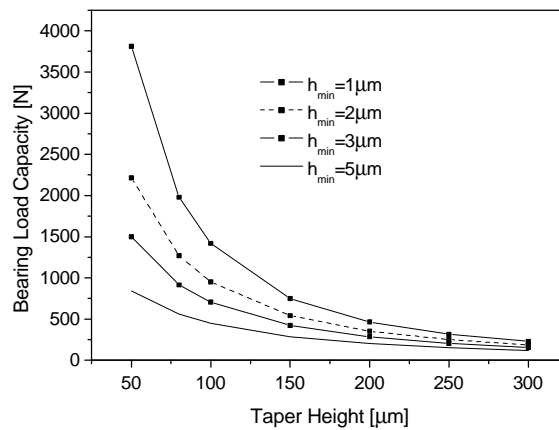


Fig.4 Diagram of load capacity variation with respect to minimum film thickness

Fig. 4에 보이는 바와 같이 베어링의 하중지지용량은 고정륜과 회전륜 간의 최소유막두께가 감소할수록 급격하게 증가되는 양상을 보이고 있으며, 특히 테이퍼 높이 차가 작은 경우에 매우 큰 하중지지용량의 증가를 예측할 수 있다. 테이퍼 높이에 따라서 베어링의 하중지지용량은 비선형적으로 급격히 증가되는 것을 예측할 수 있는데, 냉각재순환펌프와 같이 중형의 회전체 중량 및 임펠러 하중을 지지하여야 하는 경우에는 가급적 미세한 테이퍼 높이 차를 갖는 베어링의 설계가 필요할 것으로 예측된다.

베어링에 발생하는 최소유막두께는 베어링의 마찰, 마모와 관련된 시스템 수명과 깊은 관계를 갖게 되는데, 베어링 면의 합성 표면 거칠기를  $0.65\mu m$  이하로 관리할 경우에 완전 유체 윤활 상태를 이룰 수 있는 최소유막두께는 약  $2\mu m$  이상이 된다[5]. 베어링에 있어 합성 표면 거칠기에 대한 최소유막두께의 비( $\lambda$ )가 3 이상이면 완전 유체윤활상태가 되어 마찰이 최소가 되며, 이때는 유체의 전단력으로 인한 저항만이 발생하게 되지만,  $\lambda$ 가 1과 3사이인 경우에는 표면거칠기 마찰과 유체마찰이 공존하게 되어 급격하게 마찰력 및 마모가 증가하게 된다.

Fig. 5는 스러스트베어링이 운전되는 온도에 따라 하중지지용량의 변화를 고찰한 결과이다. 운전 온도의 변화에 따라 가장 크게 변화되는 인자는 유체 점도이며, 온도가 증가함에 따라 유체의 점도가 감소하게 되어, 이에 따라 베어링의 하중지지용량은 감소하게 된다. 따라서 베어링에 있어

운전 온도는 가급적 낮게 유지하여 주는 것이 필요한데, 이는 윤활 특성의 향상 뿐 만 아니라, 실리콘 그래파이트 재질과 하우징 재질의 열팽창 차이로 인한 재질의 파손 예방 및 설치 오차의 감소를 피할 수 있는 방안이 된다. Fig. 5의 결과에서 예측되듯이 운전 온도가 80℃에서 140℃로 증가하게 되면 하중지지용량은 약 50% 감소하게 될 것이다. 해석 조건은 2 $\mu$ m의 최소유막두께를 갖고, 3600rpm의 속도로 회전하는 경우이다.

