

거친 표면의 돌기 방향성에 따른 EHL 해석 EHL Analysis for Rough Surface with Directional roughness

*#김태완¹, 박영환², 곽재섭³

*#T. W. Kim¹ (tw0826@pknu.ac.kr), Y. W. Park², J. S. Kwak³
1,2,3 부경대학교 기계공학부

Key words : EHL (Elasto-hydrodynamic Lubrication), Rough surface, Transversal roughness, Longitudinal roughness

1. 서론

탄성유체윤활(Elasto-hydrodynamic Lubrication; EHL)이론은 엔진 실린더, 베어링, 기어 치면 등의 접촉부 수명 개선을 위한 해법으로 널리 이용되고 있다. 그러나 EHL 이론은 수 um 에서 nm 단위의 유막 구성에 근거를 두므로 알고리즘의 수렴성과 더불어 표면의 미시적 형상에 따라 결과의 신뢰도가 크게 좌우된다. 돌기의 접촉에 의한 국부 압력의 상승은 피로 수명에 영향을 미치며 접촉에 의한 피팅과 스커핑도 유발할 수 있다.

그동안 표면 거칠기가 윤활영역내의 압력 및 유막두께에 관한 연구는 많이 진행되어 왔다[1,2]. EHL 해석시 돌기의 영향을 밝히기 위해서는 mixed lubrication 영역에 대한 Partial-EHL 해석이 필요하다. Partial-EHL 해석의 가장 큰 특징은 하중 분배가 유막과 돌기에 의해 이루어지는 것이다. 유체에 의해 분리된 두 표면간의 유막 두께 및 압력을 구할 수 있을 뿐만 아니라, 돌기에 의해 접촉이 일어나는 국부적인 유막 파괴 현상을 구현할 수 있다. 그러나 수렴이 어려운 EHL 해석에 돌기 접촉이라는 유체 불연속점이 존재하므로 알고리즘 구성이 난해하고 수렴성이 떨어지는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 구름 방향에 대하여 표면거칠기가 순수 종방향(Pure longitudinal direction) 거칠기, 순수 횡방향(Pure transversal direction) 거칠기, 등방성(Isotropic) 거칠기를 갖는 표면들에 대해서 탄성유체윤활 해석을 수행하였다. 이를 위해 PEHL 알고리즘을 구성하였고 세가지 접촉 표면 형상에 대해 PEHL 해석을 실시하여 유막 발달에 유리한 표면 형상을 확인하였다.

2. 탄성유체윤활 해석

2.1 유막 두께 방정식

두 탄성체의 접촉을 상당표면과 강체의 접촉으로 등가시켰을 때 유막 두께식은 다음과 같다.

$$h(x, y) = -\delta + f(x, y) + r(x, y) + d(x, y) \quad (1)$$

여기서, h 는 주어진 하중에 대한 두 표면의 상대접근거리, f 는 매끄러운 형상, δ 는 유효 강체 변위, r 은 표면 거칠기 성분이며, d 는 압력에 의한 표면의 탄성변위이다.

2.2 하중 관계식

가해진 하중과 분포 압력은 아래의 관계식을 만족해야 한다.

$$W = \iint_{\Omega} P dx dy \quad (2)$$

여기서 P 는 전체 해석 영역(Ω)에 대한 압력이며 접촉이 일어나지 않을 경우 유막 압력으로, 접촉이 일어났을 경우 유막 압력(P_f)과 접촉 변위로부터 유발되는 압력(P_s)의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} P(x, y) &= P_f(x, y) & h(x, y) &> 0 \\ P(x, y) &= P_f(x, y) + P_s(x, y) & h(x, y) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 탄성 변위식

이산화된 균일한 사각조각 표면에 작용하는 균일한 수직 분포하중에 의한 변위는 Love[3]의 변위해로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} d(x, y) &= \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F_{i,j,x,y} P_{x,y} \\ i &= 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 F 는 영향함수(influence function)를 나타낸다.

