

DOI <https://doi.org/10.9725/kstle.2017.33.3.119>

## 윤활유 부족 상태에서의 볼 베어링 유막 두께 변화에 대한 연구

정순비 · 이보라 · 유용훈 · 조용주<sup>†</sup>

부산대학교 기계공학부

### A Study on the Change in the Film Thickness of Ball Bearing in Starved EHL

SoonBi Jung, Bora Lee, YongHun Yu and YongJoo Cho<sup>†</sup>

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received April 30, 2017; Revised May 15, 2017; Accepted May 20, 2017)

**Abstract** – In this study, we perform a numerical analysis to predict the film thickness and lubrication regions for a thrust ball bearing under different operating conditions. Film thinning and replenishment affect the film thickness in starved lubrication. As the inlet meniscus position is brought to the edge of the Hertz contact, the thin film thickness is calculated as starved equation. We use a film replenishment model to determine the recovery film thickness between rolling elements. We use a hydrodynamic model to describe film recovery, that results from the effects of surface tension. In this model, we consider the surface tension gradient in fluid depression as the driving force for fluid recovery. We use Fourier transform method to determine the time-dependent depth of depressed oil. We calculate the change in the central film thickness graphically by using the recovery equation in starved elastohydrodynamic lubrication(EHL) under operating conditions that include numbers of balls, sliding velocity, applied force, and ambient film thickness. We evaluate the degree of starvation by using the distance from the center of the contact area to the meniscus position. Parched lubrication, a phenomenon where the film thickness decreases consistently, occurs at the severe condition. We determine optimal values with respect to the numbers of balls, and sliding velocity. The investigation can contribute to the design operating conditions for proper lubrication.

**Keywords** – ball bearing(볼 베어링), film replenishment(유막 보충), film thickness(유막 두께), meniscus(미니스커스), starvation(윤활유가 부족한 상태)

#### Nomenclature

$a_x$  : Half size of a Hertz contact in x-direction (m)  
 $a_y$  : Half size of a Hertz contact in y-direction (m)  
 $a'$  : Half width of oil depression in x-direction (m)  
 $G$  : Dimensionless materials parameter  
 $H_c$  : Dimensionless central film thickness  
 $H_f$  : Dimensionless film thickness for fully flooded

#### lubrication

$H_s$  : Dimensionless film thickness for starved lubrication  
 $h_c$  : Central film thickness (m)  
 $h_m$  : Inlet film thickness (m)  
 $h_o$  : Ambient film thickness (m)  
 $k$  : Ellipticity parameter  
 $m$  : Dimensionless calculating meniscus position  
 $m_c$  : Dimensionless critical meniscus position  
 $R_y$  : Curvature radius(m)  
 $r_b$  : Ball radius(m)

<sup>†</sup>Corresponding author : yjcho@pusan.ac.kr  
Tel: +82-51-510-2307, Fax: +82-51-512-9835

- $U$  : Dimensionless speed parameter  
 $W$  : Dimensionless load parameter  
 $x$  : Transverse direction  
 $y$  : Rolling direction  
 $y_{in}$  : Half width of oil depression in y-direction (m)  
 $\zeta$  : Oil depression (m)  
 $\Delta\zeta$  : Change of  $\zeta$  (m)  
 $\eta$  : Viscosity of oil (Pa\*s)

## 1. 서 론

기계 요소의 설계 기술 중 윤활 측면에서 부품에 윤활 공급이 이루어질 때, 윤활상태를 예측하는 것은 매우 중요하다. 윤활이 잘 되지 않을 경우에 부품 간의 직접적인 접촉으로 마모가 되고 스커핑(Scuffing)이 발생할 수 있으며 파손에 이를 수 있기 때문이다. 이와 같은 문제점이 발생하지 않도록 윤활 상태에 대한 예측과 유막 두께 회복에 대한 연구가 증가하고 있다. 이러한 윤활 막 회복에 대한 연구는 윤활유 부족 상황을 고려하지 않은 설계 시 부품의 수명을 단축시킬 수 있기에 중요하다.

