

Laser Texturing한 평행 스러스트 베어링의 윤활특성 : 제1보 - 딴플깊이의 영향

박태조[†] · 황윤건*

경상대학교 기계항공공학부 · 공학연구원, *경상대학교 대학원

Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 1 - Effect of Dimple Depth

Tae-Jo Park[†] and Yun-Geon Hwang*

School of Mechanical & Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University

**Graduate School, Dept. of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University*

(Received June 25, 2009; Revised August 17, 2009; Accepted August 25, 2009)

Abstract – Laser surface texturing (LST) methods are applied recently to generate micro-dimples in machine components having parallel sliding surfaces such as thrust bearings, mechanical face seals and piston rings, etc. And it is experimentally reported by several researchers that the micro-dimpled bearing surfaces can reduce friction force. Until now, however, theoretical results for various dimple parameters are not fully presented. In this paper, a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT is used to investigate the effect of dimple depth on the lubrication characteristics of parallel thrust bearing. The results show that the pressure, velocity and density distributions within dimples are highly affected by dimple depths and cavitation conditions. Adoption of micro-dimple on the bearing surface can reduce the friction force highly and its levels are affected by dimple depth. The numerical methods and results can be use in design of optimum dimple characteristics to improve thrust bearing performance.

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

1. 서 론

최근 10여년 동안에 스러스트 베어링(Thrust bearing), 메카니컬 시일(Mechanical seal), 피스톤 링(Piston ring) 등과 같은 미끄럼운동을 하는 기계요소의 상대운동면에 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 미세한 포켓(Pocket), 딴플(Dimple) 등의 다양한 크기와 형상의 표면조직(Surface texturing)을 가공하여 트라이볼로지 특성을 향상시키기 위한 연구가 집중적으로 시도되고 있다. 지금까지의 실험결과, 표면이 매끈한 경우에 비하여 표면조직으로 가공한 경우의 마찰계수가 낮을 뿐만 아니라 마멸발생도

감소하는 것으로 대부분 발표되고 있다. 특히, Etsion 등[1-3]이 주도적으로 시도하고 있는 레이저를 사용한 표면조직(Laser surface texturing : LST) 가공법은 다른 가공법에 비하여 여러 면에서 유리한 점이 있기 때문에 최근에 가장 널리 적용되고 있다.

지금까지의 표면조직으로 가공된 기계요소면에 대한 트라이볼로지 특성은 거의 실험적으로 조사되었으며, 이론적인 윤활해석결과는 아주 미미한 실정이다. 참고로 Olver 등[4]은 평행한 패드 베어링에 사각형의 미세 포켓을 설계하면 포켓내에서의 캐비테이션에 의해서 발생하는 입구부 흡입(Inlet suction)의 작용으로 하중지지 가능성이 높다는 결과를 발표하였다. Fowell 등[5]은 다수의

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

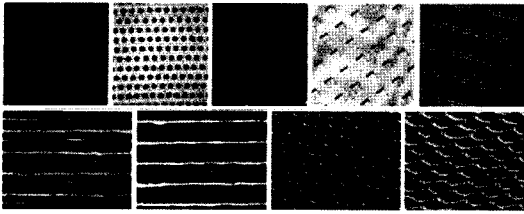


Fig. 1. Example of surface textured various bearing surfaces.

포켓이 있는 경우에 1차원 레이놀즈 방정식과 단순한 캐비테이션 조건을 적용하여 하중지지능력과 마찰력 감소에 미치는 설계변수들의 영향을 조사하였다.

