

탄성유체윤활해석에 의한 연료 펌프 저널베어링 최적간극 선정 연구

안성찬^{1,*} · 이상돈¹ · 손정호¹ · 조용주²

¹현대중공업(주) 엔진기계사업본부 엔진기계연구소, ²부산대학교 기계공학부

A Study on the Optimum Clearance Selection of Fuel Pump Journal Bearing with Elasto-hydrodynamic Lubrication Analysis

Sung Chan An^{1,*}, Sang Don Lee¹, Jung Ho Son¹ and Yong Joo Cho²

¹Engine & Machinery Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., LTD

²School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received August 1, 2016; Revised December 15, 2016; Accepted December 20, 2016)

Abstract – The electric controlled marine diesel engine has fuel pump generating the high pressurized fuel for fuel injection to combustion chamber via a common rail. Fuel pump consists of a cam-roller system. Journal bearing installed between a roller and a cam-roller pin is subjected to fluctuating heavy and instant loads by cam lift. First, Kinematic analysis is carried out to predict bearing loads during one cycle acting on the journal bearing. Second, flexible multi-body dynamic analysis and transient elasto-hydrodynamic(EHD) lubrication analysis for journal bearing considering elastic deformation of cam-roller pin, roller and bearing are conducted using AVL EXCITE/PU software to predict lubrication performance. The clearance ratio and journal groove shape providing lubrication oil are important parameter in bearing design having good performance and can be changed easier than other design parameters such as diameter, width, oil supply pressure and bearing material grade. Generally, journal bearing performance is represented by the minimum oil film thickness(MOFT) and peak oil film pressure(POFP). As well as the traditional design parameters(MOFT, POFP), in this study, temperature rise of lubrication oil is also evaluated through the side leakage flow of supplied oil. By the evaluating MOFT, POFP and temperature rise, the optimum bearing clearance ratio is decided.

Keywords – clearance ratio(간극비), EHD(elasto-hydrodynamic, 탄성유체윤활), peak oil film pressure (POFP, 최대유막압력), minimum oil film thickness(MOFT, 최소유막두께), oil temperature rise(윤활유 온도 상승)

1. 서 론

선박용 엔진이나 육상용 디젤엔진의 연료분사를 위해서는 일반적으로 기계식 방법과 전자제어식 방법이 있다(Fig. 1). 기계제어식 엔진의 경우 캠(cam)의 형상과 회전수에 따라 분사시기가 고정되지만, 전자제어식 엔진에서는 연료펌프에서 연료를 분사압력까지 상승시키고 이를 커먼레일(common rail)에 저장하였다가 필요

한 시점에 전자제어를 통해 연료분사시기를 조절할 수 있다. 따라서 연료분사시기를 조절하는 방법의 차이만 있을 뿐 기계제어식과 동일하게 전자제어식 엔진에서도 연료펌프에서 연료를 가압하기 위한 캠-롤러 시스템이 구비되게 된다. 선박용 디젤엔진 연료 펌프에서 가압하기 위해서는 캠의 회전운동을 플런저(plunger)의 직선왕복운동으로 변환해주어 플런저가 적절한 연료량에 대하여 가압을 하는 구조로 되어있다.

본 연구에서 다루게 되는 부분은 윤활성능 평가로부터 과대마모를 방지하기 위하여 적절한 설계가 이루어져야 하는 캠-롤러 시스템의 롤러와 핀 사이의 저널베

*Corresponding author : scan@hhi.co.kr
Tel: +82-52-203-862, Fax: +82-52-250-9646

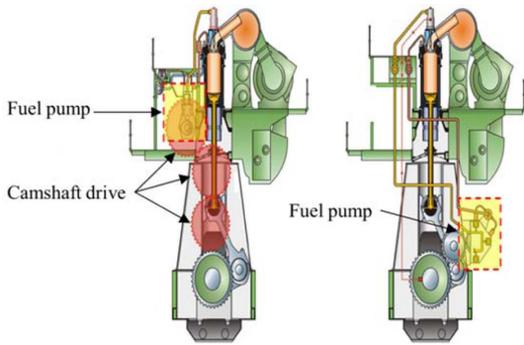


Fig. 1. Fuel pump and cam-roller system (left : mechanical control) (right : electrical control).

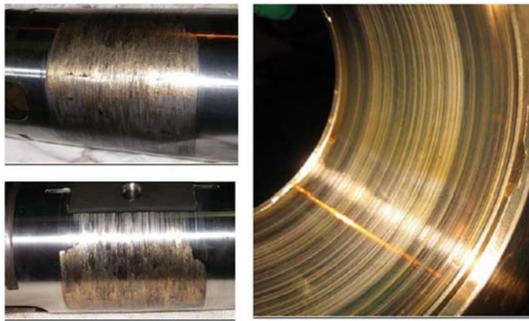


Fig. 2. Severe wear and scratch on pin (left) and journal bearing (right).

