

Surface Texturing에 의한 유압부품의 마찰저감

Surface Texturing in Hydraulic Machine Components for Friction Reduction

박태조^{1*} · 김민규²

Tae Jo Park and Min Gyu Kim

Received: 18 Nov. 2015, Accepted: 18 Feb. 2016

Key Words : Surface Texturing(표면조각), Micro-dimple(미세 딩플), Viscous Friction(점성마찰), Hydraulic Machine Components(유압부품), CFD(전산유체역학)

Abstract: In hydraulic machinery, the hydraulic fluid acts primarily as working fluid and secondarily as a lubricant. Hence, the viscous friction force acting on the sliding components should be reduced to improve the mechanical efficiency. It is now well known that the surface texturing is a useful method for friction reduction. In this study, using a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT, the lubrication characteristics of a surface textured slider bearing under high boundary pressure difference is studied. The streamlines, velocity profiles, pressure distributions, load capacity, friction force and leakage flowrate are highly affected by the film thickness ratio and the textured region. Partial texturing at the inlet region of the inclined slider bearing can reduce both friction force and leakage flowrate than in the untextured case. The present results can be used to improve the lubrication characteristics of hydraulic machinery.

1. 서 론

출력밀도가 높고 자동화가 가능한 등의 많은 장점을 가지고 있어서 다양한 산업분야에서 널리 사용되는 유압기계에서는 작동유체인 유압유가 상대운동면을 위한 윤활제로 사용되는 점이 다른 기계와 대별되는 특징이다¹⁾. 유압 펌프나 액추에이터의 용적효율(Volumetric efficiency)을 향상시키기 위해서는 상대운동 부품사이의 간극(Clearance)의 크기를 줄여야 하지만 이는 점성마찰을 증가시키므로 기계효율은 반대로 감소한다. 따라서, 유압기계의 전효율을 높이기

위해서는 적절한 크기의 간극설정과 함께 점성마찰을 감소시키는 기술이 요구되고 있다. 특히, 점성마찰은 직접적으로 기계효율을 감소시킬 뿐만 아니라 유온을 상승시키므로 점도유지를 위한 냉각장치구동에 따른 동력손실도 초래한다. 저속운전인 경우나 초소형 유압기계에서는 점성마찰에 대한 정확한 예측이 더욱 요구된다²⁾. 이와 같이 유압기계의 효율향상에 저마찰 기술이 필수적으로 적용되어야 함에도 불구하고 이에 대한 연구는 크게 미흡한 실정이다. 이는 일반적인 유압기계에서 점성마찰력의 크기가 유압력에 비하여 상대적으로 아주 작은 관계로 필요성을 크게 인식하지 못한 것과 이의 저감을 위한 제반 기술이 한계에 봉착하였기 때문으로 추정된다.

최근까지 기계의 상대운동 부품사이에서 발생하는 마찰력은 점성유체를 사용하여 유체윤활상태로 유지하는 것이 최선의 저감대책으로 인식되고 있었다. 하지만 10여년 전에 Etsion 교수 그룹³⁻⁴⁾은 윤활면에 미세한 크기의 딩플(Dimple)이나 그루브(Groove) 등을 적절하게 가공하면 마찰력을 크게 감소시킬 수 있다