LST 방법인 경우의 미세 덩플의 깊이는 대략 10 μm 정도로 아주 작지만 이는 덩플이 없는 베어링면에서의 유막두께에 비해서는 아주 크다. 또한, 덩플부에서는 유막두께가 급격하게 커지므로 운전조건에 따라서는 캐비테이션(Cavitation)이 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 LST 방법으로 표면가공한 베어링에는 레이놀즈 방정식의 유도에 사용한 가정을 적용하기에는 상당한 무리가 있으므로 정확한 유회해석을 위해서는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 그대로 해석하는 것이 타당하다. 만일, 캐비테이션이 발생할 경우에는 유회유에 대한 상태방정식까지 고려해야 된다. 따라서, 이러한 경우에는 전산유체역학(Computational fluid dynamics : CFD) 해석방법을 사용하는 것이 보다 현실적이지만 이에 대한 연구결과는 아직 제시되지 않고 있다. 참고로 포켓이 있는 정압베어링, 하이브리드(Hybrid) 베어링, 스푸울 밸브 등의 유회특성해석에 CFD해석이 다수 적용되었다[6-11]. 특히, Brajdic-Mitidieri 등[9]은 포켓이 있는 패드 베어링을 해석한 결과, 포켓의 존재는 마찰계수를 크게 감소시킨다는 결과를 제시하였다. 박태조 등[10]은 포켓이 있는 무한장 Slider bearing에서 캐비테이션 발생을 고려한 결과, 참고문헌[4-5]에서 제시한 입구부 흡입에 의한 해석방법보다 유회특성을 정확하게 예측하였다. 본 논문의 저자[11]는 유압 스푸울 밸브의 그루브(Groove) 내에서의 유동특성이 이의 깊이에 따라서 크게 됨을 밝혔다. 따라서 평행 스러스트 베어링에서도 미세 덩플의 깊이가 유회특성에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 논문에서는 LST 방법으로 미세 덩플을 베어링면에 가공한 평행 스러스트 베어링의 유회특성을 상용 열유체해석 CFD 프로그램인 FLUENT[12]를 사용하여 해석하고자 한다. 이때, 덩플의 깊이와 캐비테이션 조

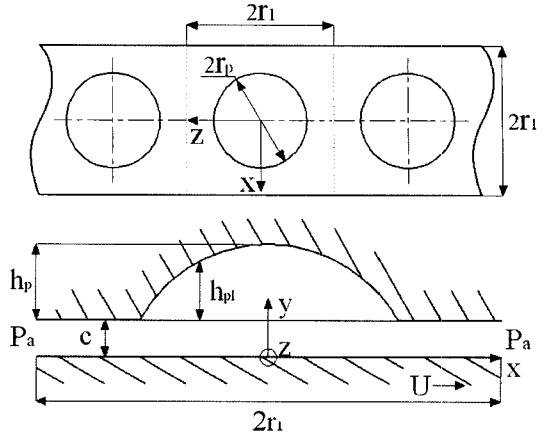


Fig. 2. Schematic of micro-dimpled thrust bearing.

건의 적용여부에 따른 덩플내에서의 압력, 속도 및 유회유의 밀도 분포와 함께 마찰력의 변화를 상세하게 조사하고자 한다.

2. 해석방법

본 논문에서는 CFD 해석방법을 사용하여 평행 스러스트 베어링에 미세 덩플이 있는 경우의 유회특성을 정확하게 조사하고자 한다. 이때, 정상상태, 층류유동에 대한 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 각각 다음의 식(1)~식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

Fig. 2는 Fig. 1에서 해석하고자 하는 덩플이 있는 스러스트 베어링의 형상을 개략적으로 나타낸 그림으로 이는 참고문헌[3]과 동일하다. 여기서, 해석대상인 베어링의 전체폭은 2r1으로, 반경과 깊이가 각각 rp와 hp인 덩플이 중앙부에 설계되어 있으며 유막두께는 다음의 식(3)으로 표현된다.

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

여기서,

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



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

Table 1. Bearing size and operating conditions

	Symbol	Value
Bearing size, μm	r_p	50
	r_i	55
	c	1
	h_p	0~20
Pressure condition, kPa_{abs}	P_a	100
	P_c	50
Sliding speed, m/s	U	1

Table 2. Oil properties

	Oil	Oil-Vapor
Density, kg/m^3	962	0.02556
Viscosity, $\text{kg/m}\cdot\text{s}$	0.013468	1.256×10^{-5}

베어링 입출구부 양단에는 대기압 P_a 가, 딥플내의 캐비테이션이 발생하는 영역에서는 윤활유의 증기압 P_c 가 각각 작용한다. 한편, 계산영역의 경계에는 다음 식으로 정의되는 대칭조건을 적용하였다.

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

한편, 윤활유와 접하는 모든 벽면에는 No-slip 조건을 만족시켰다.

Fig. 3은 FLUENT의 전처리 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 구성된 딥플부 부근에서의 격자계의 예를 나타낸 그림으로 고체면에 인접한 영역과 유막이 급격하게 변하는 부분에서는 격자를 상대적으로 조밀하게 배치하였다. 해석에 사용한 전체격자 수는 포켓의 깊이가 $10 \mu\text{m}$ 인 경우에 150,000개 정도이다.