어링이다. 롤러와 핀 사이에 장착된 저널베어링의 설계는 연료 펌프의 성능 및 내구성 확보를 위해서 중요한 부분이다[1]. 적절하지 않은 간극과 윤활유공급 그루브 설계는 저널베어링의 윤활면에 과대마모(severe wear)나 스크래치(scratch)를 일으키게 된다(Fig. 2).

일반적으로 박용엔진의 저널베어링은 유체윤활(hydrodynamic lubrication, HD) 상태에서 작동하기 때문에 설계 시 유체윤활 해석만을 수행하여 주요 설계치수를 결정할 수 있지만, 회전축이 부정렬(misalignment) 되거나 순간적으로 높은 하중이 작용하는 경우에는 본체의 변형까지 고려한 탄성유체윤활(elasto-hydrodynamic lubrication, EHD) 해석이 필요하다는 연구결과들도 보고되고 있다[2, 3].

또한 저널베어링의 설계에서 중요한 판단 조건인 온도상승을 예측하여 간극을 설계하는 것이 중요하다. 만일 간극이 과대하게 되면 최소유막두께가 감소하여 중국에는 베어링과 저널의 운동면 사이에서 돌기접촉이 발생하여 마모현상이나 과열이 발생 할 수도 있다.

간극을 줄이게 되면 최대유막압력은 감소하고 최소 유막두께도 증가하므로 인해 저널베어링의 하중지지능력(load carrying capacity)은 증가하게 된다. 그러나 과도한 간극의 감소는 저널베어링 측면으로의 윤활유 배출량(side leakage)을 급격하게 줄이게 되고, 최대하중 작용면에서 발생한 열에 의해 뜨거워진 윤활유를 공급되는 냉각된 윤활유로 적절하게 대체하지 못함으로 인해 저널베어링의 윤활성능은 급격히 나빠진다. 특히 상승된 윤활유 온도로 인해 점도는 더욱더 낮아지게 되므로 저널베어링의 하중지지능력이 급격히 떨어짐으로 인해 저널베어링에서는 오히려 손상이 발생하게 되기도 한다. 따라서 적절한 간극의 선정은 베어링 설계에서 매우 중요한 요소가 된다.

간극과 더불어 저널베어링 내의 윤활유공급 그루브(oil supply groove)의 형상 또한 중요한 설계인자이다. 그루브의 위치와 형상에 따라 베어링의 하중지지능력과 베어링의 온도가 달라지기 때문에 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[4, 5]. 본 연구에서는 실제 저널베어링의 윤활유 공급 그루브까지 고려하여 해석을 수행하였다.

저널베어링 윤활시스템에서의 열발생은 하기와 같은 3가지 종류의 저항에 의해 발생하는 마찰손실에 의해서 일어나게 된다. 전단유동(shear flow)에 기인한 저항(1)과, 윤활유 압력분포에 의해 발생하는 압력 구배(pressure gradient)에 의한 저항(2), 마지막으로 구조물의 탄성변형이나 작은 유막두께에 기인하는 금속표면 간의 접촉에 의한 마찰저항(3)이 있다.

$$\tau = \eta \frac{U}{h} \tag{1}$$

$$\tau = \frac{h}{2 \cdot r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \phi} \tag{2}$$

$$\tau_a = \mu p_a \tag{3}$$

상기의 이러한 손실들은 열발생으로 이어지고 이것은 에너지평형에 의해서 배출되는 윤활유와 유입되는 윤활유에 의해서 냉각되거나 저널이나 베어링 하우징(housing)으로의 열전달 혹은 구조물 표면을 통한 대류 열전달로 냉각되게 된다(Fig. 3).

본 연구에서는 연료 펌프에 사용된 저널베어링의 설계인자 중 윤활성능을 결정하는 중요한 인자인 간극(clearance) 선정을 위해 탄성유체윤활 해석을 수행하였다. 해석케이스는 다양한 간극에 대해서 계산을 수행해보았고 또한 적절한 간극이 선정된 뒤에는 저널베

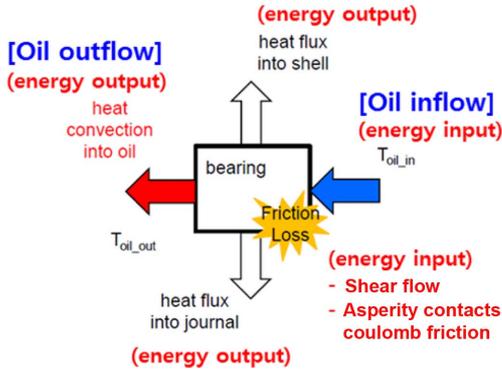


Fig. 3. Heat energy flow (heat balance) for journal bearing system.