본 연구에서는 회전하는 기계 부품 중 Thrust 베어링에서의 윤활 막의 변화를 전체 볼의 개수를 고려하고, 회전 속도, 적용 하중에 따라 회복 유막 두께의 변화를 해석적 방법을 통해 제시한다. 이를 통해 베어링 설계 시 접촉 부분의 윤활 막 변화를 예측하여 제품의 신뢰성 향상에 기여하고자 한다.

기계 요소의 윤활 상태를 알아보기 위한 목적으로 많은 연구들이 실험적, 해석적 방법으로 수행되었다. 대표적인 연구로 Hamrock Dowson은 윤활 상태에 대한 이론을 정리하였다[1]. 윤활 상태 중 Fully flooded 윤활 상태, Starved 윤활 상태에 대한 연구로는 1971년도 발표논문 Wedeven 등[3]에 의해 윤활 상태 천이에 대해 처음으로 연구되었다. F. Chevalier 등[9]이 Starved 윤활 상태에서의 EHD 점 접촉 실험을 했으며 유막 두께 변화를 수치 해석하였다. 이들의 논문에서 Fully flooded 윤활 상태와 Starved 윤활 상태의 개념이 제시되어 있다. 볼 베어링은 전동체인 볼이 구름 운동에 따라 윤활 상태가 Fully flooded 윤활 상태 또는 Starved 윤활 상태로 변할 수 있는데 이 때, 유막 회복을 고려하는 것이 매우 중요하다. 이에 대한 연구로 Chiu[4]는 윤활 막 회복에 대해 분석한 연구로 표면 장력과 점도 변수를 사용하여 식을 제시하였다. 유

입 지역에서의 윤활 회복에 대한 메커니즘 분석에 대한 연구는 J. Pemberton and A. Cameron[5] 논문을 통해 확인할 수 있다.

윤활 상태를 구분하는데 Starved 윤활 상태의 한 부분으로 심각한 윤활 상태를 Parched 윤활 상태라 한다. 이는 Starvation이라는 유막 두께 회복이 잘 안되는 구간을 넘어 더 심한 경우인 Parched 윤활 상태로 넘어가게 되는데 이에 관련한 연구는 Kingsbury[6], G. Guangteng 등[7]의 논문들을 통해 알 수 있다. 이후 Liu[8]는 Chiu 윤활 막 회복 방정식을 이용하고 Side Leakage를 고려하여 볼 베어링에 대한 윤활 막 회복을 연구하였다. 실험적인 측면에서 그리스 윤활로 구름 베어링에서 윤활상태를 실험적으로 연구한 P.M.E Cann[11], P.M.E Cann 등[12]은 Starvation의 정도를 나타내는 지표를 사용하여 Fully flooded, Starved regimes을 연구하였다. 최근에는 Jing Chen[13], Takashi Nogi[14, 15], Taisuke Maruyama[16] 등이 그리스 윤활에서의 Starvation에 대한 실험적 연구를 통해 해석적인 윤활 막 회복에 대한 연구를 뒷받침해주고 있다.

본 연구는 Thrust 볼 베어링의 구조내 볼과 케도를 접촉 시 작동 조건에 따른 중앙 유막 두께를 계산하여 윤활 상태를 구분하는 것이다. 전체 볼의 개수, 회전 속도, 적용 하중과 같은 작동 조건에 따른 중앙 유막 두께를 계산함으로써 윤활 상태를 확인할 수 있다. 연구의 목적은 윤활이 제대로 되지 않아 기계 부품에 파손이 일어날 수 있으므로 미리 윤활 막 형성을 예상해 봄으로써 좋은 윤활 막 상태를 구현할 수 있게 하는 것이 이 연구의 목적이다.

