2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 냉각재 순환펌프용 저어널 베어링의 윤활 해석

Lubrication Analysis of the Journal Bearing in the Main Coolant Pump of SMART

이재선, 박진석, 김지호, 김종인, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

일체형원자로에 사용되는 냉각재 순환펌프에는 회전축계의 원활한 회전을 위하여 일반적인 저어널베어링과 비교하여 독특한 형상의 저어널베어링이 사용된다. 냉각재 순환펌프는 원자로의 구조 상 수직으로 배치되며 특히 기계적 밀봉장치가 필요 없는 캔드모터가 사용됨에 따라 별도의 윤활유 공급 없이 물을 이용하여 베어링 윤활이 이루어지므로 베어링 지름에 비해 광폭의 베어링이 사용되며, 특히 축방향으로 홈을 갖는 구조로 설계된다. 또한 장축을 지지하게 되어 정밀한 가공을 기대할 수 없어 큰 틈새를 갖는 구조가 된다. 본 논문에서는 수직으로 배치된 여러 개의 홈을 가진 냉각재 순환펌프용 저어널베어링의 윤활 해석 방법을 제시하고, 레이놀즈 방정식을 이용하여 베어링의 윤활 특성을 규명하고자 한다.

Abstract

Special type 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. The MCP bearings are lubricated with water without external lubricating oil supply. Long bearing with vertical grooves is designed with relatively large bearing clearance to accomodate the long shaft. Lubricational analysis method for journal bearing with vertical grooves in the main coolant pump of SMART is proposed, and lubricational characteristics of the bearings are examined in this paper.

1. 서 론

일체형원자로에서 냉각재 순환펌프는 원자로에 수직으로 고정되어 작동되는 축류 캔드모터(axial canned motor)로서 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, 마칠 및 마모, 열취성, 열응력, 부식 및 침식 등과 같이 다양한 기계적 하중과 화학적 변화를 겪게 된다. 냉각재 순환펌프의 마찰 및 마모 특성은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 상, 하부 및 중간에 설치된 저어널베어링과 추력 베어링의 윤활 특성에 큰 영향을 받게 된다. 특히 일체형원자로의 냉각재 순환펌프는 상용원자로에서 고장의 주원인이 되고 소형 냉각재 상실사고를 유발하는 기계적 밀봉장치를 사용하지 않으므로 모터 자체

의 유지보수가 유리하게 되었으며, 펌프 내부의 독립 순환 회로의 냉각수는 추력 베어링에 의해 원자로의 일차수와 격리되게 된다. 독립순환 회로의 일차수는 회전축과 함께 회전하는 보조 휠에 의하여 펌프 내부를 순환하며 전동기를 냉각시킨다. 이 일차수는 베어링의 윤활제로 사용되며, 따라서 냉각재 순환 펌프의 베어링은 고온, 고압의 낮은 점도를 갖는 물로도 충분히 윤활되어 마찰 및 마모가 적게 일어날 수 있는 구조로 설계되어야 한다. 베어링의 재질은 자기 윤활성이 우수한 그라파이트를 함유한 실리콘 재질로 만들어지며, 실리콘 그라파이트는 베어링 케이스에 고정되어 베어링 역할을 하는 구조를 갖는다.

본 논문에서는 특이한 형상을 갖고, 매우 불리한 운전 조건에서 운전되는 냉각재 순환펌프의 윤활 해석을 통하여 최적의 베어링 설계의 기초 자료를 제공하고자 한다.

