

고온/고압 환경 하에서 물로 윤활되는 그루브 저어널 베어링의 윤활 해석

이재선[†] · 박진석 · 김종인

한국원자력연구소

Lubrication Analysis of the Grooved Journal Bearing Lubricated with Pressurized High Temperature Water

Jae Sun Lee[†], Jin Seok Park and Jong In Kim

Advanced Reactor Technology Development Team, KAERI

Abstract – Specially designed grooved journal bearings are installed in the main coolant pump for SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) to support radial load on the rotating shaft. The canned motor type main coolant pumps are arranged vertically on the reactor vessel and filled with circulating primary coolant which is pure water. The main coolant pump bearings are lubricated with this coolant without any other external lubricant supply. Because lubricating condition is too severe for this bearing to generate proper hydrodynamic film, investigation of lubrication characteristics of the journal bearing is important to satisfy life constraint of whole pump system, and the results will be applied to the analysis of dynamic characteristics of the shaft system. The bearing is made of silicon graphite which has self-lubricating effect. A lubrication analysis method is proposed for this vertically grooved journal bearing in the main coolant pump of SMART, and lubricational characteristics of the bearings are examined in this paper.

Key words – grooved journal bearing, load carrying capacity, pressurized high temperature water, lubricational characteristics.

1. 서 론

현재 상용 운전되고 있는 발전용 원자로 이외에 중소형 일체형 원자로가 안정성 향상 및 경제성 제고를 목적으로 최근 전세계적으로 개발이 추진되고 있다. 중소형 원자로의 비원자력발전 분야의 이용으로는 지역난방, 담수용 및 추진 기관 등에 향후 그 이용도가 크게 증가할 것으로 예측되고 있으며, 국내에서도 일체형의 강제순환방식을 채택하고 있는 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)라는 고유의 원자로를 기본 설계 단계에 있다. SMART는 증기발생기, 냉각재 순환펌프 및 가압기가 원자로 용기 내부에 배열 되도록 설계된다. 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, 마찰 및 마모, 열취성, 열응력, 부식 및 침식 등과 같이 다양한 기계적 하중과 수화학적 변화를 겪게 된다. 냉각재 순환펌프의 마찰 및 마모 특성은 저어널베어링과 스러스트 베어링의 윤활 특성에 큰 영향을 받게 된다. 독립순환 회로의 순환수는 회전축과 함께 회전하는 보조 임펠러에 의하여 펌프 내부를 순환하며 전동기를 냉각시킨다. 이 순환수는 냉각재 순환펌프 축의 위, 아래에 설치된 저어널베어링을 지나 시스템 전체를 순환하여야 하므로 저어널베어링에는 베어링 폭 방향의 유로가 형성되어야 한다. 이 순환수는 저

[†]주저자 · 책임저자 : leejs@kaeri.re.kr

저어널베어링 및 스텔베어링의 윤활제로 사용되는데, 냉각재 순환펌프의 베어링은 고온, 고압 상태에서 매우 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 만들어지며, 다수의 실리콘 그래파이트 핀은 저어널 케이스에 고정되어 저어널의 역할을 수행하게 되고, 역시 실리콘 그래파이트 재질의 베어링과 함께 저어널베어링을 형성하는 구조를 갖는다. 냉각재 순환펌프용 베어링은 베어링 폭 방향의 유로 형성 뿐 아니라, 실리콘 그래파이트 재질과 축 및 하우징으로 사용되는 금속 재질 간의 열팽창 차이로 인한 과도한 열응력 발생 방지를 위해 핀 고정 하우징의 형상을 설계하여야 하는데, 이로 인해 독특한 형상의 저어널베어링이 적용되었다. 본 논문에서는 이와 같이 특이한 형상을 갖고, 윤활 구조상 매우 취약한 조건에서 운전되는 냉각재 순환펌프용 저어널베어링의 윤활 해석을 통하여 최적의 베어링 설계 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 베어링 윤활 해석

냉각재 순환펌프에 설치되는 베어링은 Fig. 1과 같이 구성되며, 저어널의 단면 형상은 Fig. 2와 같다.