## 2. 이 론

### 2-1. 윤활 상태 구분

우선 윤활 상태를 구분하여 소개한다. 크게 3가지로 윤활 상태가 좋은 Fully flooded 윤활 상태와 Partially starved 윤활 상태, 그리고 Heavily starved 윤활 상태로 구분될 수 있다. 각 상태별 그림은 아래와 같다. 그림에서 원형 모양은 Hertzian 접촉 원이다. 주변에는 윤활유가 있으며 유입을 표기했다. Fig. 1에서 화살표는 구름 방향이며 그 위는 볼로 표기했다.

Fig. 1은 Fully flooded 윤활 상태의 경우로 윤활이 잘되고 있는 상태인데 윤활유에 담겨있는 상태로 막 두께 감소가 없는 상태이다. Fig. 2는 Partially starved 윤활 상태의 경우로 윤활이 부분적으로 되고 서서히

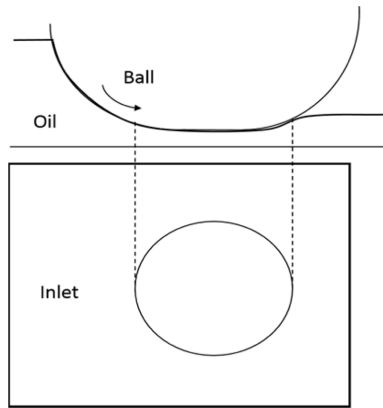


Fig. 1. Fully flooded region.

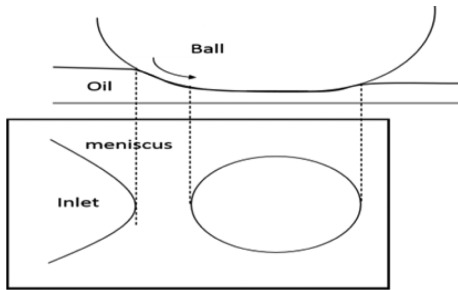


Fig. 2. Partially starved region.

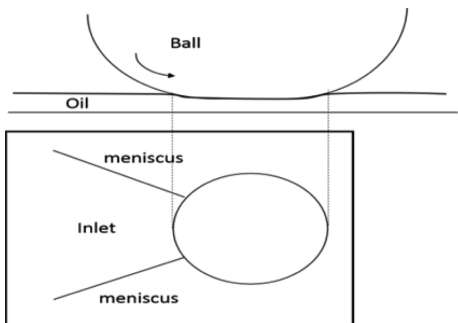


Fig. 3. Heavily starved region.

starved 윤활 상태가 진행되는 것이라 할 수 있다. 윤활막이 감소하며 미니스커스(Meniscus)는 Hertzian 접촉원으로 가까워진다. 이 상태가 계속되어 접촉원에 닿으면 미니스커스 선이 Hertzian 접촉원으로 가까워지고 윤활막이 매우 얇아진다. Fig. 3은 Heavily starved 윤활 상태의 경우로 윤활이 잘 안되는 상태로 이러한 상태가 지속해서 진행되면 돌기와 돌기가 직접 닿게 되어 부품 간의 손상이 발생할 수 있는 상태로 이르게 된다.

Heavily starved 윤활 상태 또는 Parched 윤활 상태

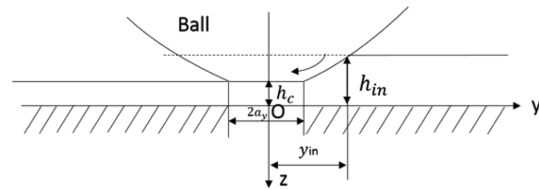


Fig. 4. Meniscus of rolling direction.

는 Starved 윤활 상태의 한 영역인 윤활 상태이고 유막이 얇아지고 결국 파괴되는 상태이다[8, 11].