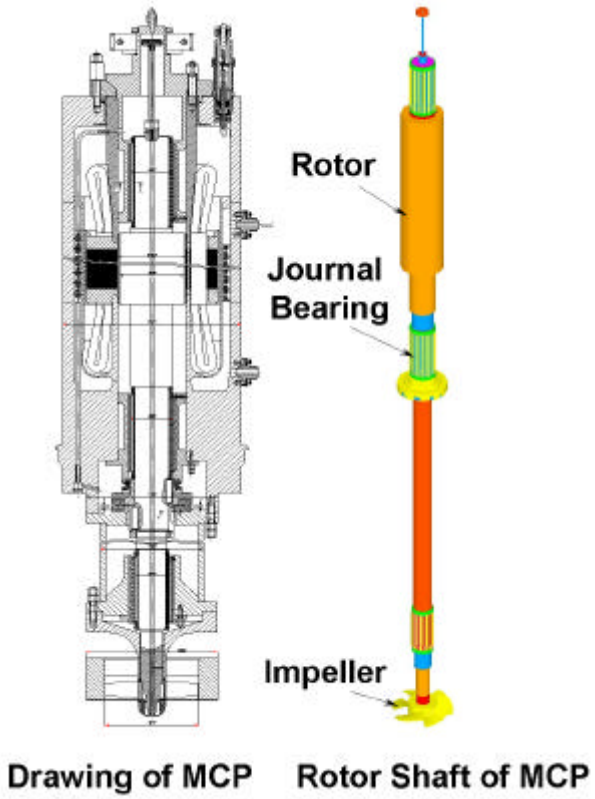

Fig. 1 냉각재 순환 펌프의 구조

2. 베어링 윤활 해석

냉각재 순환펌프에 설치되는 저어널베어링은 Fig. 2와 같이 구성된다.

저어널 베어링은 12개의 실리콘 그라파이트 재질 베어링이 등간격으로 원주 상에 배치되며, 각 베어링은 각각 독립된 베어링 역할을 수행하게 된다. 각 베어링의 길이방향으로는 1차수의 일정한 압력이 경계 압력으로 작용되며, 각 베어링은 베어링 케이스에 고정되므로 축의 편심됨에 따라 규칙적인 틈새 함수를 갖는 구조이다.

각 베어링은 저어널베어링 형식으로 구성되지만 하나 하나의 실리콘 그라파이트 재질은 독립된 직선 베어링과 같은 거동을 나타내게 된다. 이를 도시하면 Fig. 3과 같다.

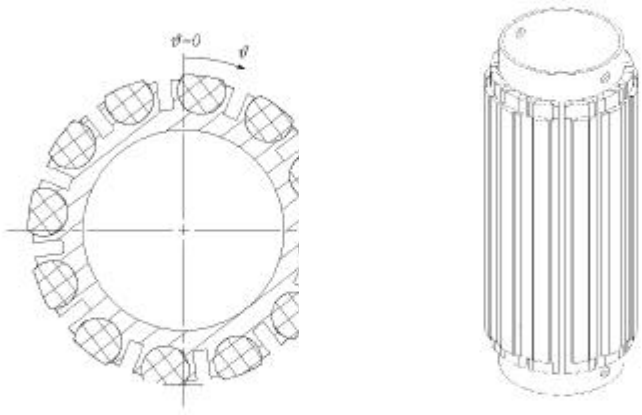

Fig. 2 **저어널 베어링의 구조**

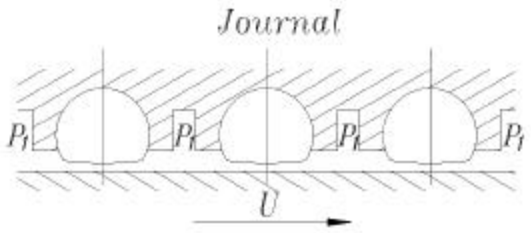

Fig. 3 **베어링의 해석 모델**

베어링의 윤활 해석을 위해 원형으로 배치된 베어링의 구성을 Fig. 3**과 같이 직선 베어링의 운동으로 변환 고려될 수 있으며, 이 때 틈새 함수는 원형 배열에서의 틈새를 모사할 수 있도록 한다. 이는 유막 두께가 베어링 지름에 비해 매우 작고, 유막의 곡률이 무시될 수 있어 저어널베어링의 윤활 해석에 일반적으로 적용되는 가정이다**[1]. **베어링의 윤활 해석을 위해 나비어-스토크 방정식으로부터 유도된 레이놀즈 방정식이 적용된다. 베어링의 지름대 폭 비가** 1:2**를 넘는 경우 무한 베어링 이론**(Infinitely wide journal bearing)**을 사용할 수 있으므로** 1**차원의 레이놀즈 방정식을 적용할 수 있다**[2]. **무한 베어링 해석은 베어링의 원주방향 유동만을 고려하고 축방향의 누수를 고려하지 않으며, 베어링의 양 끝단을 제외하고는 거의** 2**차원 해석과 동일한 동수압 분포를 예측할 수 있다. 본 해석에서는** 3**개의 저어널 베어링 중 상부 베어링을 해석 대상으로 고려하며, 이 경우 베어링의 지름은** 65mm, **길이는** 130mm**이다. 레이놀즈 방정식은 다음과 같다.**

