

스핀운동이 타원접촉의 탄성유체윤활에 미치는 영향

The Effect of Spin Motion on Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts

**박태조¹, 고재현²

*T. J. Park(tjpark@gnu.ac.kr)¹, J. H. Ko²

¹경상대학교 기계항공공학부, ²경상대학교 대학원

Key words : Elliptical Contacts, Spinning, EHL, Numerical Analysis, Newton-Raphson Method, Minimum Film Thickness

1. 서론

앵글러 컨택트 볼베어링(Angular contact ball bearing)이나 최근 에 개발되어 자동차 등의 CVT용으로 사용되고 있는 토로이드형(Toroidal type) 트랙션 드라이브(Traction drive)에서는 전동요소 간에 구름/미끄럼운동과 동시에 스핀운동(Spinning)이 발생한다. 하지만 지금까지의 타원접촉 EHL문제에 대한 아주 많은 연구에도 불구하고 스핀운동을 고려한 EHL해석결과는 극소수에 불과한 실정이다[1-6]. 스핀운동을 고려한 최초의 타원접촉 EHL해석이 Mostofi & Gohar[1]에 의해서 시도된 이후에 Dowson 등[2]은 이에 대한 보다 상세한 해석결과를 제시하였다. 지금까지의 스핀운동을 고려한 연구중에서 참고문헌[2-4]는 저하중인 경우에, 참고문헌[5-6]은 상대적으로 고하중인 경우에 대한 수치해석결과를 각각 제시하였다. 특히, 박태조[4]는 스핀운동이 없는 경우와는 달리 스핀운동을 하는 경우에는 최소유막두께에 미치는 하중의 영향이 아주 크기 때문에 일반적인 EHL조건에 적용할 수 정확한 최소유막두께식을 구하기 위해서는 추가연구의 필요성을 제기하였다. 한편, 앞에서 언급한 기계요소에서 접촉타원비는 운전조건에 따라서 변화하지만 스핀운동을 하는 경우에 대한 상세한 해석결과는 아직 제시되지 않고 있다.

이에 본 논문에서는 일반적인 운전조건의 타원접촉 EHL문제에 대한 정확한 유막두께식을 제시하기 위한 연구의 일환으로 구름운동과 동시에 스핀운동을 하는 타원체에서 타원비가 변화하는 경우에 대한 EHL특성을 수치해석적으로 조사하고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치해석방법

Fig.1에 나타난 것과 같이 타원체가 구름운동과 스핀운동을 동시에 하는 경우의 무차원형태의 레이놀즈 방정식과 EHL 상태하에서의 압력-점도관계식, 압력-밀도식, 유막두께식 및 하중조건식은 순서대로 나타내면 다음 식들과 같다[4].

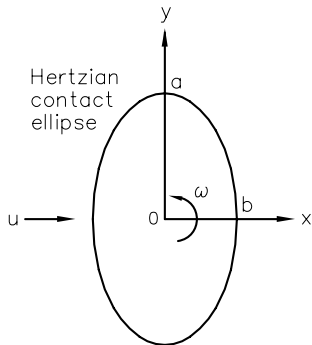


Fig. 1 Contact ellipse and coordinate system.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(-\frac{\rho H^3}{\eta} \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{1}{k^2} \frac{\partial}{\partial Y} \left(-\frac{\rho H^3}{\eta} \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = 12U \frac{b}{R_x} \left[\left(1 - \frac{kbBY}{2R_x} \right) \frac{\partial(\rho H)}{\partial X} + \frac{bBX}{2kR_x} \frac{\partial(\rho H)}{\partial Y} \right] \quad (1)$$

$$\eta = \exp \left[\{ \ln(\eta_0) + 9.67 \} \{ -1 + (1 + 5.1EP)^2 \} \right] \quad (2)$$

$$\rho = 1 + \frac{0.58EP}{1 + 1.68EP} \quad (3)$$

$$H = H_0 + \frac{b^2}{2R_x^2} \left\{ X^2 + \frac{R_x}{R_y} k^2 Y^2 \right\} + H_d \quad (4)$$

$$W = \frac{-kb^2}{R_x^2} \iint P dXdY \quad (5)$$

본 논문에서는 참고문헌[4,7]과 동일하게 수치해석과정이 체계적이고 물리적으로 타당한 결과를 제시한다고 알려진 유한차분법과 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson) 방법을 적용하였으며, 상세한 해석과 계산시간 절약을 위하여 불균일격자계를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 타원비의 변화에 대한 EHL해석결과를 비교하기 위하여 스핀/구름 속도비 B를 제외한 계산조건은 참고문헌[8]과 동일하게 두었다.