어링에 윤활유를 공급하는 그루브(groove)의 형상이 윤활성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 3가지 형상에 대한 윤활성능평가도 수행하였다(Table 1). 또한 간극비 (clearance ratio, 무차원 단위 %)를 0.500%~3.438%까지 총 5가지 조건으로 변경해 가면서 윤활성능과 온도 상승이 어떻게 발생하는지 알아보았다.

해석결과 중 온도상승(temperature rise), 최소유막두께(minimum oil film thickness, MOFT), 최대유막압력(peak oil film pressure, POFP)을 평가하여 저널베어링의 최적 간극을 결정하였다.

2. 탄성유체윤활해석 모델 및 작용하중

2-1. 탄성유체윤활 해석 모델 및 해석 조건

연료 펌프에 사용되는 캠-롤러 기구의 경우 연료를 고압으로 압축하기 위해 캠의 프로파일에 따라 짧은 순간에 큰 하중이 작용하게 된다. 따라서 저널베어링의 작동상태를 파악하기 위해서는 하우스(housing) 역할을 하는 롤러와 핀, 베어링의 변형을 고려한 유연 다물체 동역학해석(FMBD, flexible multi-body dynamic analysis)과 탄성유체윤활해석을 동시에 수행하여 평가해야만 한다.

본 연구에서는 이러한 평가가 가능한 AVL EXCITE/PU를 이용하여 수행되었다[6, 7]. 엔진의 축계와 저널베어링의 동역학 해석 프로그램인 AVL EXCITE/PU는 크랭크 축의 강도평가 및 베어링류의 윤활성능을 해석하는데 산업계에서 널리 사용되고 있다. 롤러의 경우에는 높은 하중에 의한 반경방향의 변형도 발생할 수 있지만 캠-롤러 사이의 부적합접촉(non-conformal

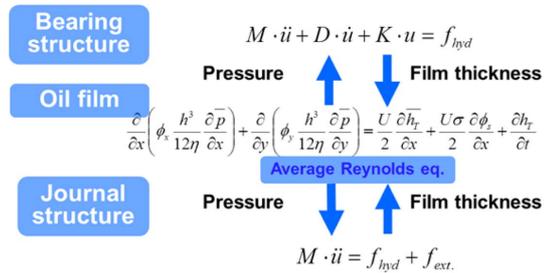


Fig. 4. Equilibrium iteration scheme for lubrication analysis and dynamic analysis.

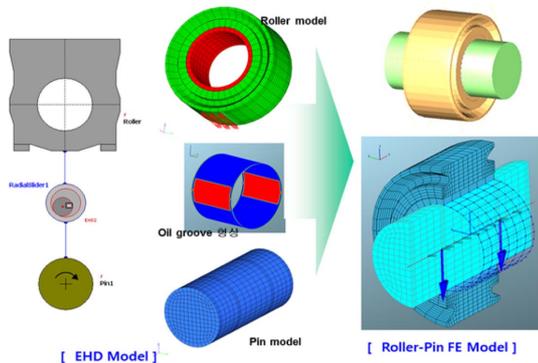


Fig. 5. FE models of journal bearing, pin and roller.

contact)에 의한 롤러의 폭방향 양단 모서리에서의 높은 헤르쯔응력(Hertz stress) 발생을 피하기 위한 그루브도 측면에 가공되어있다. 따라서 이러한 그루브로 인한 추가 변형도 고려하여 저널베어링의 윤활성능을 평가할 필요가 있다.

유체윤활계산에서는 표면의 거칠기를 고려하기 위하여 평균 레이놀즈 방정식(average Reynolds equation)과 유동계수(flow factor)의 고려가 필요하다[8]. EXCITE/PU에서는 평균 레이놀즈 방정식에 의해서 유체윤활해석이 진행되고 구조물(저널과 베어링 구조)의 탄성변형을 고려한 동적해석 모델의 변형량과 간극을 고려한 윤활압력이 서로 힘의 평형이 이루어질 때까지 반복계산을 하게 된다(Fig. 3). 유동계수에는 평균단위유량을 예측하기 위한 압력유동계수(pressure flow factor)와 전단유동계수(shear flow factor)가 있다. 압력유동계수는 매끈한 표면에 대한 압력분포와 거친표면에서의 압력분포 특성 차이를 나타내는 계수이며, 전단유동계수는 미끄럼 운동하는 표면의 거칠기로 인한 추가적 유동을 고려한 계수이다. 마찰력과 관련하여서는 거친 두 표면의 미끄럼 속도로 인한 평균 전단력이 유막두께에