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right) = -6U\frac{\partial h}{\partial x} + 12\frac{dh}{dt} \tag{1}$$

좌표계를 Fig. 2**와 같이 설정하며, 이때 틈새함수는 다음과 같다.**

$$h = c(1 + \varepsilon\cos\theta) \tag{2}$$

여기서 h : **유막두께** (film thickness)

c : **반경방향 틈새** (radial clearance)

e : **편심량** (eccentricity)

ε : **편심율** (eccentricity ratio) $\left(= \frac{e}{c} \right)$

식 (1)**은 유한차분법**(Finite Difference Method)**을 이용하여 수치해석적으로 풀이되며**, 12**개 베어링에 각각 해석을 수행하고, 이에 따른 경방향 성분의 벡터 합으로 하중지지용량을 얻도록 한다. 레이놀즈 방정식을 적용함에 있어 냉각재 순환펌프 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**[3]. **그러나 난류의 발생으로 인해 하중지지용량의 감소 효과**[4]**는 난류가 발생되는 큰 틈새 구간에서의 압력 형성이 극히 작은 적용 부위에서는 전체 하중 지지용량의 기여도가 극히 작게 되므로 본 연구에서는 이에 따른 영향을 고려하지 않았다.**

계산된 동수압 분포로부터 베어링이 지지할 수 있는 하중의 크기는 하중 방향의 동수압 합력의 벡터합이 되므로, 각 베어링 요소의 합력을 구해 이를 다음 식 (3)**과 같이 합한다.**

$$F_{sum} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{z} F_\theta \cos\theta\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{z} F_\theta \sin\theta\right)^2} \qquad (3)$$

3. 윤활 해석 결과

해석에 고려한 베어링 및 유체 데이터는 다음과 같다.

베어링 지름 : 65mm
베어링 길이 : 130mm
베어링 요소 수 : 12EA
베어링 요소의 전체 원주에 대한 비 : 50%
윤활제 점도 : 1 cP

길이 130mm**의 각 베어링 요소에 발생하는 동수압을 계산하여 베어링 틈새 크기에 따른 하중지지용량의 크기 변화를 고찰한 결과는 다음과 같다.**

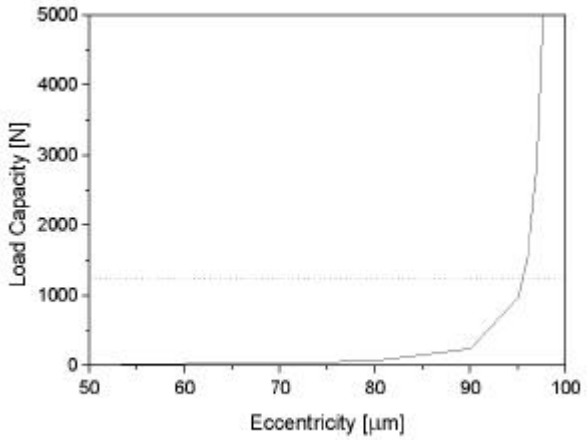

Fig.4 Load capacity (c = 100 μm)

Fig. 4**는** 100㎛**의 반경 틈새를 갖는 경우에 편심량에 따른 베어링 하중지지용량을 도시한 그래**

프이다. 이 경우에 저어널베어링으로 경방향 하중을 지지할 수 있는 구간은 편심이 약 90㎛ 이상 발생한 이후이며, 그 이전에는 거의 하중지지능력이 없음을 알 수 있다. 그러나 90㎛ 이상의 편심이 발생하면 급격하게 하중지지용량이 증가하여 경방향 하중을 지지할 수 있게 된다. 냉각재 순환펌프에는 약 1,250N의 경방향 하중이 작용되며, 이 경우에는 96.4㎛의 편심이 발생하여 회전축이 평형 상태에 있게 된다. 최소유막두께는 3.6㎛ 발생하며, 베어링 면의 합성 표면 거칠기가 1.2㎛ 이하인 경우에 완전 유체 윤활 상태가 된다[5]. 베어링에 있어 합성표면거칠기에 대한 최소유막두께의 비(Λ)가 3 이상이면 완전 유체윤활상태가 되어 마찰이 최소가 되며, 이때는 유체의 전단력으로 인한 저항만이 발생하게 되지만, Λ가 1과 3사이인 경우에는 표면거칠기 마찰과 유체마찰이 공존하게 되어 급격하게 마찰력 및 마모가 증가하게 된다.