* Corresponding author: tjpark@gnu.ac.kr

1 School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea

2 Undergraduate School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Gyeongnam 52828, Korea

Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 연구결과를 제시하였다. Surface texturing으로 불리어지는 이 기술은 각종 스러스트 베어링(Thrust bearing), 기계적 시일(Mechanical seal), 내연기관의 피스톤 링(Piston ring) 등에 적용되고 있으며, 최근에는 다양한 딴플사양과 적용조건 등에 대한 연구가 집중적으로 수행되고 있다⁵⁾. 그러나 지금까지의 연구는 윤활면 경계에서의 압력이 낮은 경우가 대부분이기에 차압(Pressure difference)이 크게 작용하는 유압 부품에 관련된 Surface texturing 연구는 다음과 같이 극소수에 불과한 실정이다. Pettersson & Jacobson⁶⁾은 레이디얼 피스톤 모터에서 상당한 정도의 마찰저감이 가능함을, Wang 등⁷⁾은 액시얼 피스톤 모터의 전 효율이 향상됨을 각각 실험으로 확인하였다. Ivantysynova & Baker⁸⁾는 사판식 피스톤 펌프 전체에 대한 수치해석에서 밸브 판(Valve plate)에 물결(Wave)모양으로 Texturing하면 간극의 크기가 증가하고 동력손실을 50% 정도까지 줄일 수 있다고 주장하였지만 Texturing부품에 대한 상세한 해석결과는 제시하지 않았다. Lee & Park⁹⁾은 유막이 평행한 미끄럼 베어링에서 딴플 수와 경계압력의 크기에 따른 윤활 특성을 전산유체역학(Computational fluid dynamics: CFD) 해석 프로그램을 사용하여 해석하였다. 하지만 해석결과를 실제에 그대로 적용하기가 어려운 것은 거의 모든 유압부품은 경사진 형상의 유막으로 분리된 상태로 운전되기 때문이며, 이러한 경우에 대한 해석결과는 아직까지 전무한 실정이다.

본 논문에서는 유압부품에서의 마찰손실을 줄이기 위한 연구의 일환으로 유막이 경사진 Slider 베어링면에 미세 딴플을 가공한 경우의 윤활특성을 CFD 프로그램을 사용하여 조사하고자 한다.

2. 해석 모델 및 방법

상대운동을 하는 유압부품의 간극내에서 유동하는 유압유가 정상상태, 비압축성, 층류상태인 경우에 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 다음의 식(1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

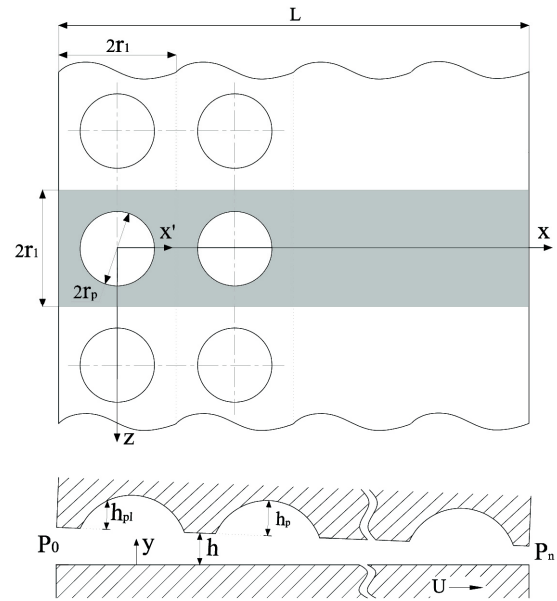


Fig. 1 Schematic of micro-dimpled sliding bearing machine components

Fig. 1은 딴플이 있는 Slider 베어링의 개략적인 형상을 나타낸 그림으로 해석에 사용한 베어링의 길이와 폭은 각각 L 과 $2r_1$ 이며, 반구형인 딴플의 반경은 r_p , 깊이는 h_p 이다. 베어링 입·출구의 간극의 크기인 유막두께가 각각 h_0 와 h_n 인 경우, 임의위치에서의 유막두께 h 는 다음 식으로 표현된다.

$$h(x, z) = h_0 + (h_n - h_0) \frac{x}{L} + h_{pl}(x', z) \quad (3)$$

여기서,

$$h_{pl}(x', z) = \begin{cases} 0 & \sqrt{x'^2 + z^2} > r_p \\ \sqrt{\left(\frac{h_p^2 + r_p^2}{2h_p} \right)^2 - (x'^2 + z^2)} - \frac{r_p^2 - h_p^2}{2h_p} & \sqrt{x'^2 + z^2} \leq r_p \end{cases} \quad (4)$$

이며, x' 은 각 딴플의 중심이 원점인 경우에 x 방향의 국부좌표계이다.