미치는 영향을 나타내는 전단응력계수(shear stress factor)가 있다. 이러한 유동계수는 프로그램상에서 내부적으로 계산되며 유동장의 해석에서는 오직 표면거칠기와 거칠기의 방향성 값만 프로그램에 입력하면 해석이 진행된다. 거칠기의 방향성은 Peklenik의 연구결과[9, 10]를 기반으로 하였다. Peklenik은 거칠기의 방향성을 고려한 surface pattern parameter γ_c 를 도입하였다. Surface pattern parameter는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\gamma_c = \frac{\lambda_x^{0.5}}{\lambda_y^{0.5}} \quad (4)$$

Where

$\gamma_c=1$ for isotropic surface

$\gamma_c=0$ for surfaces with transverse roughness textures

$\gamma_c=\infty$ for surfaces with longitudinal roughness textures

Fig. 2에 롤러, 핀, 저널베어링의 탄성유체윤활 해석에 필요한 유한요소 모델을 나타내었다. 실제 연료 펌프에서는 롤러가 회전을 하고 핀이 정지하여 있지만, 본 해석에서는 핀이 회전하고 저널베어링과 롤러가 정지해 있는 상태로 두고 계산을 수행하였다.

일반적으로 베어링의 간극을 설계할 때는 치수효과를 고려하기 위하여 간극비를 정의하여 수행하게 되는데, 직경과 간극의 비에 1,000을 곱한 값으로 일반 저널 베어링에서는 1.0을 사용하고, 정밀 저널 베어링에서는 0.5를 사용하며 고온부에 사용되는 저널 베어링에는 2.0을 주로 사용한다.

추가적으로 그루브의 형태는 수직 하방향 하중작용면에서 먼 곳에 위치한 CASE F1조건 외에 그루브의 위치를 하중작용면에 더 가깝게 위치하게 하여 윤활유의 공급을 용이하게 하는 조건(CASE F2)도 추가로 검토 해 보았다. 다만 그루브가 하단으로 이동하여 하중에 의해서 발생하는 윤활압 발생 위치까지 이동한다면 오히려 하중지지능력은 감소하게 되며, 만일 고압의 윤활막 압력이 공급압력을 초과하게 되면 그루브를 통하여 윤활유가 역류하게 되는 결과를 초래 할 수도 있다.

마지막 해석조건은 현재 측면 윤활유 배출량을 용이하게 하여 온도 상승을 저감 할 수 있는 형상으로서 그루브 면적 전체를 통하여 측면 윤활유 배출이 가능하게 만든 CASE F3 조건이다. CASE F1~CASE F2 조건은 하중지지면에 충분한 윤활유를 공급하기 위하여 그루브의 측면 형상이 좁은 수로(narrow waterway) 형

Table 1. Analysis cases for clearance ratio

	Clearance ratio [%]	Oil properties
CASE A	0.500	
CASE B	1.125	
CASE C	1.538	• SAE30
CASE D	1.813	• Oil inlet temperature 50°C
CASE E	3.438	
CASE F1~F3	1.125~3.438	

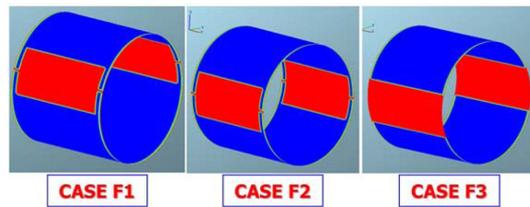


Fig. 6. Analysis cases for groove shape of pin (journal).

태로 제작되어 측면 윤활유 배출량이 최소화되도록 설계되었다.

$$\text{clearance ratio} = \frac{\text{clearance}}{\text{diameter}} \times 1,000 \quad (4)$$

2-2. 캠-롤러 하중

저널베어링에 작용하는 하중을 회전각도별로 예측하기 위한 계산단계는 Fig. 7에 나타내었다. 먼저 연료펌프에서 발생하는 압력선도로부터 캠-롤러 시스템의 동특성을 고려하기 위하여 기구해석으로부터 플런저의 수직방향하중을 계산하였다. 계산된 수직방향하중과 캠

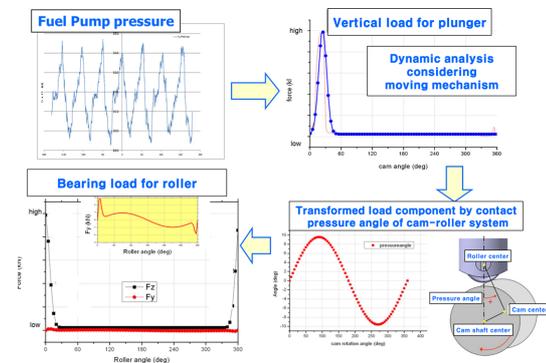


Fig. 7. Calculation process for dynamic loads prediction of cam-roller system.