## 2-2. 윤활유 부족을 고려한 유막 두께 계산

### 2-2-1. 무차원 미니스커스 위치(m)

미니스커스란 오일로 채워진 유입 영역과 공기층과의 분리된 영역의 접점이다[4]. Fig. 4에서 같이 접촉 중심에서 유입 유막이 형성된 위치까지의 거리( $y_{in}$ )로 미니스커스 위치를 표현할 수 있다.

이 때 Fully flooded 상태와 Starved 상태의 구분이 되는 무차원 미니스커스 기준( $m_c$ )은 Fully flooded 무차원 중앙 유막 두께를 사용하여 Hamrock-Dowson은 아래와 같은 식으로 표현하였다.

$$m_c = 1 + 3.06 \left[ \left( \frac{R_x}{a_y} \right)^2 H_F \right]^{0.58} \quad (1)$$

$$m = \frac{y_{in}}{a_y} \quad (2)$$

무차원 기준 미니스커스 위치( $m_c$ )와 무차원 계산된 미니스커스 위치( $m$ )크기를 비교하여 기준 미니스커스가 클 경우( $m_c > m$ ), Starvation이 된다[8].

유입 유막 두께( $h_{in}$ )에 맞는 미니스커스 위치는 Newton-Raphson 방법으로 계산했다. 식 (3)과 같다.

$$h_y(m) = h_m \quad (3)$$

이 때,  $m$ 을 계산하기 위한  $h_y(m)$ 은 타원 접촉 영역 밖 표면의 탄성 변위식을 사용하였다[2].

### 2-2-2. 중앙 유막 두께

Starved EHL이란 제한된 오일 공급 상태에서의 탄성 유체 윤활 영역을 의미하고, 그 중에서도 오일 부족이 심각하여 윤활막이 점차 얇아지다 결국 파단이 일어나는 경우를 Parched EHL이라 한다[8]. Starved EHL의 경우에 Hamrock-Dowson 유막 두께를 계산하는 식은 다음과 같다[1].

$$H_s = \left(\frac{m-1}{m_c-1}\right)^{0.29} \times H_F \quad (4)$$

계산된 미니스커스 위치로 중앙 유막 두께를 계산했다. Fully flooded EHL의 경우 계산으로 사용한 방정식은 Hamrock-Dowson 방정식이다.

중앙 유막 두께 계산에는 2가지의 기본식이 있는데 그 중에서 고탄성 모듈러스(High elastic modulus) 적용을 가정하여 중앙 유막 두께를 구하는 식을 선택했다. 식은 다음과 같다[1].

$$H_F = 2.69 U^{0.67} G^{0.53} W^{-0.067} (1 - 0.61 e^{-0.73k}) \quad (5)$$

여기서  $U$ 는 무차원 속도 파라미터,  $G$ 는 무차원 재료 파라미터,  $W$ 는 무차원 하중 파라미터,  $k$ 는 타원 파라미터이다.

2.3. 윤활 막 회복이론

윤활 막이 회복되는 것은 Chiu 방정식을 사용하여 계산한다. Chiu 윤활막 회복 방정식은 표면장력과 점성에 의한 유막 회복량이 시간과 위치의 함수로 표현되어있다[4].

$$\zeta(x, t) = a_x \int_0^x F(\xi) \exp\left[-\frac{\xi \times L \times (1 - 4He^{-2H} - e^{-4H})}{(1 + e^{-2H})^2}\right] \times \cos\left(\frac{\xi x}{a_x}\right) d\xi \quad (6)$$

where  $H = \xi h_x / a_x$

$$F(\xi) = \frac{2}{\pi a_x^2} \int_0^x f(x) \cos\left(\frac{\xi x}{a'}\right) dx \quad (7)$$

$L = tS/2\eta a'$  : 무차원 시간 매개변수  
 $S$  : oil-air에서의 표면 장력,  $f(x)$  : 형상 함수  
 $\xi$  : 임의 적분 변수,  $t$  : 시간  
 n번째 볼의 유입 유막 두께는 n-1 볼에서의 중앙 유

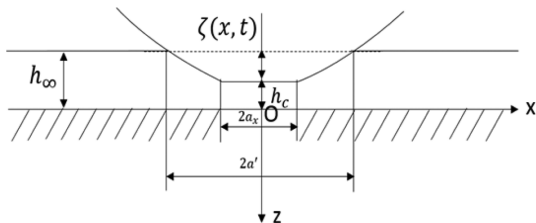


Fig. 5. Recovery and depressed oil film thickness of x-axis direction.