베어링 입·출구에 대한 유막두께비(Film thickness ratio) K 는 다음 식과 같이 정의하였다.

$$K = h_0 / h_n - 1 \quad (5)$$

한편, 베어링의 입구부와 출구부 경계에 작용하는 압력은 P_0 와 P_n 이며, z 방향으로의 양쪽경계에는 다음의 대칭조건을 적용하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad z = \pm r_1 \quad (6)$$

Fig. 2는 크기가 $2r_1 \times 2r_1$ 인 단위 셀(Cell)에 대하여 상용 열·유체해석 CFD 프로그램인 FLUENT¹⁰⁾의 전처리 프로그램인 ICEM CFD를 이용하여 생성한 격자의 예를 나타낸 그림으로 고체벽면 부근과 유막형상이 급격히 변하는 덤플의 가장자리 부근에는 조밀하게 배치하였다. 해석에 사용한 베어링 및 덤플의 사양, 운전조건을 Table 1에 나타내었다. 수치해석에서는 h_n 은 고정하고 h_0 를 변화시켰으며, 벽면에서는 점착(No-slip)조건을 적용하였다. 유압유의 밀도는 962 kg/m^3 이고 점도는 $0.013468 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 으로 이는 ISO VG32 (65°C 기준)에 상당한다.

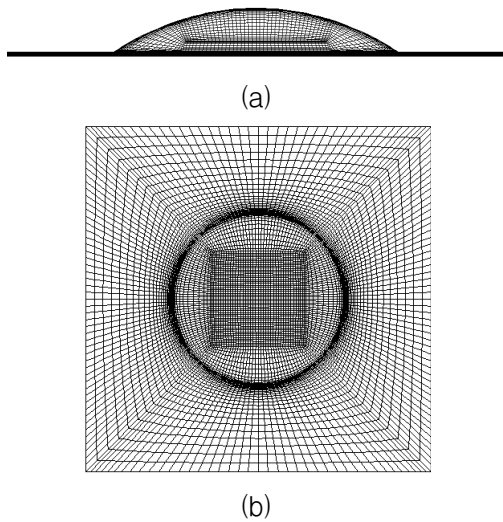


Fig. 2 Example of grid structure for unit cell. (a) x-y plane, (b) x-z plane.

Table 1 Bearing size and operating conditions

	Symbol	Value
Bearing size, μm	L	1,500
	r_1	75
Dimple size & depth, μm	r_p	37.5
	h_p	10
Film thickness, μm	h_0	1, 2, 4
	h_n	1
Pressure B. C., MPa	P_0	2
	P_n	0
Sliding speed, m/s	U	1

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 차압이 작용하고 입·출구의 유막두께가 다른 유압부품면에 미세 덤플을 가공한 경우의 윤활특성을 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 사용하여 조사하였다.

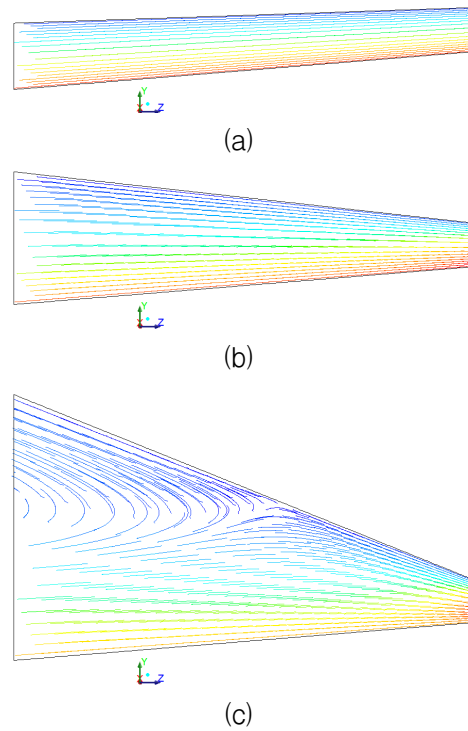


Fig. 3 Streamlines at x-y plane for untextured bearing. K is (a) 0, (b) 1, (c) 3.