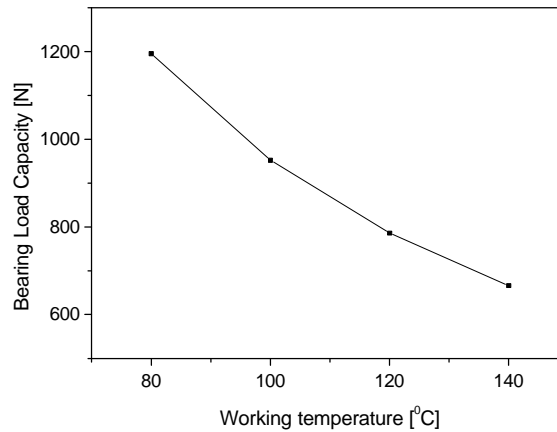


Fig. 5 Bearing load capacity according to working temperature

Fig. 6은 스러스트베어링 면에 가공되는 베어링 섹션 수에 따른 하중지지용량의 변화를 예측한 결과이다. 베어링 면이 갖는 면적비는 전체 면적에 대해 90%로 일정하게 고려하였으며, 해석 조건은 2 $\mu$ m의 최소유막두께를 갖고, 3600rpm의 속도로 회전하는 경우이다. 이 결과로부터 베어링 섹션수가 증가할수록 하중지지용량이 감소되는 것으로 예측된다. 이는 베어링 섹션의 시작점과 끝점에서는 유체의 압력과 동일한 경계 압력으로 동수압이 설정되고 동수압이 증가되는 구간은 베어링 섹션 내부인데, 베어링 섹션의 수가 증가하면 동수압 분포가 경계 압력으로 보다 많이 설정되도록 하는 효과가 있게 되어 하중지지용량이 감소되는 결과를 예측하게 된다.

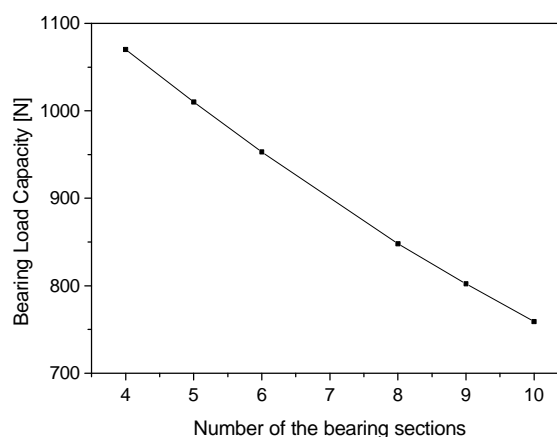


Fig. 6 Bearing load capacity according to the number of bearing sections

Fig. 7은 스러스트베어링의 회전속도에 따른 하중지지용량의 변화를 예측한 결과이다. 일반적인

베어링의 특성과 같이 베어링 면간의 상대속도 차이가 증가할수록 베어링의 하중지지용량은 증가하게 된다. 해석 조건은  $2\mu\text{m}$ 의 최소유막두께를 갖고, 3600rpm의 속도로 회전하는 경우이다.

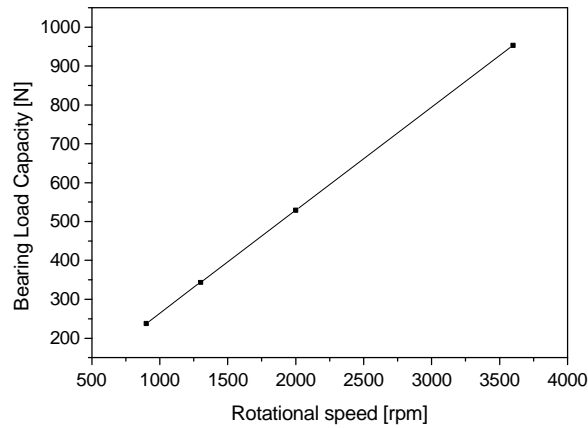


Fig. 7 Bearing load capacity according to rotational speed

#### 4. 결 론

- 1) 냉각재순환펌프에 사용되는 스러스트베어링의 윤활 해석을 위해 수개의 섹션으로 구분된 테이퍼 형상의 고정 표면형 베어링을 모델링하였으며, 레이놀즈 방정식을 이용하여 동수압 분포를 구하였다.
- 2) 냉각재순환펌프용 베어링의 하중지지용량은 베어링의 섹션 수와 테이퍼 높이 차에 큰 영향을 받음을 확인하였으며, 지정된 사용 조건에 있어 최적의 설계 데이터를 구축할 수 있는 기초 자료를 제공하였다.
- 3) 냉각재순환펌프용 베어링은 저점도의 윤활제를 사용하게 되므로 완전유체윤활을 달성하기 어렵기 때문에, 경계윤활 구간 내에서 주로 운전이 될 것으로 예측되며, 추후 베어링 재질의 마찰, 마모특성을 고려하여 최적 베어링 설계가 이루어지도록 하여야 한다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] 이재선, 박진석, 김지호, 김종인, 장문희, "SMART 냉각재 순환펌프용 저어널 베어링의 윤활 해석", 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
- [2] 이종원 외, "냉각재순환펌프의 회전축 동특성 해석코드 개발", 한국과학기술원, 1998
- [3] B. J. Hamrock, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication," McGraw-Hill, 1994
- [4] Oscar Pinkus and Beno Sternlicht, "Theory of Hydrodynamic Lubrication," McGraw-Hill Book Co., 1961
- [5] B. J. Hamrock and D. Dowson, "Ball Bearing Lubrication," John Wiley & Sons, 1981