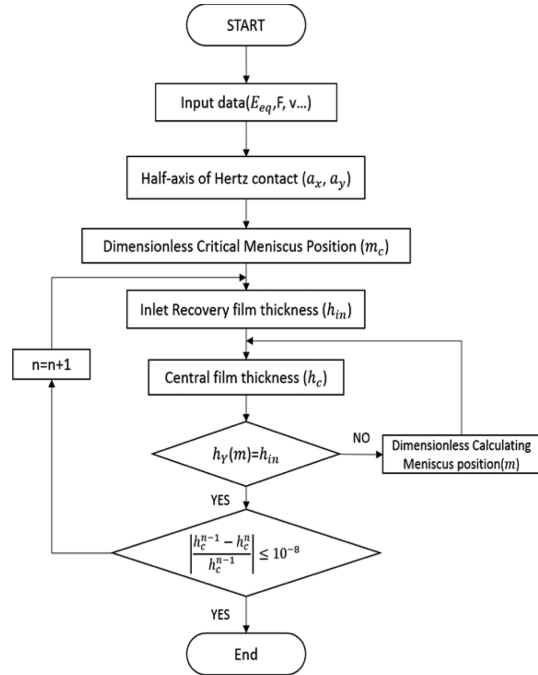


Fig. 6. Flow chart of calculating film thickness.

막 두께로부터 유막 회복량을 고려하여 다음과 같이 계산했다.

$$h_{in}^1 = h_c \quad (8)$$

$$h_{in}^n = h_{in}^{n-1} - \Delta\zeta$$

식 (8)에서와 같이 첫 번째 유입 유막 두께를 주변 유막 두께( $h_c$ )로 가정한다. 이후에는 이전 볼의 중앙 유막 두께로부터 회복된 유막 두께를 유입 유막 두께로 계산하였다.

2.4. 해석 알고리즘

본 연구에서 구름 접촉 모델의 유막 두께 계산 알고리즘은 Fig. 6과 같다.

3. 결과 및 고찰

해석 모델은 Thrust 베어링으로 선정하였으며, 재료 물성값 및 작동 조건은 Table 1, Table 2와 같다. 이를 이용하여 볼의 개수, 회전 속도, 적용 하중에 따른 중앙 유막 두께 변화를 계산했다.

각 요인 별 무차원 중앙 유막 두께( $H_c$ )를 계산했다. 식은 다음과 같다.

**Table 1. Material properties and geometry**

Material properties	Value
Young's modulus (GPa)	207
Poisson's ratio	0.3
Pitch diameter (m)	0.031
Ball diameter (m)	0.003
Surface tension (N/m)	0.036
Viscosity (Pa*s)	0.02

**Table 2. Reference operating conditions**

Factors	Value
Applied Force(N)	30
Sliding velocity(rpm)	80
Ambient film thickness( $\mu\text{m}$ )	100
Numbers of balls(EA)	6
Conformity	0.52