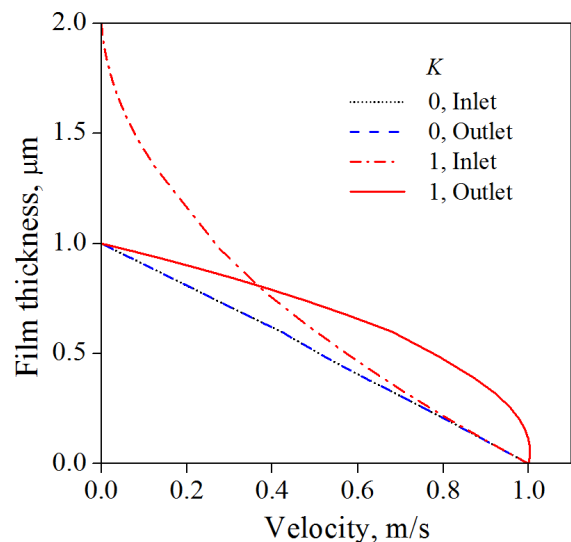


Fig. 4 Comparison of velocity profiles at x-y plane for untextured bearing.

Fig. 3 ~ Fig. 4에는 딩플이 없는 경우에 유막두께비 K 의 변화에 대한 해석결과를 제시하였다. Fig. 3은 베어링 길이방향으로 크게 축소하고 원근법으로 나타낸 x - y 단면에서의 유선분포이다. (a)의 $K=0$ 인 경우에는 입·출구의 유막두께가 동일하므로 유선이 서로 평행하지만 K 가 커지면 출구부로 갈수록 유선의 간격이 좁아지며 (c)에서와 같이 일정크기 이상일 경우에는 역류(Reverse flow)가 발생한다. Fig. 4에는 K 값에 따른 입·출구에서의 y 방향 속도분포를 비교하여 나타내었다. 상당한 크기의 차압이 작용함에도 불구하고 $K=0$ 인 경우에 입구와 출구에서의 속도분포가 일치하고 속도구배가 거의 직선인 것은 베어링의 운동에 의한 Couette 유동이 지배적임을 의미한다. 이와 달리 $K=1$ 인 경우에 입·출구의 속도분포가 아주 크게 다른 것은 유막내에서 상당한 크기의 유체압력(Hydrodynamic pressure)이 발생하기 때문이다. 즉, 유막의 켜기작용(Wedge action)으로 간극내에서 발생한

압력에 의한 Poiseuille 유동이 Couette 유동에 상쇄 혹은 추가되어 입구부에서는 속도가 감소하는 반면에 출구부에서는 증가한다¹¹⁾. 이상의 결과에서 입구부 유막두께의 아주 작은 변화가 베어링의 윤활특성에 큰 영향을 미칠 것으로 쉽게 예상된다.

Fig. 5에는 입구부터 길이의 절반에 부분적으로 Texturing한 경우(딩플이 5개), 단위 셀에 대한 x - y 단면과 5번째 딩플 전후의 x - z 단면에서의 유선분포를 서로 다른 K 에 대하여 비교하였다. 딩플내에서 x - y 단면의 와류(Vortex) 형상에 미치는 K 의 영향은 미미하지만 x - z 단면의 유선분포에는 아주 크게 나타났다. 특히, 베어링이 x 방향으로 운동함에에도 불구하고 K 가 커질수록 딩플 주변에서는 z 방향유동이 급격하게 증가하였으며, 이러한 경우에는 점성전단으로 인한 발열도 증가할 것으로 예상된다. Fig. 6에는 딩플유무와 Fig. 5 (a) & (b)와 같이 유막두께비에 따른 y 방향의 속도분포를 비교한 것으로 딩플의 중심에서는 와류로 인하여 상당한 크기의 역류가 발생하였다. 따라서 딩플이 존재하면 속도구배는 더욱 작아지므로 마찰력은 크게 감소할 것으로 예측된다.