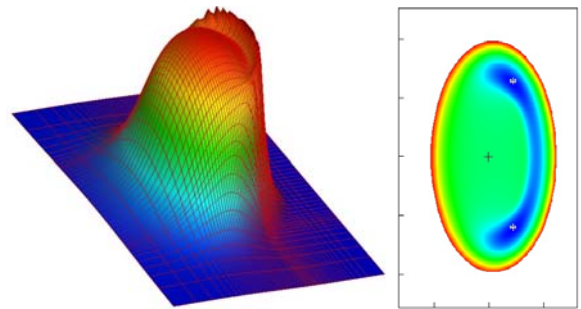


Fig. 2 Pressure distribution and film contours : U=1.683x10⁻¹², W=1.106x10⁻⁷, G=4522, k=1.75, B=0

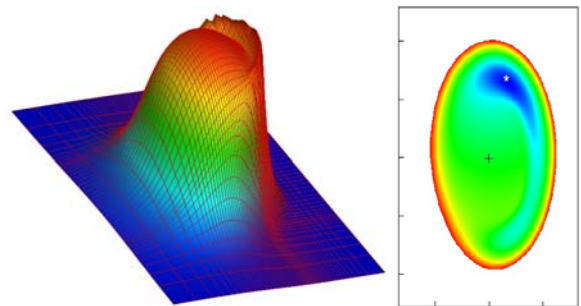


Fig. 3 Pressure distribution and film contours : U=1.683x10⁻¹², W=1.106x10⁻⁷, G=4522, k=1.75, B=120

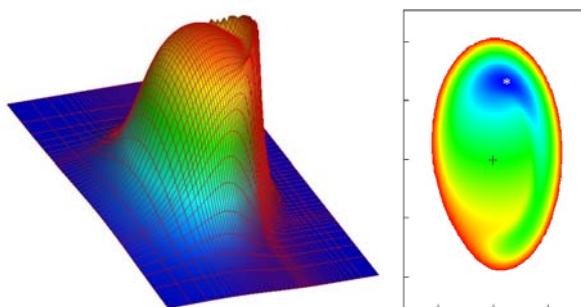


Fig. 4 Pressure distribution and film contours : U=1.683x10⁻¹², W=1.106x10⁻⁷, G=4522, k=1.75, B=240

Fig.2~Fig.4에는 Hertz 접촉타원의 타원비가 $k=1.75$ 인 경우에 스핀/구름 속도비가 다른 3가지 조건에 대한 $-1.7 \leq X \leq 1.5$, $|Y| \leq 3.5$ 인 영역에서의 3-D 압력분포와 2-D 유막형상을 서로 비교하여 나타내었다. 유막형상에서 +와 * 기호는 접촉타원의 중심위치 ($X=Y=0$)와 최소유막 H_m 이 발생하는 위치를 각각 표시한다. Fig.2에 나타난 순수구름운동($B=0$)인 경우의 압력분포와 유막형상에서는 타원접촉 EHL문제에서의 대표적인 특징들인 구름방향 출구영역에서의 압력 Spike와 함께 접촉중앙부 영역에서 크기가 일정한 유막이 출구부에서 급격하게 수축하여 전체적으로는 말발굽모양을 나타내고 있다. 이때, Side lobe부에서 발생하는 최소유막두께 H_m 은 접촉타원의 단축에 대하여 대칭적이다. 만일, 타원체가 Fig.1과 같이 스핀운동하는 경우에는 +Y영역에서는 접촉중앙부에서 멀어질수록 구름방향속도가 느려지므로 발생압력이 낮게 되고, 이에 따라 탄성변형량도 작아지게 되어 결과적으로 유막두께는 감소한다. Fig.3과 Fig.4는 각각 $B=120$, $B=240$ 인 경우의 EHL 해석결과이다. 한편, B가 커질수록 압력 Spike는 -Y영역에서 크게 나타나고 있다.

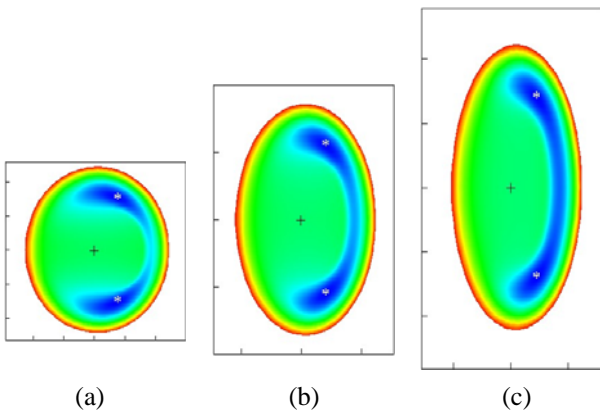


Fig. 5 Film contours, $U=1.683 \times 10^{-12}$, $W=1.106 \times 10^{-7}$, $G=4522$, $B=0$: (a) $k=1.0$, (b) $k=1.5$, (c) $k=2.0$