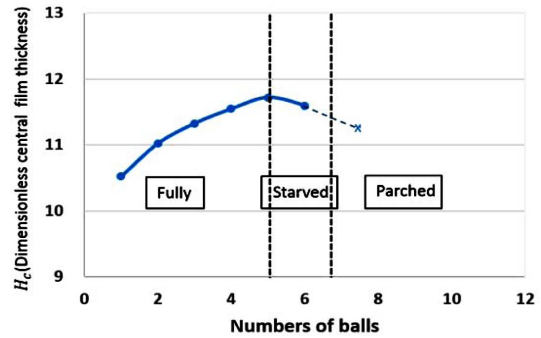
$$H_c = h_c / r_b \quad (9)$$

**3-1. 전체 볼의 개수에 따른 중앙 유막 두께 변화**

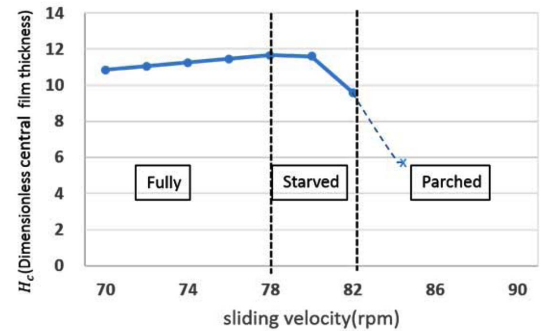
Table 2를 기준으로 전체 볼의 개수에 따른 중앙 유막 두께 변화를 그래프로 도시했다. 볼의 개수가 1개에서 11개까지 증가할 때의 중앙 유막 두께 변화는 Fig. 7과 같다. 1개에서 5개까지는 Fully flooded 윤활 상태이고 5개를 초과하여 6개까지는 Starved 윤활 상태가 된다. 6개를 초과하면 Starved 윤활 상태에서 Parched 윤활 상태로 변경됨을 확인했다. Starved 윤활 상태와 Parched 윤활 상태의 구분은 Hertz 접촉영역에서 oil 유동량보다 더 적은 보충이 이루어질 때를 정하여 구분했다[8]. 볼의 개수가 증가하면 각 볼에 분배되는 하중이 감소하여 유리하지만 볼과 볼 사이에서 유막이 회복될 시간이 줄어들어 유막 생성에 불리해진다. 유막이 충분히 회복되지 못하면 유입 유막 두께는 볼의 전체 개수에 따라 계속 감소하게 되고, 전체 볼이 6개에 이르러서는 결국 유막을 회복하지 못하고 Parched 윤활 상태가 된 것으로 판단된다.

**3-2. 회전 속도에 따른 중앙 유막 두께 변화**

회전 속도에 따른 중앙 유막 두께 변화를 그래프로 도시했다. 회전속도 70 rpm에서 90 rpm까지 증가할 때의 중앙 유막 두께 변화는 Fig. 8과 같다. 70 rpm에



**Fig. 7. The change in  $H_c$  with numbers of balls.**



**Fig. 8. The change in  $H_c$  with sliding velocity.**

서 78 rpm까지는 Fully flooded 윤활 상태이고 78 rpm을 초과하여 82 rpm까지는 Starved 윤활 상태가 된다. 82 rpm을 초과하면 Starved 윤활 상태에서 Parched 윤활 상태로 변경됨을 확인했다. 회전 속도가 계속 증가하면 유막 두께 생성이 일반적으로 유리할 것으로 판단되지만 일정 속도를 초과하면 유막 회복 시간이 감소함에 따라 회복 시간이 충분할 때에 비해 유입 유막이 감소함으로써 중앙 유막 두께가 감소하는 것으로 판단된다.

**3-3. 적용 하중에 따른 중앙 유막 두께 변화**

적용 하중에 따른 중앙 유막 두께 변화를 그래프로 도시했다. 적용 하중 10N에서 60N까지 증가할 때의 중앙 유막 두께 변화는 Fig. 9와 같다. 10N에서 25N까지는 Fully flooded 윤활 상태이고 25N 초과하여 40N까지는 Starved 윤활 상태가 된다. 40N 초과하면 Starved 윤활 상태에서 Parched 윤활 상태로 변경됨을 확인했다. 적용 하중이 계속 증가하면 일반적으로 예상하는 바와 같이 중앙 유막 두께가 점점 감소하는 경향이다. 도시한 결과와 일치함을 확인하였다.