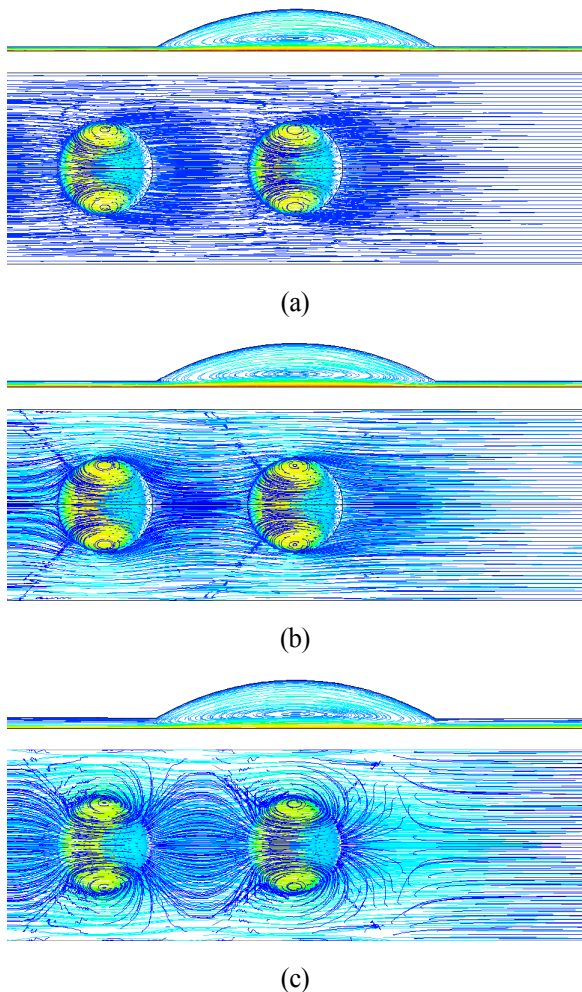


Fig. 5 Streamlines for partially textured bearing. K is (a) 0, (b) 1, (c) 3.

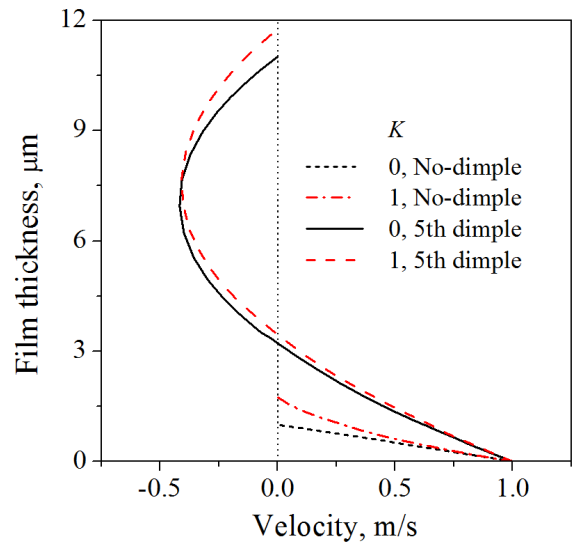
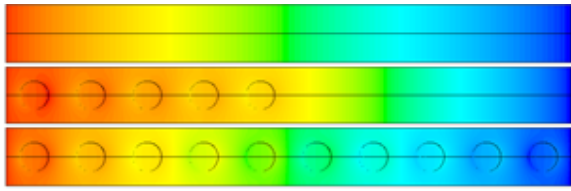
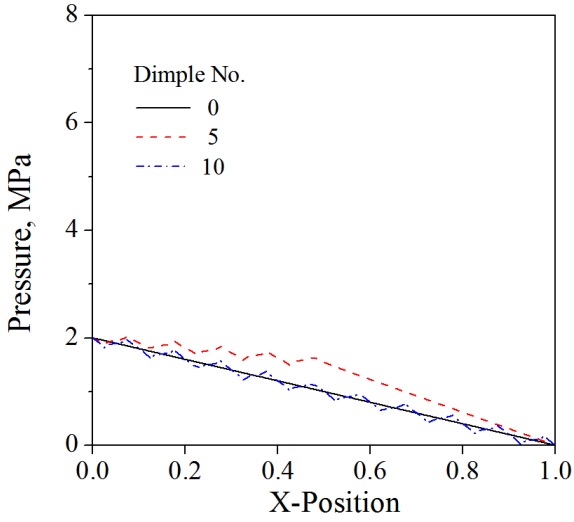


Fig. 6 Comparison of velocity profiles at x - y plane.