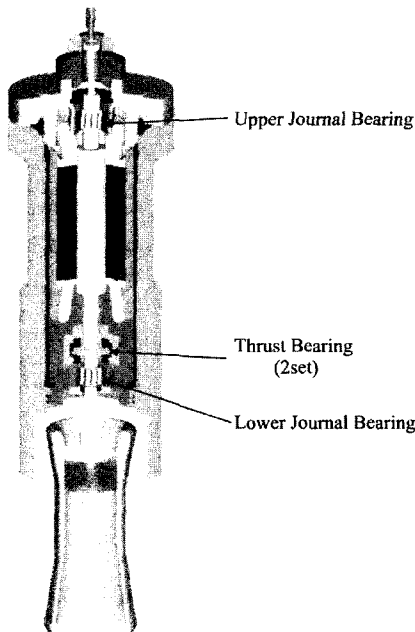


Fig. 1. Bearing arrangement of the main coolant pump.

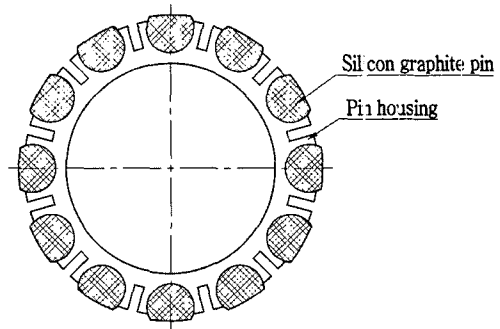


Fig. 2. A sectional view of the journal.

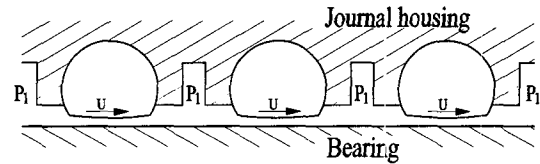


Fig. 3. Analysis model of the journal bearing.

저어널 베어링은 12개의 분리된 실리콘 그래파이트 핀이 등간격으로 원주 상에 배치되며, 핀은 각각 독립된 저어널 역할을 수행하게 된다. 각 핀의 길이방향으로는 저어널 베어링을 축방향으로 지나 흐르는 순환수의 일정한 압력이 경계 압력으로 작용된다. 각 핀은 핀 고정 하우징에 고정되므로 축에 핀심이 발생하면 일반 저어널베어링과 동일하게 규칙적인 틈새 함수를 갖는 구조이다. 베어링 전체로 보면 저어널베어링 형식으로 구성되어 있지만, 하나 하나의 핀은 독립된 직선 베어링과 같은 거동을 나타내게 된다. 이를 도시하면 Fig. 3과 같다.

베어링의 윤활 해석을 위해 원형으로 배치된 베어링의 구성을 Fig. 3과 같이 직선 베어링의 운동으로 변환 고려될 수 있으며, 이 때 틈새 함수는 일반 저어널 베어링의 틈새 함수로부터 구할 수 있다[1]. 직선 베어링으로 단순화된 냉각재 순환펌프용 베어링의 윤활 특성 해석을 위해서는 무한 베어링 이론을 사용할 수 있게 되어 1차원의 레이놀즈 방정식을 적용할 수 있다[2]. 본 경우에 직선 저어널로 구성되는 핀의 폭에 비해 길이가 약 4.8배이므로 핀 길이 방향의 유동에 의한 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 2 세트의 저어널 베어링 중 하부 베어링을 해석 대상으로 고려하며, 이 경우 저어널 베어링의 지름은 90 mm이다. 레이놀즈 방정식은 다음과 같이 적용한다[3].

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(G_x \frac{h^3 \partial p}{\mu \partial z} \right) = -\frac{1}{2} U \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 G_x 는 난류의 영향을 고려하는 상수이며, 다음과 같이 정의된다.

$$G_x = \frac{2^{1+m_0}}{n_0(2+m_0)} R_e^{-(1+m_0)} \quad (2)$$

$n_0=0.066$, $m_0=-0.25$ 이며, 레이놀즈 수가 $4000 < R_e < 10^5$ 인 경우에 적용 가능하다. R_e 는 레이놀즈 수이다. 난류 전이 영역인 $2000 < R_e < 4000$ 구간에서도 상기 식의 적용은 가능하지만 $R_e=2000$ 에서는 불연속이 발생하게 되며, 층류 구간인 $Re < 2000$ 에서는 $G_x = \frac{1}{12}$ 를 사용할 수 있다. 그러나 난류의 발생으로 인해 하중 지지용량의 감소 효과[4]는 난류가 발생하는 큰 틈새 구간에서의 압력 형성이 극히 작은 적용 부위에서는 전체 하중 지지용량의 기여도가 극히 작게 될 것으로 예측된다.

