

Laser Texturing한 평행 스러스트 베어링의 윤활특성 : 제3보 - 딴플 수의 영향

박태조[†]

경상대학교 기계공학부 · 공학연구원

Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 3 - Effect of Number of Dimples

Tae-Jo Park[†]

School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National University
(Received August 20, 2011; Revised October 25, 2011; Accepted October 27, 2011)

Abstract – Laser surface texturing (LST) methods are widely applied recently to reduce friction and improve reliability of machine components such as thrust bearings, mechanical face seals and piston rings, etc. In this paper, numerical analysis is carried out to investigate the effect of number of dimples on the lubrication characteristics of parallel thrust bearing using a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT. Pressure distributions of present analysis are physically consistent than those obtained from numerical analysis of Reynolds equation. The overall lubrication characteristics are highly affected by number of dimples and their locations. The results can be use in design of optimum dimple characteristics to improve thrust bearing performance and further researches are required.

Keywords – thrust bearing(스러스트 베어링), laser surface texturing(레이저 표면조각 : LST), micro-dimple(미세딴플), CFD(전산유체역학), FLUENT

1. 서 론

경계윤활(Boundary lubrication)에 가까운 윤활상태로 운전되는 기계요소인 기계적 시일(Mechanical seal), 피스톤 링(Piston ring) 등의 윤활면에 미세한 크기의 포켓(Pocket)이나 딴플(Dimple) 등을 가공하여 마찰을 줄임과 동시에 수명을 향상시키기 위한 표면조각(Surface texturing)에 관련된 연구가 지난 10여년 사이에 급격히 증가하고 있다. 특히, 최근의 고유가와 지구 온난화 문제를 타개하기 위한 핵심기술중의 하나로 이에 대한 연구가 주목받고 있는 것은 기계적 손실의 상당부분을 차지하는 윤활면에서의 마찰저감에 의한 효율 향상 뿐만 아니라 기계의 신뢰성도 함께 향상시킬 수

있기 때문이다.

지금까지 윤활면에 미세표면조각을 생성하기 위하여 다양한 가공방법들이 제시되었지만 현재에는 Z Etsion[1-3] 등에 의해서 효용성을 입증된 LST(Laser surface texturing)가 가장 널리 적용되고 있다. Fig.1은 LST 방법에 의한 직경이 100 μ m 정도인 반구형의 미세 딴플이 등간격으로 가공된 미끄럼 베어링면의 예를 나타낸 그림이다[1]. 그림에서 미세 딴플의 깊이는 10 μ m 정도로 이는 딴플이 없는 부분에서의 유막두께에 비하여 아주 크며, 딴플내에서는 유막두께가 급격하게 커지므로 운전조건에 따라서는 캐비테이션(Cavitation)이 발생할 수 있다.

지금까지의 표면조각으로 처리한 윤활면의 트라이볼로지 특성에 대한 연구는 거의 대부분 실험적으로 수행되고 있다. 따라서, 이론해석결과는 상대적으로 소수

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

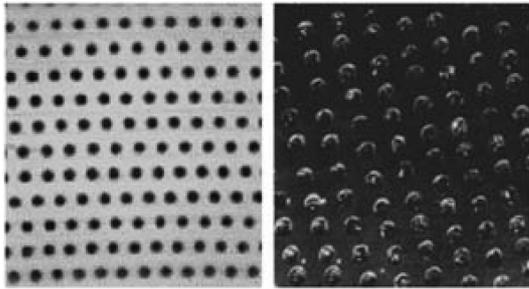


Fig. 1. Example of laser surface textured bearing surfaces[1].