2.4 레이놀즈 지배방정식

X 방향으로 윤활유가 유입될 때 윤활 접합면 내의 모든 노드에 대한 레이놀즈 지배방정식은 다음과 같으며 이로부터 유막 압력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial P_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial P_f}{\partial y} \right) &= K \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \\ h(x, y) &> 0 \end{aligned} \quad (5)$$

윤활 접합면에 대한 경계 조건은 레이놀즈 경계조건을 적용한다.

$$\begin{aligned} P_f(x, y) &= 0 & \text{at } x_{in} \\ P_f(x, y) < 0 \text{ and } \frac{\partial P_f(x, y)}{\partial x} &= 0 & \text{at } x_{out} \end{aligned} \quad (6)$$

레이놀즈 식은 돌기 접촉이 발생하지 않은 격자에 대해 micro-EHL 해석을 수행하며, 돌기 접촉이 일어난 격자의 경우 접촉 압력에 의해 변형된 돌기 형상으로부터 0 의 유막을 설정하고 유막 압력을 계산한다. 이로부터 얻어지는 유막 압력은 가정된 0 의 유막을 만족시키지 못한다. 즉, 초기 형상의 돌기를 완전히 상승시키지 못하고 돌기 접촉량을 발생시킨다. 이러한 접촉량은 접촉해석을 통해 변형시킨다. 윤활유의 점성과 밀도에 대해 Roelands 의 점도-압력관계식, Dowson & Higginson 의 밀도-압력 관계식을 각각 적용하였다.

3. 해석 결과

해석에 사용된 실린더의 표면형상을 Fig. 1 에서 보여주고 있다. Amplitude 가 0.5 μ m 로 동일한 순수 종방향(Pure longitudinal direction) 거칠기, 순수 횡방향(Pure transversal direction) 거칠기, 등방성(Isotropic) 거칠기를 갖는 표면들을 수치적으로 생성하였다.. 해석에 사용된 관련 파라미터는 Table 1 과 같으며, 윤활유는 팜유이다.

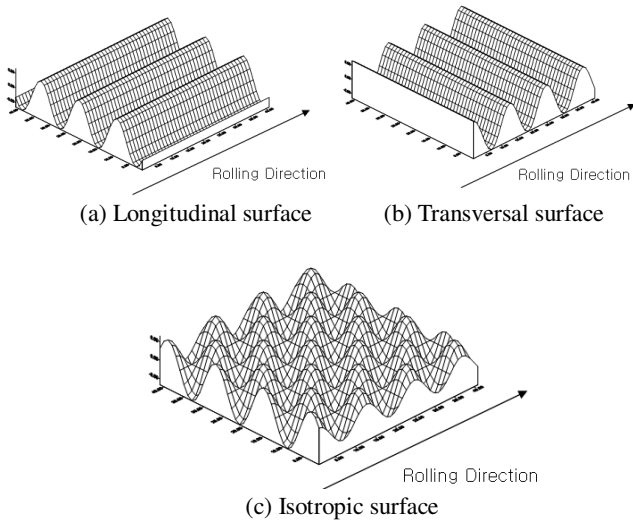


Fig. 1 Surface shape for cylindrical contact

Table.1 Analysis Condition

Viscosity of Lubricant	44.30×10 ⁻³ [Ns/m ²]
Density of Lubricant	817.9 [Kg/m ³]
Viscosity Index	0.41
Pressure-Viscosity Factor	22.0×10 ⁻⁹ [m ² /N]
Maximum Vertical Load	100[N]
Relative Velocity	0.5 [m/s]
Elastic Modulus & Poisson's ratio	210GPa & 0.3

Fig. 2 는 순수 종방향 표면과 순수 횡방향 표면의 탄성 유체해석 결과를 나타낸 것이다. 순수 종방향 표면의 경우가 유체압력이 높고 최소유막두께가 더 크음을 확인할 수 있다. 접촉 피로파손 측면에서는 종방향 표면이 낮은 압력을 보이므로 횡방향 표면보다 유리할 것으로 생각될 수 있으나 돌기의 직접적인 접촉에 의한 소착 파손 측면에서는 횡방향 표면이 종방향 표면이 더 큰 최소유막두께를 가지므로 보다 긍정적인 효과를 가질 수 있다.