해석에 사용한 평행 스톱베어링의 사양과 운전 조건은 Table 1에, 윤활유의 주요 물성자료는 Table 2에 각각 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 해석결과를 미세 딥플내에서 캐비테이션 발생을 고려하지 않은 경우와 유체압력이 윤활유

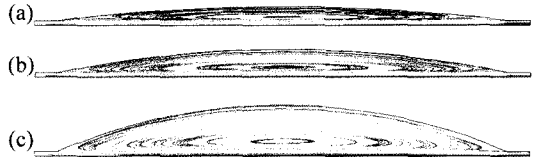


Fig. 4. Streamlines under no-cavitation condition. h_p is (a) $3 \mu\text{m}$, (b) $5 \mu\text{m}$, (c) $10 \mu\text{m}$.

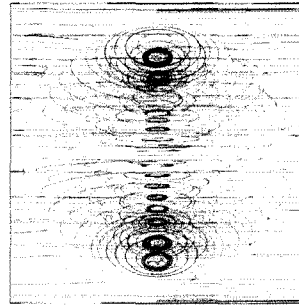


Fig. 5. Streamlines under no-cavitation condition. $h_p = 10 \mu\text{m}$.

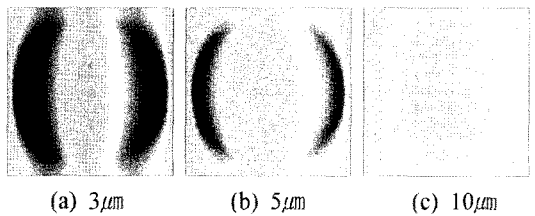


Fig. 6. Pressure distribution under no-cavitation condition.

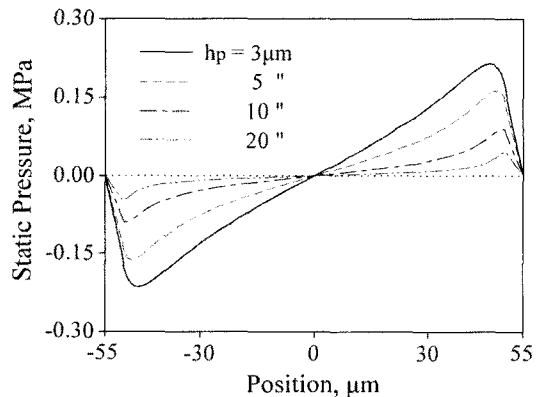


Fig. 7. Pressure distribution under no-cavitation condition.

의 증기압에 도달하여 캐비테이션이 발생하는 경우로 나누어 제시하였다.

Fig. 4~Fig. 7에는 캐비테이션 발생을 고려하지 않은 경우에 딥플 깊이에 따른 유선과 압력의 분포를 나타내었다. 이때, 비교를 쉽게 하기 위하여 각각의 최대 값에 대하여 상대적으로 표현하였다. Fig. 4~Fig. 5에

는 유선의 분포를(유속은 색으로 구분) 나타낸 그림으로 Fig. 4는 x-y단면에서, Fig. 5는 x-z단면(Fig. 2 참조)에서의 결과이다. 덩플내에서 윤활유는 하나의 큰 와류(Vortex)를 형성하여 회전유동하며, 이의 크기와 강도는 덩플이 깊어질수록 크게 되었다. 따라서, 이러한 와류는 덩플내에서의 압력분포와 베어링면에 작용하는 마찰력에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 한편, Fig. 6과 Fig. 7은 x-z단면과 x-y단면에서의 압력분포를 각각 나타낸 그림이다. 베어링면의 운동에 따라 덩플내로 유입되는 윤활유는 급격하게 팽창하므로 이곳의 압력은 입구부에서 보다 낮아지게 된다. 따라서, 덩플이 있는 평행 슬러스트 베어링에서는 베어링면의 운동으로 발생하는 Couette 유동과 함께 베어링의 입구부와 덩플 사이에서의 차압(Pressure difference)에 의한 Poiseuille 유동에 의해서 덩플 내부로 윤활유가 유입된다. 한편, 출구측으로 덩플이 끝나는 지점에서는 유막두께가 급격하게 감소하므로 압력은 급격히 증가한 다음 출구에서 대기압으로 감소한다. 특히, Fig. 7에 나타낸 것과 같이 덩플 깊이가 얕을수록 베어링 입구측 덩플영역에서 발생하는 음(-)압의 크기는 증가하며 이에 따라서 출구영역에서 발생하는 (+)압력도 증가한다.