에 불과하여 표면조직에 관련된 변수들이 미끄럼 베어링의 트라이볼로지 특성에 미치는 영향에 대한 정보는 아주 빈약한 실정이다. Etsion 등[2,3]은 레이놀즈 방정식을 이용한 수치해석에서 캐비테이션이 발생하는 영역에서의 압력을 대기압이 되도록 처리하였지만 이는 실제와 다소 차이가 있는 조건이다. 1차원 레이놀즈 방정식의 해석적인 결과에서 Olver 등[4]은 1개의 사각형 미세 포켓이 있는 평행 패드 베어링에서 캐비테이션 발생으로 하중을 지지할 수 있음을 밝혔으며, Fowell 등[5]은 포켓이 다수인 경우에 지지하중과 마찰력에 미치는 설계변수들의 영향을 조사하였다. 하지만 덩플 부근에서는 레이놀즈 방정식의 유도에 사용된 가정과 실제조건과는 상당한 차이가 있으므로 레이놀즈 방정식을 사용한 해석결과는 정확성이 떨어질 것으로 예상된다. 따라서, 미세 덩플이 있는 미끄럼 베어링에 대한 정확한 유효해석을 위해서는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식 뿐만 아니라 경우에 따라서는 상태방정식까지 해석해야 된다. 이러한 경우에 전산유체역학(Computational fluid dynamics : CFD)을 이용한 해석이 보다 현실적이기에 덩플보다 상대적으로 큰 포켓이나 그루브(Groove)가 있는 각종 베어링의 유효해석에 이미 적용되고 있다[6-10]. 본 논문의 저자[11,12]는 CFD 해석방법을 사용하여 미세 덩플의 깊이와 위치가 평행 스러스트 베어링의 유효특성에 미치는 영향을 성공적으로 해석하였지만 덩플에 관련된 설계변수들의 영향에 대한 연구결과는 아직까지 크게 부족한 실정이다.

본 논문에서는 기존의 연구에 이어서 다수의 미세 덩플이 존재하는 평행 스러스트 베어링에서 덩플의 수와 위치가 압력분포, 지지하중, 마찰력 및 누설유량 등의 유효특성에 미치는 영향을 상용 열유체해석 CFD 프로그램인

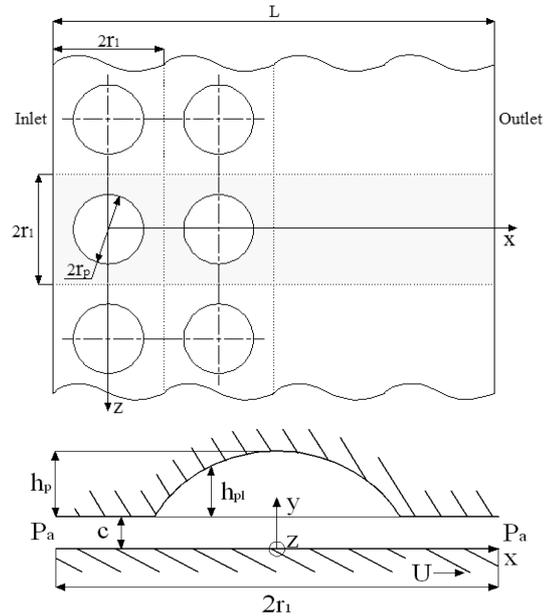


Fig. 2. Schematic of micro-dimpled thrust bearing.

FLUENT[13]를 사용하여 상세하게 조사하고자 한다.

2. 해석방법

본 논문에서는 참고문헌[11-12]와 동일한 해석방법을 사용하여 미세 덩플이 있는 평행 스러스트 베어링의 유효특성을 해석하고자 한다. 정상상태, 층류유동에 대한 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 다음의 식 (1) 및 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{2\mu \partial u_i}{3 \partial x_j} \right) \quad (1)$$

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

Fig. 2는 본 논문에서 해석하고자 하는 다수의 반구형 덩플이 있는 스러스트 베어링의 개략적인 형상을 나타낸 그림이다. 여기서, 베어링의 길이와 폭은 L 과 $2r_1$ 이고, 덩플의 반경과 최대깊이는 각각 r_p 와 h_p 이다. 유막두께는 다음 식으로 표현된다[3].

$$h(x,y) = \begin{cases} c + h_p(x,y) & \sqrt{x^2 + z^2} \leq r_p \\ c & \sqrt{x^2 + z^2} > r_p \end{cases} \quad (3)$$



Fig. 3. Example of grid system used in numerical analysis.