축 회전 시 롤러와의 압력각의 변화를 고려하여 실제 롤러 저널베어링에 작용하는 하중을 추정 할 수 있었다.

계산된 회전 각도별 저널베어링 하중 결과로부터 연료 펌프의 특성상 짧은 시간에 순간적으로 높은 수직 하중이 저널베어링에 작용함을 확인 할 수 있다. 또한 압력각의 영향으로 수평방향 하중도 발생하지만 그 크기는 수직방향의 하중에 비하여 작음을 알 수 있다. 하지만 이러한 압력각에 의한 수평방향 하중의 영향으로 유막압력분포를 편심되어 나타나게 하는 요인이 될 수 있다.

3. 저널베어링의 최적 간극 선정

3-1. 롤러 탄성변형을 고려한 탄성유체윤활해석

일반적인 경우 하우징의 강성에 비해 저널베어링의 강성이 작기 때문에 베어링의 탄성변형만을 고려한 윤활해석을 수행한다. 하지만, 연료 펌프 저널베어링의 경우 하우징 역할을 하는 롤러의 두께가 상대적으로 두껍지 않기 때문에 롤러의 탄성변형량까지 고려한 윤활해석을 적용하는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

유연 다물체동역학해석과 탄성유체윤활해석을 통하여 각각의 해석조건에 대하여 수치해석을 수행하고 결과를 평가해보았다. Fig. 8은 최대하중 작용 시 롤러와 저널베어링의 탄성변형 형상을 나타낸 그림이다.

하중에 의해서 롤러의 원주방향 변형뿐만이 아니라 롤러의 측면에 그루브가 가공되어 있는 영향으로 인해 하단의 변형형상을 보면 국부적인 추가 변형도 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 해석 결과 중 최대하중 작용 시의 유막압력과 유막두께 분포를 나타낸 그림이다. 전체적인 발생 패턴이 유사하여 분포와 관련된 결과는 CASE A와 CASE E에 대해서만 나타내었다. 최대 유막압력은 베어링의 폭방향 중심에서 발생함을 알 수

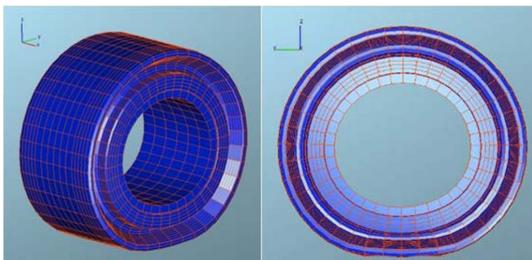


Fig. 8. Elastic deformation of roller and journal bearing.

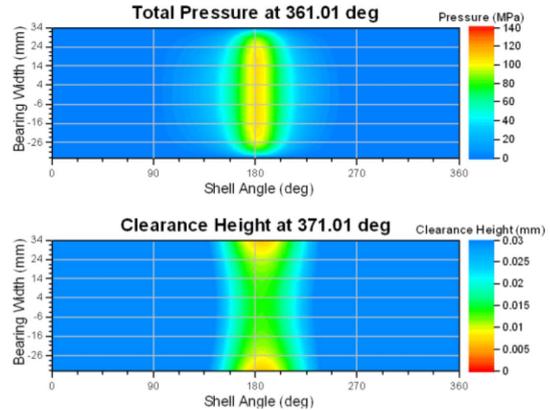


Fig. 9. Total pressure and oil film thickness (clearance ratio 0.5%, CASE A).

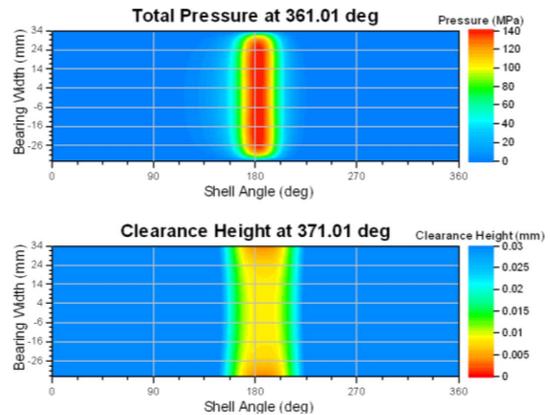


Fig. 10. Total pressure and oil film thickness (clearance ratio 3.44%, CASE E).