Fig. 10은 무차원 기준 미니스커스 위치( $m$ )와 무차원

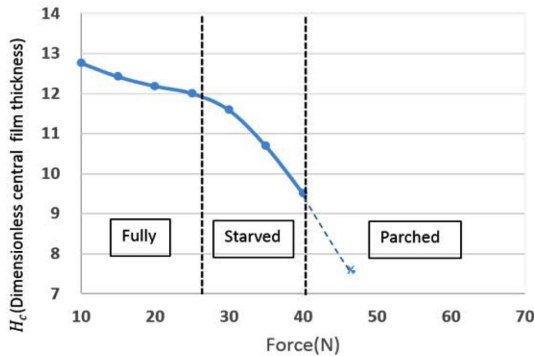


Fig. 9. The change in  $H_c$  with Force.

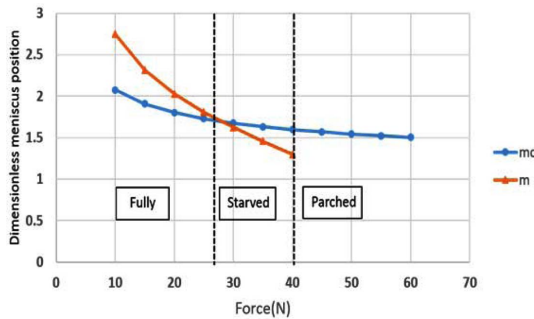


Fig. 10. The change in  $m_c$  and  $m$  with Force.

계산된 미니스커스 위치( $m$ )의 값을 비교한 그래프이다. 25N 초과하여 40N 까지의 구간에서 무차원 계산된 미니스커스 위치 값이 무차원 기준 미니스커스 위치의 값보다 크므로 Fully flooded 윤활 상태에서 Starved 윤활 상태로 천이됨을 확인하였으며 이론과 일치하였다.

3.4. 주변 유막 두께에 따른 윤활 상태 변화

주변 유막 두께 증가에 따른 중앙 유막 두께 변화를 그래프로 도시하였다. 100  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  주변 유막 두께에 따른 중앙 유막 두께를 계산하였다. Fig. 11에서 주변 유막 두께가 증가하면 Fully flooded 윤활 상태가 윤활유 부족 상태로 천이되는 지점이 지연됨을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 Thrust 볼 베어링에 대해 유막 회복 이론을 적용하여 윤활유 부족 상태에서의 전체 볼의 개수, 회전 속도, 적용 하중과 같은 작동 조건을 고려하여 중앙 유막 두께를 계산하고 각각의 윤활 상태를

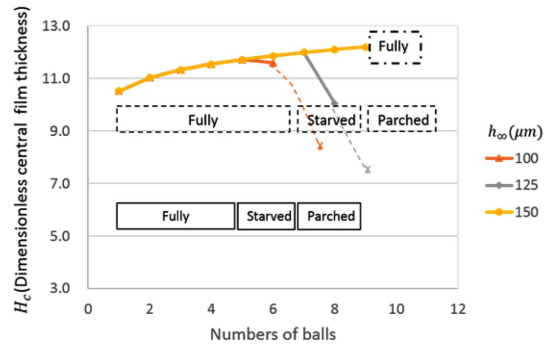


Fig. 11. The change in  $H_c$  with Ambient film thickness.

판별하였다.

본 연구에 의한 결과는 다음과 같다.

