

PEHL 을 이용한 실린더 크라우닝에 관한 연구

A Study on Cylinder Crowning using Partial EHL Analysis

#김태완¹, 김동원²#T. W. Kim¹ (tw0826@pknu.ac.kr), D. W. Kim²¹ 부경대학교 기계공학부, ² 현대자동차 남양연구소

Key words : PEHL (Partial Elasto-hydrodynamic Lubrication), Cylinder Crowning

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. 표면거칠기가 유막에 미치는 영향에 관한 초기 연구는 flow factor method[1]를 통해 구해왔다. 그러나 flow factor 법은 평균화된 압력을 계산하기 때문에 국부적으로 발생하는 압력의 분포를 정확히 알 수 없는 한계를 가지고 있어 실제 기계 작동에서 발생하는 유막 파괴현상을 구현하기 어렵다. 또한 최근 컴퓨터 성능의 발전에 의해 표면 거칠기 형상에 의해 생성되는 윤활 접합 영역내의 랜덤한 유막분포에 대한 유막압력을 계산할 수 있는 micro-EHL 분야[2]가 대두되었다. 그러나 micro-EHL의 경우 많은 연구 성과에도 불구하고 돌기간의 직접적인 접촉을 고려하지 못한 한계를 가진다. 돌기의 접촉에 의한 국부 압력의 상승은 피로 수명에 영향을 미치며 접촉에 의한 피팅과 스커핑도 유발할 수 있다.

그러므로 표면 거칠기가 유막 형성 및 파괴에 미치는 영향을 직접적으로 알아내기 위해 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 기어나 롤러-캡 기구 등과 같이 윤활 상태의 선접촉이 발생하는 기계요소에서 흔히 접할 수 있는 실린더 크라우닝 문제를 해결하기 위해 PEHL 기법을 적용하였다. 이를 위해 새로운 PEHL 알고리즘을 구성하였고 두 가지 접촉 표면 형상을 갖는 실린더 접촉부에 대해 PEHL 해석을 실시하여 유막 발달에 유리한 표면 형상을 확인하였다.

2. 혼합 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 Love의 변위[3]로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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.

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

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 0의 유막을 설정하고 유막 압력을 계산한다. 이로부터 얻어지는 유막 압력은 가정된 0의 유막을 만족시키지 못한다. 즉, 초기 형상의 돌기를 완전히 상승시키지 못하고 돌기 접촉량을 발생시킨다. 이러한 접촉량은 접촉해석을 통해 변형시킨다. 윤활유의 점성과 밀도에 대해 Roelands의 점도-압력관계식[4], Dowson & Higginson의 밀도-압력 관계식[5]을 각각 적용하였다.

3. 해석 결과

해석에 사용된 실린더의 표면형상을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 윤활유가 유입되는 방향의 직각방향으로 $1/2\lambda$ 주

기지를 갖는 sine 과 형상과 2λ 주기를 갖는 sine 과 형상의 표면에 대하여 윤활 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 관련 파라메터는 Table 1 과 같으며, 윤활유는 광유이다.

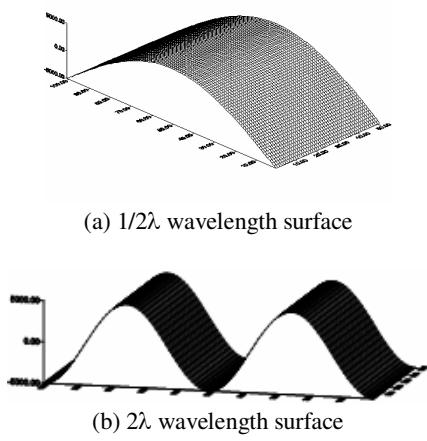


Fig. 1 Surface shape for cylindrical contact

Table.1 Analysis Condition

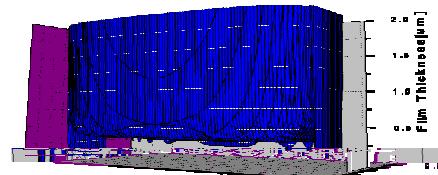
Viscosity of Lubricant	44.30×10^{-3} [Ns/m ²]
Density of Lubricant	817.9 [Kg/m ³]
Viscosity Index	0.41
Pressure-Viscosity Factor	22.0×10^{-9} [m ² /N]
Maximum Vertical Load	43400[N]
Relative Velocity	0.5 [m/s]
Elastic Modulus & Poisson's ratio	210GPa & 0.3