하지만, 덩플내에서의 압력이 윤활유의 증기압 P_v 보다 낮은 경우에는 캐비테이션이 발생하며, 이때 윤활유는 유증기(Oil vapor) 상태로 유동한다. Fig. 8과 Fig. 9는 덩플의 깊이에 따른 캐비테이션 발생시의 유선을 나타낸 그림으로 Fig. 6과 Fig. 7에서 고찰한 것과 같이 덩플 깊이가 얕을수록 캐비테이션이 강하게 발생하여 덩플내부는 거의 유증기 상태이다. 이 결과, 캐비테이션을 고려하지 않은 Fig. 4에 비하여 덩플 깊이에 따라서 와류의 형태, 발생위치 및 크기는 크게 달라짐을 알 수 있다. 즉, 덩플 깊이가 얕아지면 캐비테이션 발생으로 인하여 와류가 발생하는 영역은 출구부 근처로 한정되지만 깊어질수록 와류의 중심은 덩플 중앙부로 이동할 뿐 아니라 이의 크기도 커진다.

Fig. 10과 Fig. 11은 덩플의 깊이에 따른 윤활유의 밀도분포를 나타낸 그림으로 액기상인 영역에 확연하게 차이를 나타내고 있다. 즉, 덩플이 깊어질수록 유증기상 영역이 줄어드는 반면에 액상 영역은 증가하였다. 덩플이 끝나는 영역에서는 유막두께가 급격하게 감소하여 압력이 높아지므로 윤활유는 유증기상에서 액상으로 압축된다. 덩플내에서의 이러한 액기상의 분포가 Fig. 8~Fig. 9에서의 와류특성을 나타내는 것으로 추정된다.

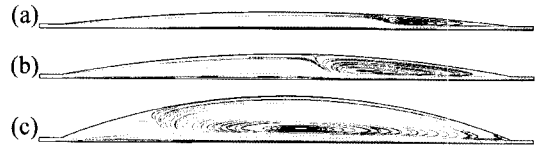


Fig. 8. Streamlines under cavitation condition. h_p is (a) $3 \mu\text{m}$, (b) $5 \mu\text{m}$, (c) $10 \mu\text{m}$.

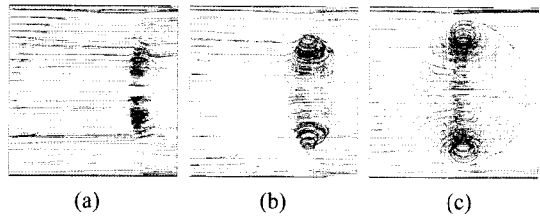


Fig. 9. Streamlines under cavitation condition. h_p is (a) $3 \mu\text{m}$, (b) $5 \mu\text{m}$, (c) $10 \mu\text{m}$.

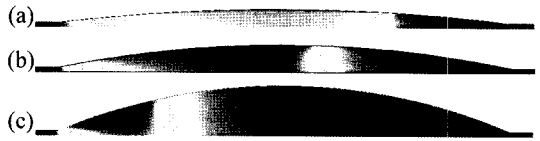


Fig. 10. Oil density distribution under cavitation condition. h_p is (a) $3 \mu\text{m}$, (b) $5 \mu\text{m}$, (c) $10 \mu\text{m}$.

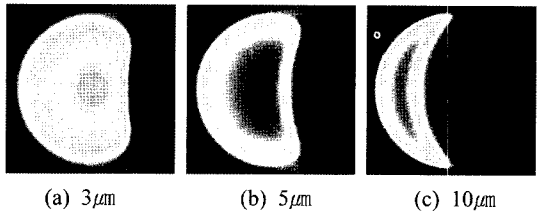


Fig. 11. Oil density distribution under cavitation condition.

Fig. 12~Fig. 13에는 덩플깊이에 따른 압력분포를 나타낸 결과로 Fig. 6~Fig. 7에 비하여 베어링 입구부에서의 음압의 크기가 상당히 줄어들었다. 이는 윤활유의 압력이 증기압보다 낮을 경우에는 캐비테이션이 발생하기 때문이며 덩플이 깊어질수록 캐비테이션 발생 영역과 음압의 크기가 감소하므로 일정깊이 이상에서는 캐비테이션 발생으로 인한 영향은 상당히 작을 것으로 쉽게 예상된다.