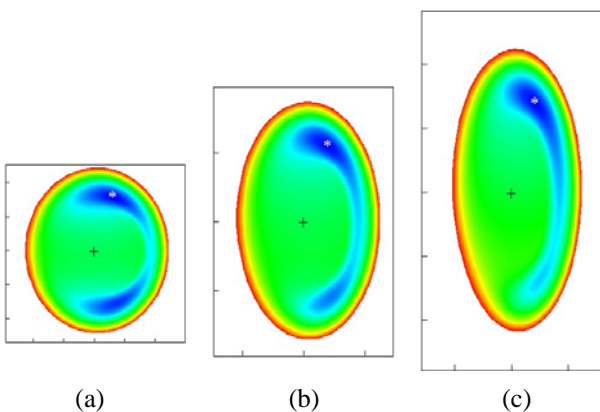


Fig. 6 Film contours, $U=1.683 \times 10^{-12}$, $W=1.106 \times 10^{-7}$, $G=4522$, $B=60$: (a) $k=1.0$, (b) $k=1.5$, (c) $k=2.0$

Fig.5와 Fig.6에는 타원체의 타원비가 $k=1.0$, 1.5 및 2.0 일 때, 스핀운동이 없는 경우와 스핀운동($B=60$)하는 경우에 대한 유막형상의 변화를 서로 비교하여 나타내었다. 타원비가 커질수록 최소유막두께 H_m 의 발생위치는 접촉중앙부에서 멀어지므로 앞의 Fig.2~Fig.4의 고찰결과와 같이 스핀운동은 H_m 의 크기에 아주 큰 영향을 미칠 것임을 쉽게 예측할 수 있다.

Fig.7에는 타원비 k 의 변화에 대한 접촉중앙부 유막두께 H_c 와 H_m 의 변화를 스핀/구름 속도비가 다른 경우와 서로 비교하여 나타낸 결과로 타원비가 증가할수록 스핀운동으로 인한 영향이 H_c 에는 작지만 H_m 에는 아주 크게 나타나고 있다. 여기서, H_c 와 $B=0$ 인 경우의 H_m 은 참고문헌[8]의 결과와 거의 동일하였다.

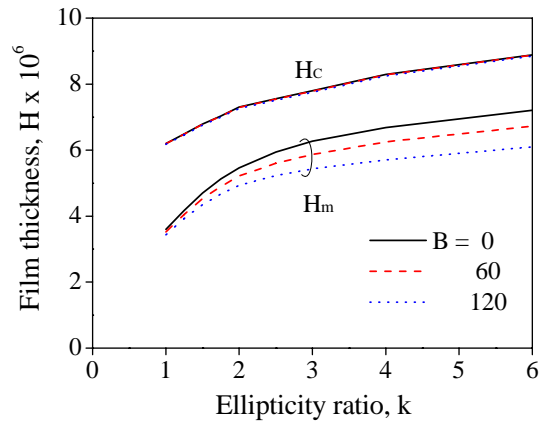


Fig. 7 Variation of central and minimum film thicknesses with ellipticity ratio : $U=1.683 \times 10^{-12}$, $W=1.106 \times 10^{-7}$, $G=4522$

4. 결론

본 논문에서는 앵글러 컨택트 볼 베어링과 토로이드형 트랙션 드라이브 등에서와 같이 구름운동과 스핀운동이 동시에 발생하는 타원접촉 EHL문제에 유한차분법과 뉴턴-랩슨 방법을 적용하여 수치해석하였다. 이 결과, 접촉중앙부 유막두께와는 달리 타원비가 크게 될수록 스핀운동은 최소유막의 크기를 아주 크게 감소시켰다. 따라서, 일반적인 조건의 타원접촉 EHL문제에 적용할 수 있는 정확한 최소유막두께식을 제시하기 위해서는 다양한 운전조건에 대한 추가연구가 요구되며, 본 논문에서 사용한 수치해석 방법과 결과가 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2007년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. Mostofi, A. and Gohar, R., "Oil Film Thickness and Pressure Distribution in Elastohydrodynamic Point Contacts", *J. of Mech. Eng. Sci.*, Vol.24, pp.173-182, 1982.
2. Dowson, D., Taylor, C. M. and Xu, H., "Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts with Spin and Rolling", *Proc. Instn. Mech. Engrs., J. of Mech. Eng. Sci.*, Vol.205, pp.165-174, 1991.
3. Zou, Q., Huang, C. and Wen, S., "Elastohydrodynamic Film Thickness in Elliptical Contacts with Spinning and Rolling", *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol.121, pp.686-692, 1999.
4. 박태조, "타원접촉의 탄성유체윤활 : 제2보 - 스핀운동의 영향", *한국윤활학회지*, Vol.23, No.2, pp.49-55, 2007.
5. Taniguchi, M., Dowson, D. and Taylor, C. M., "The Effect of Spin Motion upon Elastohydrodynamic Elliptical Contacts", *Elastohydrodynamics*, Vol.32, pp.599-610, 1997.
6. 장시열, "무단 변속기의 동력전달 접촉에서 회전운동을 고려한 타원형상의 점접촉 탄성유체윤활연구", *한국윤활학회지*, Vol.21, No.6, pp.272-277, 2006.
7. Park, T. J. and Kim, K. K., "A Numerical Analysis of the Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts", *Wear*, Vol.136, pp.299-312, 1990.
8. Hamrock, B. J. and Dowson, D., "Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part 3 : Fully Flooded Results", Vol.99, pp.264-276, 1977.