Fig. 2 의 $1/2\lambda$ 표면에 대한 해석결과, 접촉은 발생하지 않고 전체 표면이 윤활유에 의해 분리되어 있음을 알 수 있다. 또한 압력이 전체 접촉면에 대해 고르게 분포됨으로써 접촉 피로 수명에 긍정적인 영향을 가져올 수 있다. 반면 Fig. 3 의 2λ 표면은 고체 표면간의 직접적인 접촉이 발생함을 확인할 수 있다. 압력은 웨이브의 형상을 따라 2 개의 큰 분포를 이루고 있으며 접촉이 발생하는 부위에서 압력 스파이크가 발생한다. 표면의 직접적인 접촉은 표면간의 마모를 유발하고 소착을 발생시키는 원인이 된다.

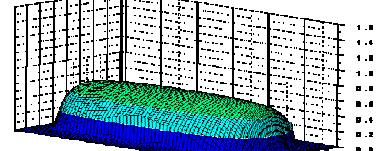
$1/2\lambda$ 과형의 표면은 최고봉이 윤활 중심 영역에 위치한다. 이 웨이브에 의해 윤활유가 압착되면서 EHL 효과는 극 대화 된다. 이로 인해 표면은 충분히 변형되면서 유막이 발달하게 된다. 또한 Y 방향의 가장자리로 갈수록 매끄러운 크라우닝 형상을 가지므로 윤활 취약 부분에서 긍정적인 효과를 나타낼 수 있다. 반면 2λ 웨이브 표면은 EHL 효과에 역행하는 구조를 가지고 있다. 유막이 발달하기 쉬운 가운데 부분에 골을 가지고 있으므로 윤활유는 큰 압착효과 없이 쉽게 통과하게 된다. 또한 Y 방향으로의 윤활유 유출이 큰 Y 방향의 가장자리에 웨이브가 위치하므로 이 부분에서 유막 파손이 발생한다. 물론 국부적인 웨이브에 의해 윤활유 압착 및 압력 상승 효과가 발생하여 유막이 발달하지만 전체 접촉면에서 볼 때 이 부분은 윤활유가 빠져나가는 윤활 취약 부분이므로 고체간의 직접적인 접촉이 발생할 가능성성이 높다.

4. 결론

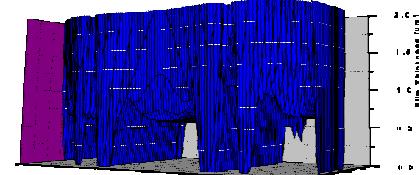
본 연구는 표면의 wave 형상이 유막 발달 및 수명에 어떤 영향을 미치는가를 연구하기 위해 수행되었다. 이를 위해 3 차원 PEHL 알고리즘을 구성하고 프로그램을 개발하였다. PEHL 프로그램을 이용하여 $1/2\lambda$ 과형을 가진 타원 표면이 2λ 과형을 가진 표면보다 유막 발달에 있어서 더 유리한 구조임을 확인하였다.



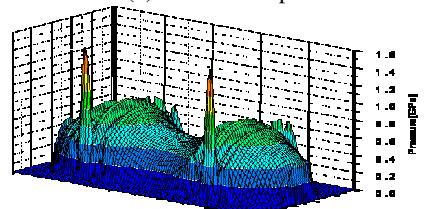
(a) A film shape



(b) A pressure Distribution

Fig. 2 Result for surface with wavelength of $1/2\lambda$ 

(a) A film shape



(b) A pressure Distribution

Fig. 3 Result for surface with wavelength of 2λ

후기

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

참고문헌

- Patir, N. Cheng, H. S. "An average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial hydrodynamic Lubrication," ASME, J. Lubri. Tech. Vol. 100, pp. 12-17, 1978
- Chang, L., "A deterministic model for line contact partial elasto-hydrodynamic lubrication," Triblo. Int., Vol. 28, No. 2, pp.75-84, 1995
- 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
- Roelands, C. J. A., "Correlational Aspects of the viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils," Druk, V.R.B., Groinen, Netherland, 1966
- Dowson, D. Higginson, G.R., "Elastohydrodynamic Lubrication," Perga-mon, Oxford, 1966