있고, 높은 유막압력에 의해 베어링이 폭의 가운데 부분이 침강(depression)하는 형태로 탄성변형 하게 되고 또한 유막압력분포가 베어링 폭의 중심부에서 높은 영향으로 인해, 베어링 폭의 양 측면 끝 단에서 간극이 작아진 것으로 판단된다.

CASE E의 경우에는 간극비가 커진 영향으로 인해 유막압력은 더 높아졌고 이로 인해 베어링의 탄성변형량도 커졌고 최소 유막두께도 작아진 것으로 판단된다.

현재 롤러의 측면에는 캠과의 접촉응력을 완화하기 위한 그루브가 가공되어 있어서 이곳에서의 추가적인 변형으로 인한 유막압력이 재분포되고 이로 인해 베어링 폭 양 끝단에서의 간극 감소 효과가 줄어드는 영향도 있을 것으로 추정되지만, 현재로서는 폭의 중심부에서의 높은 유막압력이 베어링 폭방향 간극 결정에 대한 영향도가 더 높은 것으로 판단된다.

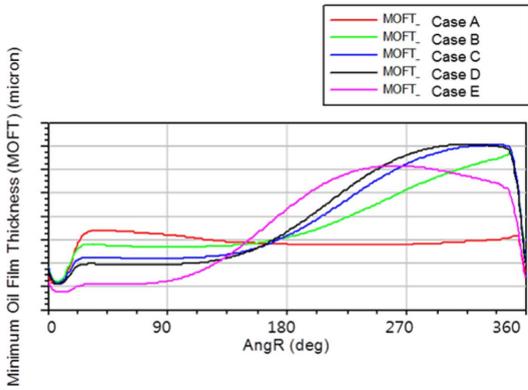


Fig. 11. Minimum oil film thickness for analysis cases during 1cycle.

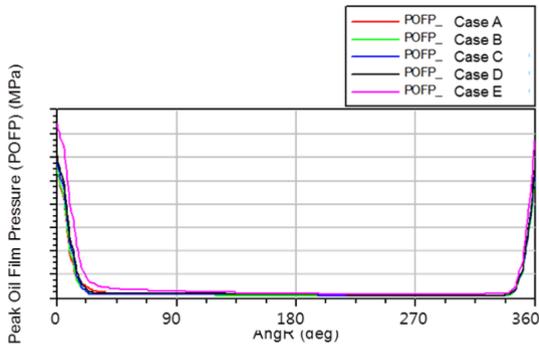


Fig. 12. Peak oil film pressure for analysis cases during 1cycle.

추가적으로 구조물의 탄성변형을 고려하지 않은 강체로 윤활해석이 진행되었다면 축방향의 부정렬의 영향을 배제한다면 최소유막두께는 베어링의 폭방향으로 일정하게 나오는 것으로 평가되었을 것이다.

간극에 따른 회전각도별 최소유막두께와 최대유막압력 계산결과는 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 탄성유체윤활해석이 수행될 시에 구성품들의 초기조건은 일반적으로 회전중심이 일치(coaxiality)한 상태에서 해석이 시작된다. 따라서 반복 하중에 의하여 저널의 중심은 이동을 하게 되는데 물러가 회전하는 첫 구간은 저널의 회전중심이 정상상태(steady state)에 바로 도달했다고 판정하기에는 적절하지 못하다. 따라서 유막압력 및 두께의 계산 결과는 두 번째 회전하는 구간인 360°에서 720° 구간의 계산값을 이용하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 최소 유막두께와 최대 유막압력은 모두 하중이 최대인 지점에서 발생하였다.

결과에서 보듯이 간극비의 변화에 대한 최소유막두께의 변화량은 크지 않은 것으로 보인다. 다만 간극비가 일반적인 설계범위인 2%를 넘어간 CASE E의 경우에는 최대유막압력의 증가가 두드러지게 나타난 것을 확인 할 수 있다. 그리고 최소유막두께의 감소도 상대적으로 더 큰것으로 판단된다.

상기의 최소유막두께와 최대유막압력에 대한 해석결과로부터 간극비가 일정값 이상에서는 저널베어링의 윤활성능이 급격히 떨어지게 됨을 알 수 있다.