Fig. 7 ~ Fig. 9에는 K 의 크기에 따른 x - z 단면과 x - y 단면에서의 압력분포를 순차적으로 나타내었다. 여기서, 각 그림의 (a)는 각각의 최대압력으로 무차원화하고 색으로 구별(붉을수록 고압)한 결과로 딩플 수는 위에서부터 0개, 5개, 10개(Full texturing)이며, (b)에서 X 는 길이방향 무차원 위치로 $X = x/L + 0.5$ 이다. $K=0$ 인 경우에 입구부에만 딩플을 가공하면 동압이 발생하므로 추가적인 하중지지가 가능하지만 Full

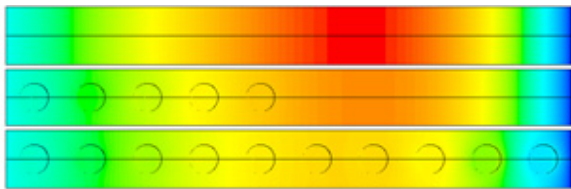


(a)

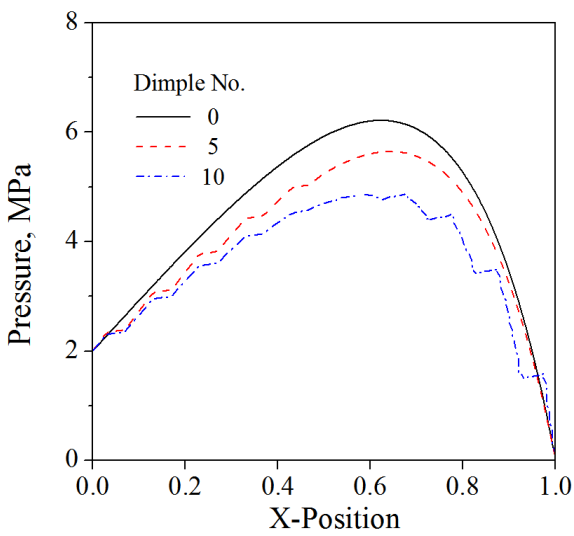


(b)

Fig. 7 Pressure distribution for $K=0$. (a) x-z plane, (b) x-y plane.



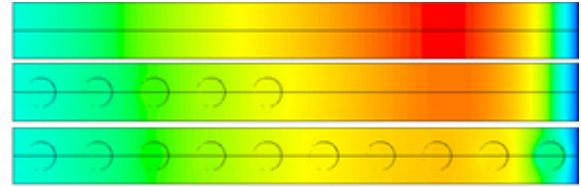
(a)



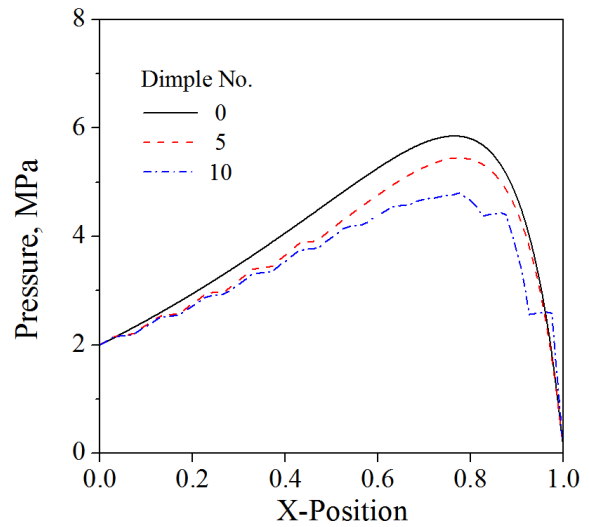
(b)

Fig. 8 Pressure distribution for $K=1$. (a) x-z plane, (b) x-y plane.

texturing하면 딤플이 없는 경우와 평균적인 압력분포가 거의 동일하였다^{2,9,12}. 그러나 $K>0$ 인 경우에는 딤플이 베어링 내에서 유체압력을 발생시키는 유막의 쉐기작용을 항상 상쇄시킨다. 따라서 발생압력은 딤플이 없는 경우보다 낮아지며 이러한 경향은 딤플이 출구에 가깝게 위치할수록 한층 증가한다.