1. 계산된 중앙 유막 두께를 통해 최적 볼의 개수가 존재하였다. 전체 볼의 개수가 증가하면 중앙 유막 두께가 증가하다가 감소하는 변곡점을 확인하였다. 따라서 최적 볼의 개수를 초과하면 중앙 유막 두께가 감소하고 Parched 윤활 상태로 이르게 된다.
2. 계산된 중앙 유막 두께를 통해 최적 회전 속도가 존재하였다. 회전 속도가 증가함에 따라 중앙 유막 두께는 증가하다가 감소하였다. 따라서 최적 회전 속도를 초과하면 중앙 유막 두께가 감소하고 Parched 윤활 상태로 천이되었다.
3. 적용 하중이 증가함에 따라 중앙 유막 두께는 감소하였으며 무차원 기준 미니스커스 위치와 무차원 계산 미니스커스 위치와의 비교를 통해 윤활 상태 천이를 구분하였다.

이러한 결과는 주변 유막 두께를 변경하거나, 보다 좋은 윤활 환경을 찾을 수 있는 방안으로 활용되리라 기대한다.

Acknowledgements

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] Hamrock, Bernard, J., Steven R. Schmid, Bo O. Jacobson, Fundamentals of fluid film lubrication. CRC press, 2004.  
 [2] Johnson, K. L., Contact mechanics, 1<sup>st</sup> Edition, Chap. 4, pp. 84, Cambridge University Press., Cam-

- bridge, 1985 (ISBN 0521-34796-3).
- [3] Wedeven, L. D. Evans, D., Cameron, A., "Optical analysis of ball bearing starvation", *Journal of Lubrication Technology*, 1970.
- [4] Chiu, Y. P., "An analysis and prediction of lubricant film starvation in rolling contact systems", *ASLE Transactions*, Vol. 17, No. 1, pp. 22-35, 1974.
- [5] Pemberton, J., Cameron, A. "A mechanism of fluid replenishment in elastohydrodynamic contacts." *Wear* Vol. 37, No. 1, pp. 185-190, 1976.
- [6] Kingsbury, E. "Parched elastohydrodynamic lubrication", *Journal of Tribology*, Vol. 107, No. 2, pp. 229-232, 1985.
- [7] Guangteng, G., Cann, P. M., Spikes, H. A. "A study of parched lubrication", *Wear*, Vol. 153, No. 1, pp. 91-105, 1992.
- [8] Liu, Jianhai, Shizhu Wen, "Fully flooded, starved and parched lubrication at a point contact system", *Wear*, Vol. 159, No. 1, pp. 135-140, 1992.
- [9] Chevalier, F., Lubrecht, A. A., Cann, P. M. E., Colin, F., Dalmaz, G. "Film thickness in starved EHL point contacts", 1998.
- [10] Cann, Philippa, Lubrecht, A. A. "An analysis of the mechanisms of grease lubrication in rolling element bearings", *Lubrication Science*, Vol. 11, No. 3, pp. 227-245, 1999.
- [11] Cann, P. M. E. "Thin-film grease lubrication", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 213, No. 5, pp. 405-416, 1999.
- [12] Cann, P. M. E., Bruno Damiens, A. A. Lubrecht, "The transition between fully flooded and starved regimes in EHL", *Tribology International*, Vol. 37, No. 10, pp. 859-864, 2004.
- [13] Chen, Jing, Hiroyoshi Tanaka, Joichi Sugimura. "Experimental study of starvation and flow behavior in grease-Lubricated EHD contact", *Tribology Online*, Vol. 10, No. 1, pp. 48-55, 2015.
- [14] Nogi, Takashi, "An analysis of starved EHL Point contacts with reflow", *Tribology Online*, Vol. 10, No. 1, pp. 64-75, 2015.
- [15] Nogi, Takashi, "Film thickness and rolling resistance in starved elastohydrodynamic lubrication of point contacts with reflow", *Journal of Tribology*, Vol. 137, No. 4, 041502, 2015.
- [16] Maruyama, Taisuke, Tsuyoshi Saitoh, "Relationship between supplied oil flow rates and oil film thicknesses under starved elastohydrodynamic lubrication", *Lubricants*, Vol. 3, No. 2, pp. 365-380, 2015.