각 저어널에 발생하는 틈새함수는 다음과 같다.

$$h=c(1+\varepsilon \cos \theta) \quad (3)$$

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, 12개 개별 저어널에 대해 각각 해석을 수행하고, 이에 따른 경방향 성분의 벡터 합으로 하중지지용량을 얻도록 한다. 계산된 동수압 분포로부터 베어링이 지지할 수 있는 하중의 크기는 하중 방향의 동수압 합력의 벡터합이 되므로, 각 베어링 요소의 합력을 구해 이를 다음 식 (4)와 같이 합한다.

$$F_{sum} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^z F_{\theta} \cos \theta \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^z F_{\theta} \sin \theta \right)^2} \quad (4)$$

3. 해석 결과

해석에 고려한 베어링 및 유체 데이터는 다음과 같다.

- 베어링 지름 : 90 mm
- 베어링 길이 : 58 mm
- 베어링 요소 수 : 12개

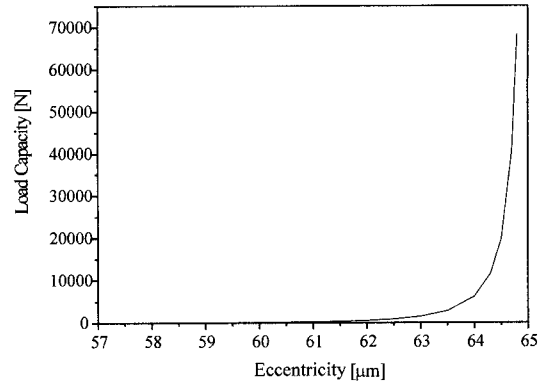


Fig. 4. Bearing load capacity ($c=65 \mu\text{m}$).

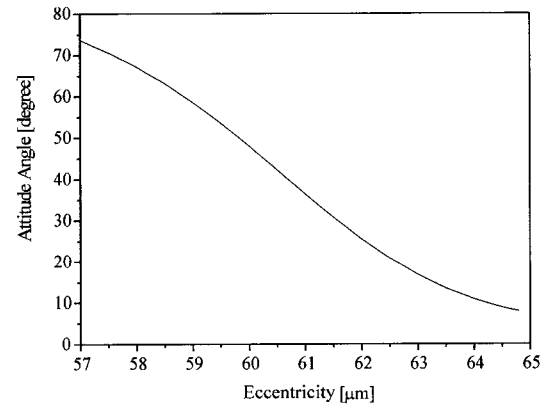


Fig. 5. Attitude angle ($c=65 \mu\text{m}$).

- 베어링 요소의 전체 원주에 대한 비 : 50%
- 윤활제 점도 : 0.286 cP (100°C 물)

각 저어널 요소에 발생하는 동수압을 계산하여 베어링 편심량 변화에 따른 하중지지용량의 크기 변화 및 자세각의 변화를 고찰한 결과는 Fig. 4, 5와 같다.

Fig. 4는 $65 \mu\text{m}$ 의 반경 틈새를 갖는 경우에 편심량에 따른 베어링 하중지지용량을 도시한 그래프이다. 이 경우에 저어널베어링으로 1000 N 이상의 경방향 하중을 지지할 수 있는 구간은 편심이 약 $62.7 \mu\text{m}$ 이상 발생한 이후이며, 작은 편심량의 증가로부터 급격한 하중지지용량의 증가를 예측할 수 있다. 최소유막두께는 $2.3 \mu\text{m}$ 으로 매우 작아, 베어링 면의 합성 표면 거칠기가 $0.77 \mu\text{m}$ 이하인 경우에 한하여 완전 유체 윤활 상태가 될 수 있다[5]. 따라서 냉각재 순환펌프용 베어링의 경우 베어링 면의 표면 거칠기 및 형상 정밀도가 매우 중요하며 정밀 가공이 요구된다. 자세각은 편심