Table 1. Bearing size and operating conditions

	Symbol	Value
Bearing & Dimple Size, μm	L	1,100
	r_p	50
	r_i	55
	h_p	3
	c	1
Pressure Condition, kPa_{abs}	P_a, P_c	100, 50
Sliding Speed, m/s	U	1

Table 2. Oil properties

	Oil
Density, kg/m^3	962
Viscosity, kg/ms	0.013468

여기서,

$$h_p(x, z) = \sqrt{\left(\frac{h_p^2 + r_p^2}{2h_p}\right)^2 + (x^2 + z^2)} - \frac{h_p^2 + r_p^2}{2h_p} \quad (4)$$

베어링의 입출구부에는 대기압 P_a 가, 캐비테이션 발생영역에서는 윤활유의 증기압 P_g 가 각각 작용한다. 한편, Z방향의 양측경계에서는 다음의 대칭조건을 적용한다.

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad z = \pm r_i \quad (5)$$

Fig. 3은 CFD 해석을 위한 X-Y방향 격자계의 예를 나타낸 그림으로 (a)는 딤플이 10개인 경우의 전체 격자, (b)는 하나의 딤플을 확대한 경우의 격자를 각각 나타내었다. 이때, 고체면에 인접하거나 유막이 급격하게 변하는 부분에서는 격자를 조밀하게 배치하였다. 참고로 딤플이 10개인 경우에 대한 격자의 수는 대략 100만개 정도이다. 한편, 윤활유와 접하는 모든 벽면에는 No-slip 조건을 만족시켰다. 해석에 사용한 평행 스러스트 베어링과 딤플의 사양 및 해석조건은 Table 1

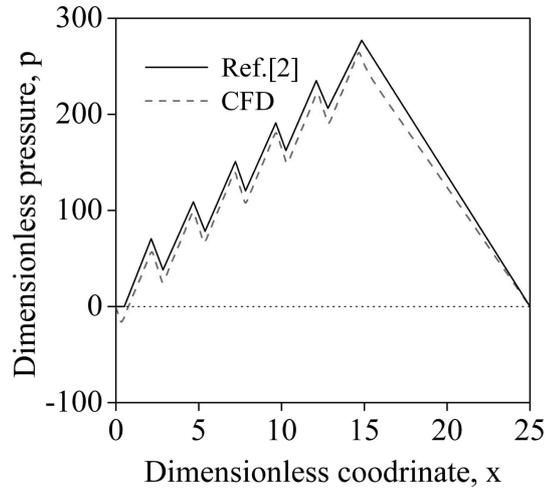


Fig. 4. Comparison of pressure distribution for partial texturing (6 Dimples).

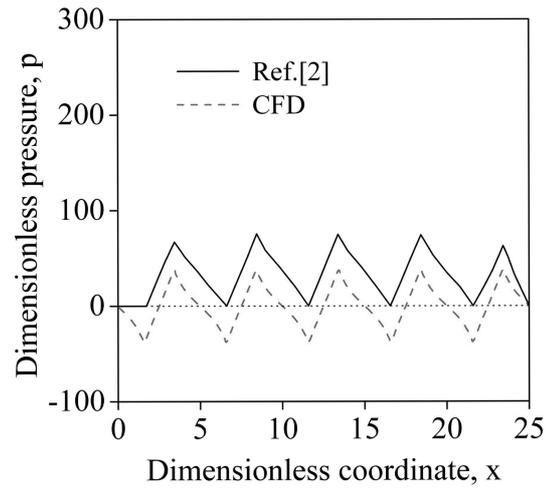


Fig. 5. Comparison of pressure distribution for full texturing (10 Dimples).