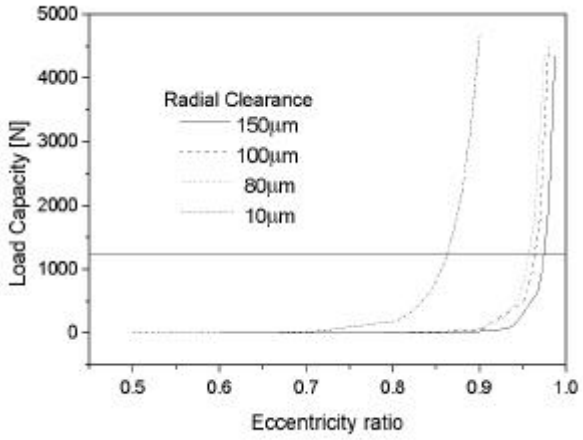

Fig. 5 Bearing load capacity according to eccentricity ratio

Fig. 5는 반경 틈새를 10㎛에서 150㎛로 변화시켜 가면서 편심율에 따른 하중지지용량의 변화를 고찰한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 작용하중을 지지하여 베어링계가 유막을 형성하고 금속 접촉을 방지하고 원활히 회전하기 위해서는 반경 틈새가 작을수록 작은 편심율에서 효과적으로 유막이 형성됨을 알 수 있다.

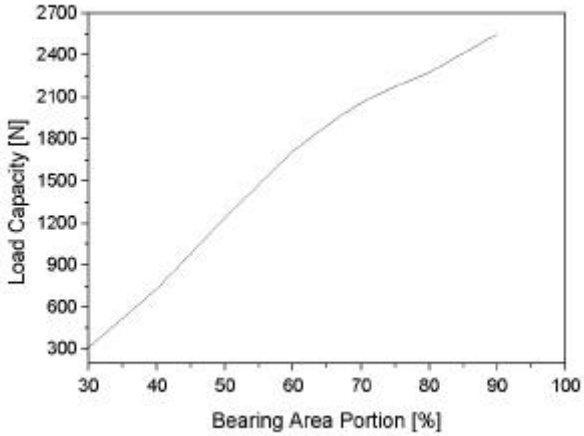

Fig. 6 Bearing load capacity according to area portion

Fig. 6은 전체 저어널 면적에 대해 실리콘 그라파이트 베어링이 차지하는 면적 비에 따른 베어링 하중지지용량의 변화를 고찰한 결과이다. 해석 조건으로 틈새는 100㎛을 고려하였으며, 편심량은

Fig. 4 의 결과와 동일하게 96.4㎛을 고려하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 틈새 및 편심 조건에서 베어링의 하중지지용량은 베어링 면적 비가 증가함에 따라 증가됨을 예측할 수 있으며, 홈을 지나는 유체의 유량을 고려하여 최적의 면적 비 선정에 관한 연구가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 냉각재 순환펌프에 사용되는 저어널베어링의 윤활 해석을 위해 각 베어링 요소를 직선 운동 베어링으로 모사하였으며, 레이놀즈 방정식을 이용하여 동수압 압력 분포를 구하였다.
2) 냉각재 순환펌프용 베어링의 하중지지용량은 베어링 틈새와 베어링 면적비에 큰 영향을 받음을 확인하였으며, 지정된 사용 조건에 있어 최적의 설계 데이터를 구축할 수 있는 기초 자료를 제공하였다.
3) 냉각재 순환펌프용 베어링은 저점도의 윤활제를 사용함에도 불구하고 완전유체윤활이 이루어지는 구간에서 외부 하중을 지지할 수 있음을 확인하였으며, 가공정밀도를 고려하여 최적 틈새의 선정이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Oscar Pinkus and Beno Sternlicht, "Theory of Hydrodynamic Lubrication," McGraw-Hill Book Co., 1961

[2] Dudley D. Fuller, "Theory and Practice of Lubrication for Engineers," John Wiley & Sons, 1984

[3] 한국과학기술원, "냉각재 순환펌프의 회전축 동특성 해석코드 개발", 한국원자력연구소, 1998

[4] B. J. Hamrock, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication," McGraw-Hill, 1994

[5] B. J. Hamrock and D. Dowson, "Ball Bearing Lubrication," John Wiley & Sons, 1981