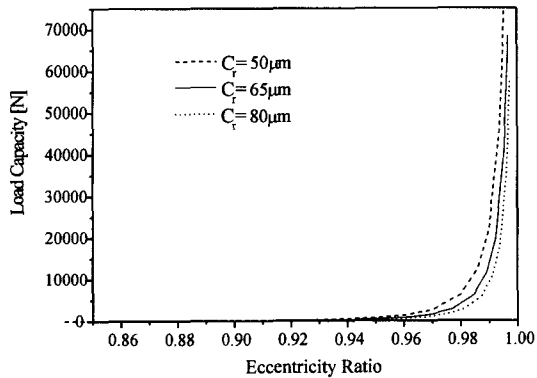


Fig. 6. Bearing load capacity according to eccentricity ratio.

량의 증가에 따라 감소하며, 이는 일반적인 저어널베어링의 거동과 일치한다[4].

Fig. 6은 반경 틈새를 $50\ \mu\text{m}$ 에서 $80\ \mu\text{m}$ 로 변화시키면서 편심율에 따른 하중지지용량의 변화를 고찰한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 작용하중을 지지하여 베어링계가 유막을 형성하고 금속 접촉을 방지하고 원활히 회전하기 위해서는 반경 틈새가 작을수록 동일한 편심율에서 효과적으로 동수압을 형성하여 보다 큰 하중지지용량을 갖게 됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 전체 저어널 면적에 대해 실리콘 그래파이트 편이 차지하는 면적 비에 따른 베어링 하중지지용량의 변화를 고찰한 결과이다. 해석 조건으로 틈새는 $65\ \mu\text{m}$ 를 고려하였으며, 편심율은 $63\ \mu\text{m}$ 를 고려하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 틈새 및 편심 조건에서 베어링의 하중지지용량은 베어링 면적 비가 증가함에 따라 증가됨을 예측할 수 있으나, 편이 설치가 가능한 구조 및 편 사이를 통과하는 유량을 고려하여 면적비를 선정하여야 한다.

4. 결 론

- 1) 일체형원자로에 사용되는 냉각재 순환펌프용 저어널베어링의 윤활 해석을 위해 각 저어널 요소를 직선 운동 베어링으로 모사하였으며, 레이놀즈 방정식을 이용하여 동수압 압력 분포와 하중지지용량을 구하였다.
- 2) 냉각재 순환펌프용 베어링의 하중지지용량은 베어링 틈새와 베어링 면적비에 큰 영향을 받음을 확인하였으며, 지정된 사용 조건에 있어 최적의 설계 데이

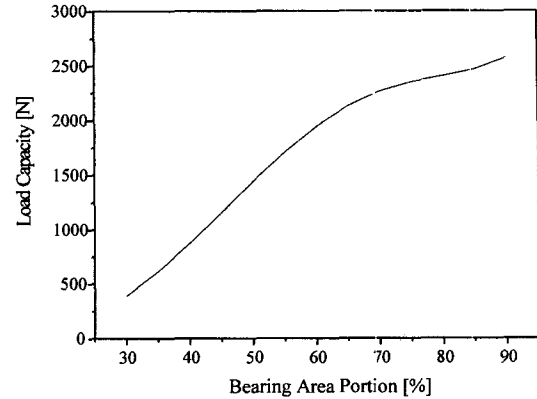


Fig. 7. Bearing load capacity according to bearing area portion.

터를 구축할 수 있는 기초 자료를 제공하였다. 본 연구에 고려한 저어널베어링은 일반 저어널베어링과 비교하여 특수한 형상을 갖고 있지만, 베어링 특성은 일반적인 저어널베어링과 거의 유사함을 확인하였다.

3) 냉각재 순환펌프용 베어링은 저점도의 물을 윤활제로 사용함으로써 매우 취약한 윤활 구조를 갖게 되며, 장수명이 요구되는 원자로용 펌프의 수명을 만족할 수 있도록 완전유체윤활 상태를 유지하기 위해서는 표면 거칠기를 비롯한 정밀 가공이 요구된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

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. G. G. Hirs, "A Bulk-Flow Theory for Turbulence in Lubricant Films," ASME Journal of Lubrication Technology, April, pp137-146, 1973.
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.