에, 윤활유의 주요 물성자료는 Table 2에 각각 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4와 Fig. 5에는 본 논문에서 사용한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 베어링 입구로부터 전길이의 60%(6개)와 전길이에 걸쳐서(10개) 딤플이 있는 경우의 압력분포를 Brizmer 등[2]의 결과와 비교하여 나

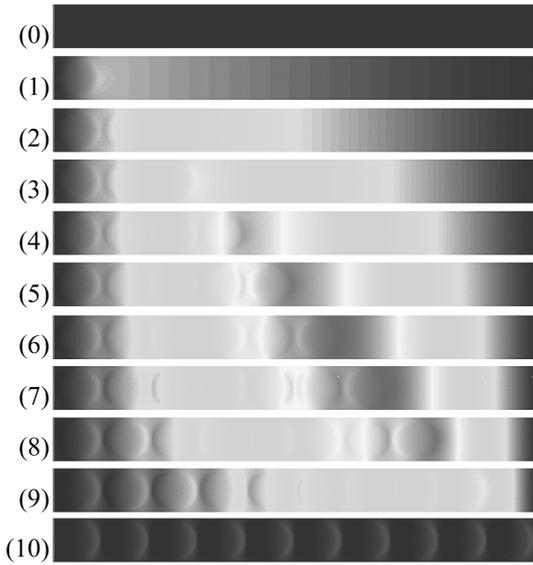


Fig. 6. Pressure distribution with dimple number.

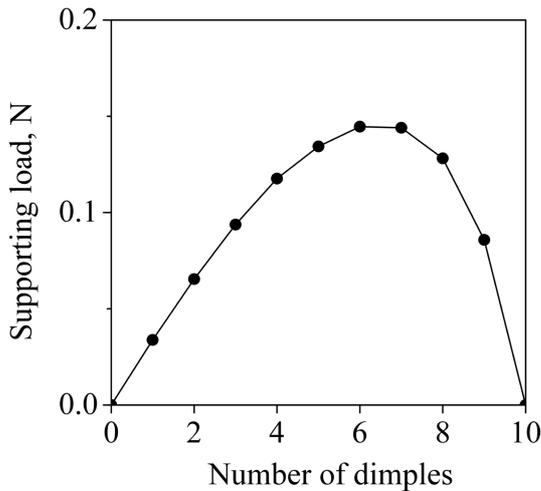


Fig. 7. Variation of supporting load with dimple number.

타내었다. 여기서, 참고문헌[2]의 결과는 레이놀즈 방정식을 사용한 수치해석에서 음(-)압이 발생하는 영역의 압력은 모두 0(대기압)으로 처리한 반면에 본 논문의 CFD 해석에서는 윤활유의 증기압 P_v 까지는 음압을 허용함과 동시에 상태방정식까지 해석하였다. 전체적인 압력분포는 서로 비슷한 경향이지만 본 논문의 방법으로 구한 압력이 상대적으로 낮게 분포되었다. 결과적으로 이러한 압력분포의 차이는 베어링의 지지하

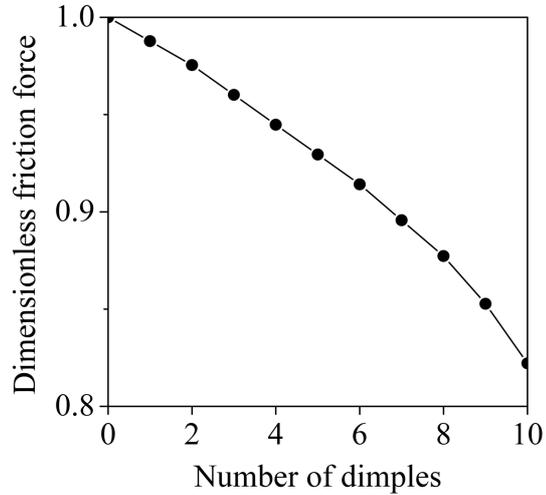


Fig. 8. Variation of dimensionless friction force with dimple number.