Fig. 14에는 덩플의 깊이에 따른 마찰력의 변화를 캐비테이션 조건을 적용하지 않은 경우와 적용한 경우의 결과를 서로 비교하였다. 여기서 무차원 마찰력은 덩플이 없는 베어링면에 작용하는 마찰력과의 상대비를 의미한다. 캐비테이션 발생여부에 거의 관계없이 덩플이 깊어질수록 마찰력이 감소하는 것은 덩플의 존재로

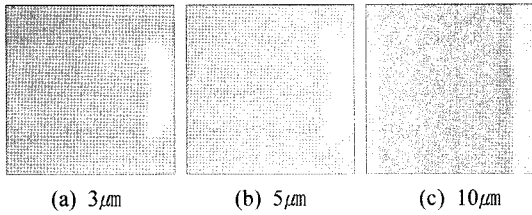


Fig. 12. Pressure distribution under cavitation condition.

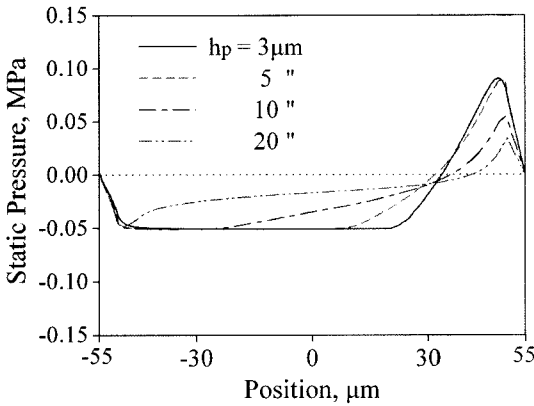


Fig. 13. Pressure distribution under cavitation condition.

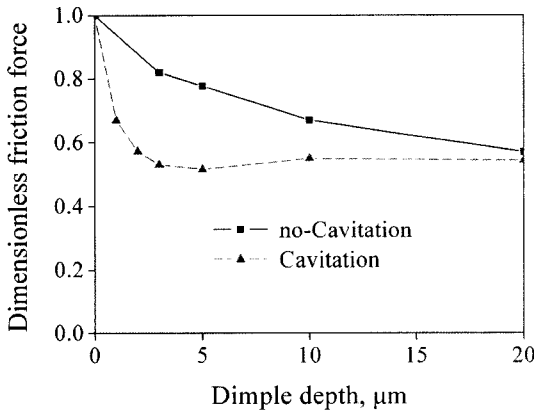


Fig. 14. Variation of dimensionless friction force with dimple depth.

인하여 스러스트 베어링면 사이에서의 속도구배는 작아지기 때문이다. 특히, 캐비테이션이 발생하는 영역에서는 유층기 상태이므로 마찰력은 더욱 작아지게 된다. 하지만 일정깊이 이상인 경우에는 추가적인 마찰력 감소효과가 거의 나타나지 않았다.

이상에서 제시한 결과와 같이 미세 딩플의 깊이는 LST 가공한 평행 스러스트 베어링 윤활특성에 아주 큰 영향을 미치며, 일정정도 이상의 깊이는 마찰력 감소에 비효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 LST 방법 등으로 미세 딩플을 가공한 평행 스러스트 베어링에서 딩플의 깊이에 따른 윤활특성을 이론적으로 조사하기 위하여 상용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 이 결과, 딩플의 깊이와 캐비테이션 발생여부에 따라서 베어링 내에서의 압력, 밀도 및 속도 분포는 크게 변화하였다. 특히, 미세 딩플의 존재는 베어링에 작용하는 마찰력을 크게 감소시켰으며, 이는 기존의 실험결과와도 잘 일치하였다. 또한 일정깊이 이상인 경우에는 추가적인 마찰력 감소는 무시할 정도였다. 따라서, 본 논문의 해석 방법과 결과는 LST 방법 등으로 미세 딩플을 설계한 각종 스러스트 베어링의 윤활특성해석에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 예상되며, 최적설계조건을 도출하기 위해서는 다양한 설계변수에 대한 집중적인 연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업과 두산모트롤(주)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Etsion, I., "Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing", *Tribology Letters*, Vol. 17, pp. 733-737, 2004.
- Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing", *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 248-253, 2005.
- Etsion, I., "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.
- 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.
- 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.
- 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, J. of Eng. Tribology*, 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, 손자덕, 정호경, “2차원 미세 포켓이 있는 무한장 Slider Bearing의 CFD해석”, *한국윤활학회지*, Vol. 25, No. 1, pp. 43-48, 2009.
 11. 박태조, 황윤건, “Groove 단면형상에 따른 유압 Spool Valve의 윤활해석”, *한국윤활학회지*, Vol. 25, No. 1, pp. 13-19, 2009.
 12. FLUENT, “FLUENT 6.0 Manual”, 2002.