Fig. 3 은 등방성 표면의 해석결과를 도시한 것인데, 매끄러운 표면에 비해 발행압력이 매우 크음을 알 수 있고 최소유막두께도 상당히 감소함을 확인할 수 있다. 또한 등방성 표면의 해석결과는 횡방향 표면의 결과와 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

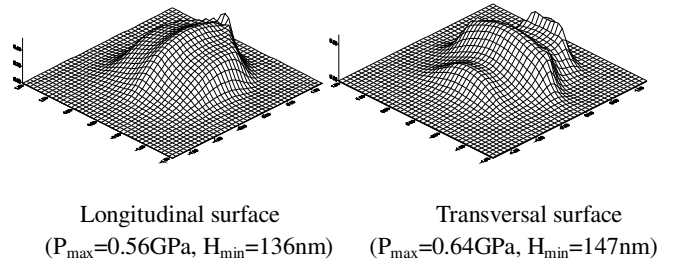
본 연구에서는 종방향 표면과 횡방향 표면, 그리고 등방성표면에 대한 탄성유체해석을 수행하였다. 해석결과, 순수 종방향 표면의 경우가 유체압력이 높고 최소유막두께가 더 크음을 확인할 수 있었다. 그러나 이는 낮은 하중에서의 단편적인 상대비교 결과이며 적용하중이나 유체 속도, 돌기의 amplitude, 그리고 돌기의 방향비 등에 대한 고찰이 향후 필요할 것으로 사료된다.

후기

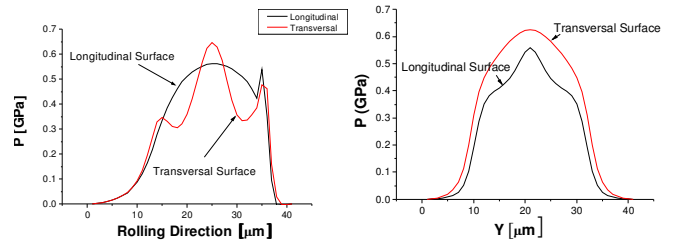
이 논문은 2008 학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PKS-2008-007)

참고문헌

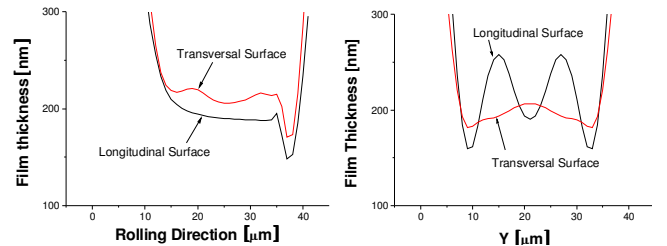
1. Chang, L., "A deterministic model for line contact partial elasto-hydrodynamic lubrication," Triblo. Int., Vol. 28, No. 2, pp.75-84, 1995
2. Lubrecht, A.A., Ten Napel, W.E. and Bosma., R., "The influence of Longitudinal and Transverse Roughness on the



(a) 3D pressure distribution

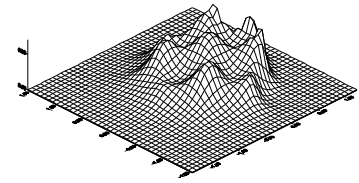


(b) 2D pressure distribution



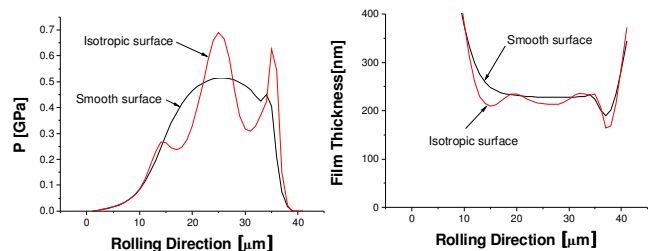
(c) Film Thickness

Fig. 2 Results for longitudinal and transversal surfaces



(P_{max}=0.7GPa, H_{min}=146nm)

(a) 3D pressure distribution



(b) 2D pressure distribution

(c) Film Thickness

Fig. 3 Result for isotropic surface

Elastohydrodynamic Lubrication of Circular Contacts," Journal of Tribology ASME, Vol. 110, pp. 421-426, 1988

2. Love A. E. H., "Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary," Phil. Trans. Royal Society, A228, pp.377-420, 1929