중의 크기에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 특히, Fig. 5에서 참고문헌[2]의 결과는 상당한 크기의 하중 지지도 가능하다는 것을 의미하지만 이는 캐비테이션 압력을 정확하게 처리하지 못한 것에 기인한 결과일 뿐이다. 따라서 미세 디ンプル이 있는 베어링의 윤활해석 결과는 CFD 해석방법을 사용한 것이 레이놀즈 방정식을 수치해석한 것보다 정확할 것으로 생각된다.

Fig. 6은 베어링 입구부에서부터 디ンプル이 순차적으로 추가되는 경우의 압력분포를 나타낸 그림으로 왼쪽 괄호안의 숫자는 디ンプル의 수를 의미한다. 디ンプル이 없는 평행 스러스트 베어링인 경우에는 압력(Hydrodynamic pressure)이 발생하지 않지만 디ンプル이 있으면 베어링의 운동에 따른 Couette 유동과 디ンプル로 인한 Poiseuille 유동에 의해서 상당한 크기의 압력이 발생할 수 있다 [11-12]. 디ンプル의 수와 배치위치에 따라서 압력분포는 다음과 같이 아주 크게 변화하였다. 즉, 디ンプル이 추가될 수록 압력은 점차 증가하여 6개인 경우(Fig. 4참조)에 최대압력이 발생한 후에는 급격히 감소하였다. 전길이에 걸쳐서 디ンプル이 있는 경우에는 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 상대적으로 아주 낮은 압력이 발생하였다. 이상의 결과, 입구부측에 디ンプル이 추가될 경우에는 간극을 통하는 유량이 점차 증가하고[4,5] 이로 인하여 높은 압력이 발생하는 반면에 디ンプル이 출구부에 가깝게 위치할수록 윤활유는 쉽게 누설되므로 발생압력이 낮아지는 것을 알 수 있다.

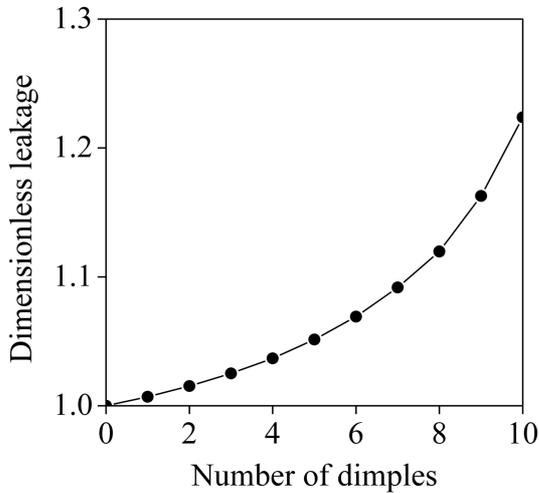


Fig. 9. Variation of dimensionless leakage flowrate with dimple number.

Fig. 7 ~ Fig. 9에는 딩플의 수에 따른 베어링의 지지하중, 윤활면에 작용하는 마찰력 및 간극을 통과하는 누설유량(이론급유량)의 변화를 순서대로 나타내었다. 여기서, Fig. 8과 Fig. 9는 딩플이 없는 경우의 값으로 각각을 무차원화한 결과이다. Fig. 6에서 고찰한 바와 같이 딩플을 적절하게 설계하면 평행 스톱스트 베어링도 하중을 지지할 수 있다. 사용한 해석조건에서는 딩플이 추가될수록 지지하중은 점차 증가하여 6개인 경우에 최대가 되었다. 여기에 딩플이 추가될수록 지지하중의 크기는 급격히 감소하며, 전길이에 딩플이 있는 경우에는 하중지지가 어렵다. 한편, 딩플의 수가 많아질수록 마찰력은 거의 직선적으로 감소하는 반면에 누설유량이 급격하게 증가하는 것은 상대적으로 베어링에서 유막의 크기가 증가하고 속도구배가 작아지는 것과 동일한 효과이기 때문이다. 따라서, 딩플의 수와 이들의 배치위치는 평행 스톱스트 베어링의 윤활특성에 아주 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 상용 열유체해석 CFD 프로그램인 FLUENT를 사용하여 미세 딩플의 수가 평행 스톱스트 베어링의 윤활특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이 결과, CFD 해석방법을 사용한 본 논문의 결과는 레이놀즈 방정식을 수치해석한 기존의 결과보다 물리적으로 타당하였으며 딩플의 수와 이의 배치위치에 따라서 윤