(a)



(b)

Fig. 9 Pressure distribution for $K=3$. (a) x-z plane, (b) x-y plane.

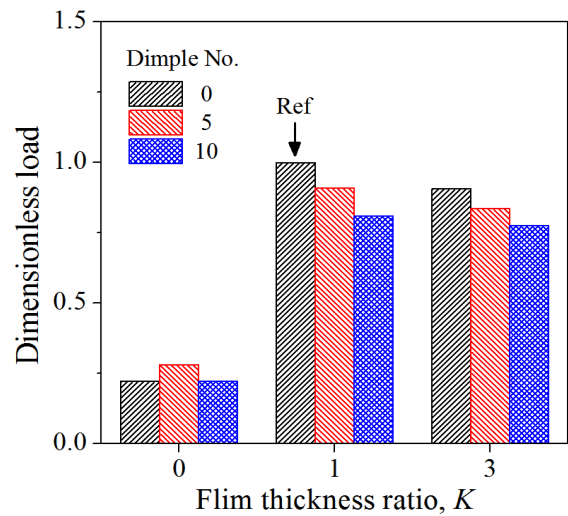


Fig. 10 Variation of dimensionless load with film thickness ratio.

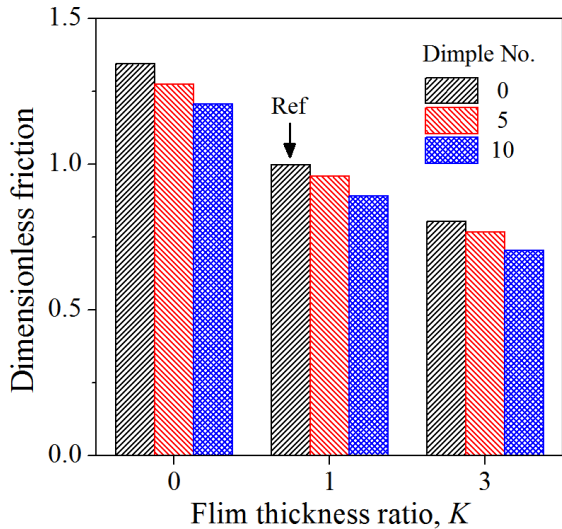


Fig. 11 Variation of dimensionless friction force with film thickness ratio.

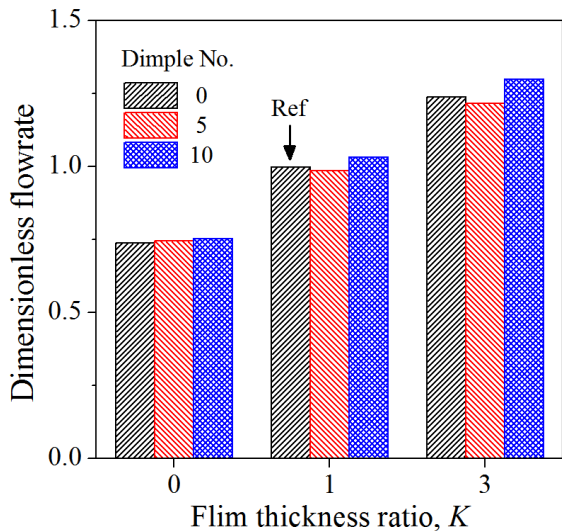


Fig. 12 Variation of dimensionless leakage with film thickness ratio.

Fig. 10 ~ Fig. 12에는 유막두께비 K 와 딴플 수에 따른 지지하중, 마찰력 및 누설유량의 변화를 $K=1$ 이고 딴플이 없는 경우의 결과로 무차원화하여 나타내었다. 지지하중은 Fig. 9에서 쉽게 알 수 있는 것과 같이 $K=0$ 보다 $K>0$ 인 경우에 크게 증가하지만 K 가 특정 크기 이상에서는 도리어 감소하며¹¹⁾, $K>0$ 인 경우에는 출구측으로 딴플이 많아질수록 더욱 감소한다. 딴플 수가 많고 K 가 클수록 윤활면에 작용하는 마찰력이 감소하는 반면에 간극을 통하는 누설유량이 증가하는 것은 평균유막두께의 증가와 함께 속도 구배나 압력차이가 감소하기 때문이다. $K>0$ 에서 부분적으로 Texturing한 경우의 누설유량이 딴플이 없

는 경우보다 작은 것은 출구측으로 상당한 길이에 걸쳐서 유막두께가 동일한 반면에 베어링내의 발생 압력은 크게 낮기 때문인 것으로 이해된다.