3-3. 온도상승을 고려한 저널베어링 간극 선정

저널베어링의 설계 시 간극의 결정은 매우 중요한 작업이다. 본 연구에서는 이러한 간극을 결정하기 위해 최소유막두께, 최대유막압력만이 아니라 온도상승을 추가적인 평가인자로 사용하였다. 베어링 간극의 변화에 따른 다양한 평가인자들의 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 간극이 커짐에 따라 최대유막압력은 증가하는 즉, 윤활특성은 감소하지만, 윤활유의 베어링 측면으로의 누설량의 증가로 온도상승은 260°K에서 20°K 수준으로 감소한다. 윤활유의 온도상승은 국부적인 온도상승이 아닌 베어링 내의 평균적인 온도상승값이며, 마찰손실에 의한 발열량과 오일배출량을 계산하여 상승되는 온도가 계산된다.

최소유막두께의 경우 간극비가 작아질수록 윤활특성이 좋아지는 방향 즉, 유막두께가 두꺼워지나 간극비가 일정 값 미만으로 작아지면 오히려, 감소하는 경향을 보인다.

이것은 저널베어링의 간극이 극단적으로 작아지면 베어링 측면 누설량이 너무 작아져서 온도상승이 급격히 커지게 되고 간극 감소로 인한 물리적 췌기효과

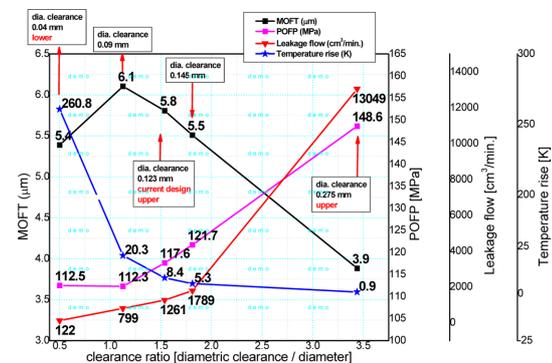


Fig. 13. Analysis results for journal bearing clearance (MOFT, POFP, Side leakage flow, Temperature rise).

(physical wedge effect) 감소로 인해 최소유막두께도 감소 된 것으로 판단된다.

현재 해석모델에서 가장 적절한 간극비는 1% 근방 인 것으로 판단 할 수도 있지만, 이 시점부터 윤활유 온도의 상승이 급격해짐으로, 저널베어링 작동중의 다양한 환경과 가공정도를 고려한다면 안정적인 저널베어링 윤활상태를 유지하기 위해서는 오히려 간극비는 2.0% 근방이 더 최적점 인 것으로 판단된다.

제품에는 항상 가공시의 공차(치수공차, 기하공차)가 존재하게 된다. 따라서 치수의 공차범위 내에서는 동일한 윤활특성이 나타나도록 간극비가 결정되어야 한다. 본 연구에서 결정된 간극비보다 낮은 값에서는 온도의 급격한 상승이 예상되므로 현재의 2.0% 근방이 최소 간극비가 되어야 할 것으로 판단된다.

3.4. 그루브형상에 대한 윤활성능 평가

저널에 가공되는 그루브의 형상에 대한 저널베어링 윤활특성을 평가한 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 결과에서 확인 할 수 있는 바와 같이 그루브의 위치 및 형상이 달라져도 누설량의 변화만 있을 뿐,

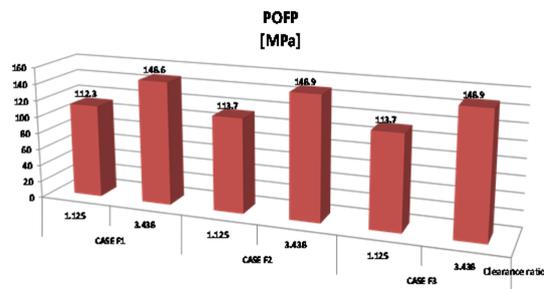


Fig. 14. Peak oil film pressure according to groove shape of journal.

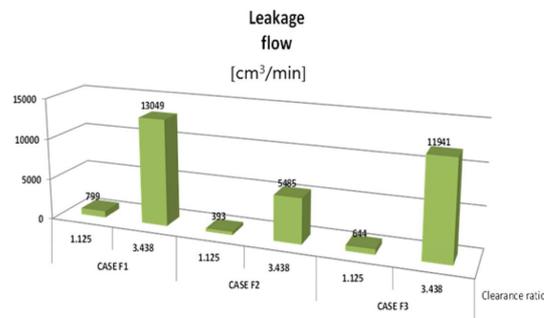


Fig. 15. Leakage flow for bearing side according to groove shape of journal.