활특성은 아주 크게 변화하였다. 딩플은 윤활면에 작용하는 마찰력을 크게 감소시킬 뿐만 아니라 윤활면이 서로 평행한 경우에도 하중을 지지할 수 있게 작용하였다. 특히, 지지하중이 최대인 딩플의 수와 위치가 존재하였다. 따라서, CFD 해석에 의한 본 논문의 해석 방법은 미세 딩플을 설계한 각종 스톱스트 베어링의 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 예상되며, 다양한 설계변수에 대한 집중적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 248-253, 2005.
2. Brizmer, V., Kligerman, Y. and Etsion, I., "A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing," *Tribology Trans.*, Vol. 46, pp. 397-403, 2003.
3. Feldman, Y., Kligerman, Y., Etsion, I. and Haber, S., "The Validity of the Reynolds Equation in Modeling Hydrostatic Effects In Gas Lubricated Textured Parallel Surfaces," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 128, pp. 345-250, 2006.
4. Olver, A. V., Fowell, M. T., Spikes, H. A. and Pegg, I. G., "Inlet Suction', a Load Support Mechanism in Non-convergent, Pocketed, Hydrodynamic Bearings," *Proc. IMechE, J. of Eng. Tribology*, Vol. 220, pp. 105-108, 2006.
5. Fowell, M., Olver, A. V., Gosman, A. D., Spikes, H. A. and Pegg, I., "Entrainment and Inlet Suction : Two Mechanisms of Hydrodynamic Lubrication in Textured Bearings," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 129, pp. 221-230, 2007.
6. Dzodzo, M., Braun, M. J. and Hendricks, R. C., "Pressure and Flow Characteristics in a Shallow Hydrostatic Pocket with Rounded Pocket/Land Joints," *Tribology Int.*, Vol. 29, pp. 69-76, 1996.
7. Chen, P. Y. P. and Hahn, E. J., "Use of Computational Fluid Dynamics in Hydrodynamic Lubrication," *Proc. IMechE*, Vol. 212, pp. 427-436, 1998.
8. Helene, M., Arghir, M. and Frene, J., "Numerical Study of the Pressure Pattern in a Two-Dimensional Hybrid Journal Bearing Recess, Laminar, and Turbulent Flow Results," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 125, pp. 283-290, 2003.

9. Brajdic-Mitidieri, P., Gosman, A. D., Ioannides, E. and Spikes, H. A., "CFD Analysis of a Low Friction Pocketed Pad Bearing," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 803-812, 2005.
10. 박태조, 황윤건, "Groove 단면형상에 따른 유압 Spool Valve의 윤활해석," *한국윤활학회지*, 제25권, 제1호, pp.13-19, 2009.
11. 박태조, 황윤건, "Laser Texturing한 평행 스러스트 베어링의 윤활특성 : 제1보 - 딩플깊이의 영향," *한국윤활학회지*, 제25권, 제5호, pp. 305-310, 2009.
12. 박태조, 황윤건, "Laser Texturing한 평행 스러스트 베어링의 윤활특성 : 제2보 - 딩플 위치의 영향," *한국윤활학회지*, 제26권, 제1호, pp. 1-6, 2010.
13. FLUENT, "FLUENT 6.0 Manual," 2002.