유압 피스톤 펌프나 모터의 실린더 블록과 밸브 판 사이에서와 같이 대부분의 유압부품은 경사진 유막으로 서로 분리되어 미끄럼 운동하며 경계면에는 아주 높은 차압이 작용한다. 이러한 경우에 부분적으로 Texturing하면 점성마찰력과 누설량을 감소시킬 수 있다는 수치해석결과를 본 논문에서 제시하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 유압부품의 상대운동면에서 발생하는 점성마찰손실을 저감하기 위하여 유막이 경사진 Slider 베어링면에 미세 딴플로 Surface texturing한 경우의 윤활특성을 상용 CFD 프로그램을 사용하여 수치해석하였다. 베어링 입·출구의 유막두께비, 딴플의 유무 및 Texturing 정도에 따른 유선, 속도 및 압력 분포와 함께 지지하중, 마찰력 및 누설유량의 변화를 상세하게 조사하였다. 유막이 경사진 유압부품면에 Texturing하면 마찰력을 줄일 수 있지만 지지하중도 감소하였다. 특히, 베어링의 입구부에만 부분적으로 Texturing하면 마찰력과 함께 누설유량도 줄일 수가 있으므로 가장 효과적이다. 따라서 본 논문의 해석 결과는 미끄럼 운동하는 각종 유압부품의 윤활특성향상에 사용될 수 있을 것으로 기대되며, 다양한 운전 조건에 대한 추가연구가 요구된다.

References

- 1) Esposito, A., Fluid Power with Application, 7th ed., Prentice Hall, New Jersey, 2009.
- 2) Hong, Y. S. *et al.*, "Improvement of the Low-speed Friction Characteristics of a Bent-Axis Type Hydraulic Piston Pump," J. of Drive and Control, Vol.1, No.3, pp.63-69, 2004.
- 3) Brizmer, V., Kligerman Y. and Etsion, I., "A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing," Tribology Trans., Vol.46, pp.397-403, 2003.
- 4) Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing," J. of Tribology, Vol.127, pp.248-253, 2005.
- 5) Ibata, T., Uddin, M. S. and Chowdhury, M. A. K., "Recent Development on Surface Texturing in Enhancing Tribological Performance of Bearing

- Sliders," *Surface Coating Technology*, Vol.272, pp.102-120, 2015.
- 6) Pettersson, U. and Jacobson, S., "Textured Surfaces for Improved Lubrication at High Pressure and Low Sliding Speed of Roller/Piston in Hydraulic Motors," *Tribology Int.*, Vol.40, pp.355-359, 2007.
- 7) Wang, Z., Gu, L. and Li, L., "Experimental Studies on the Overall Efficiency Performance of Axial Piston Motor with a Laser Surface Textured Valve Plate," *J. of Engineering Manufacture*, Vol.227, No.7, pp.1049-1056, 2013.
- 8) Ivantysynova, M. and Baker, J. "Power Loss in the Lubricating Gap between Cylinder Block and Valve Plate of Swash Plate Type Axial Piston Machines," *Int. J. of Fluid Power*, Vol.10, No.2, pp.29-43, 2009.
- 9) Lee, J. O. and Park, T. J., "Lubrication Characteristics of Surface Textured Hydraulic Machine Components," *J. of Korean Soc. Fluid Power Constr. Equip.*, Vol.9, No.4, pp.26-31, 2012.
- 10) FLUENT, FLUENT 14.0 Manual, 2011.
- 11) Cameron, A. and Ettles, C. M. Mc., *Basic Lubrication Theory*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1981.
- 12) Park, T. J., "Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 3 - Effect of Number of Dimples," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.27, No.6, pp.302-307, 2011.