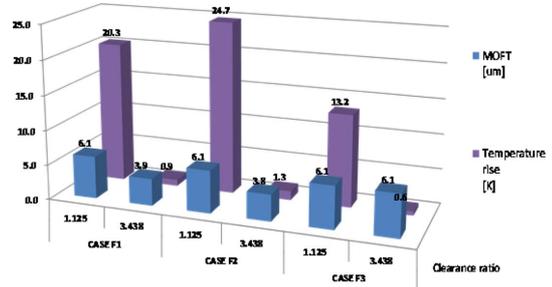


Fig. 16. MOFT and oil temperature rise according to groove shape of journal.

최대유막압력과 최소 유막두께는 거의 변하지 않는 것으로 평가되었다.

저널베어링에서의 윤활유 온도 상승량은 측면 누설량의 대소에 의해 결정됨을 다시 한번 확인 할 수 있다. 따라서 저널에 가공되는 그루브의 형상은 하중 지지 위치인 하단부가 아닌 측면부에 위치하고 있다면 설계상에 문제는 없다고 판단된다.

하지만 온도 상승 측면에서는 누설량과 측면 윤활유 누설량 증대 효과로 인하여 그루브를 확장한 CASE F3 조건이 가장 윤활성능이 우수한 것으로 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 연료 펌프 저널베어링의 주요 설계인자인 간극비와 저널에 가공되는 그루브 형상을 결정하기 위해 핀, 베어링, 측면 그루브가 가공된 롤러의 탄성변형을 고려한 탄성유체윤활 해석기법을 활용하여 최소유막두께, 최대유막압력을 검토해보았다. 일반적으로 간극비가 낮아지면 윤활특성은 우수해지지만 측면 윤활유 누설량의 증가로 인해 윤활유의 온도는 급격히 올라가게 된다. 따라서 본 연구에서는 전통적인 베어링 설계인자인 최소유막두께와 최대유막압력 뿐만이 아니라 저널베어링 내의 윤활유 온도 상승량 특성도 함께 고려하여 간극비를 선정해 보았다.

해석상으로는 1.0% 근방이 유막두께가 가장 두꺼운 것으로 나타났으나 이러한 간극비 근방에서부터 윤활유 온도의 급격한 상승이 예상되었고, 또한 제품의 가공공차를 고려한다면, 가장 적절한 최소 간극비는 2.0% 근방이 될것으로 판단되었다.

마지막으로 저널에 가공되는 그루브의 형상은 하중 지지 위치인 하단부가 아닌 측면부에 위치하고 있다면 설계상에 문제는 없다고 판단되었으며 온도 상승 측면

을 고려한다면 측면 누설량이 원활하도록 충분한 그루브 폭을 가지는 것이 유리함도 확인할 수 있었다.

References

- [1] Pounder., Marine Diesel Engines and Gas Turbines, Chap. 8, pp. 234-263, Dongmyungsa, 2009.
- [2] Sharda, H. B., Chandrawat, H. N., Bahl, R. C. "EHD analysis of a misaligned journal bearing", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, pp. 415-423, 1993.
- [3] Stanislaw Strzelecki, "Thermoelastohydrodynamic analysis of dynamically loaded journal bearings", *Internal Combustion Engines*, Vol. 7, pp. 497-502, 2000.
- [4] Mohamad Ali Ahmad, Salmiah Kasolang, R. S. Dwyer-Joyce, "Experimental study on the effects of oil groove location on temperature and pressure profiles in journal bearing lubrication", *Tribology International*, Vol. 74, pp. 79-86, 2014.
- [5] Brito, F. P., Miranda, A. S., Fillon, M., "Analysis of the effect of grooves in single and twin axial groove journal bearings under varying load direction", *Tribology International*, Vol. 103, pp. 220-230, 2016.
- [6] Jung Ho Son, Sung Chan An et al., "EHD analysis and fretting damage prediction of marine engine's connecting rod", *Proceedings of the KSTLE Spring Conference*, pp. 53-54, 2011.
- [7] Sang Don Lee, Sung Chan An et al., "Elasto-hydrodynamic lubrication analysis of journal bearing under reversed cyclic loading", *Proceedings of the KSTLE Spring Conference*, pp. 105-106, 2014.
- [8] Nadir. Patir, Cheng, H. S. "Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces", *Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 220-230, 1979.
- [9] Peklenik, J., "New developments in surface characterization and measurement by means of random process analysis", *Insts. Mech. Engrs.*, Vol. 182, pp. 108, 1968.
- [10] Patir, N., Cheng, H. S., "Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces", *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 101, pp. 220-230, 1979.