

Micro-Texturing한 Slider Bearing의 윤활특성 : 딴플 밀도의 영향[§]

박 태 조*† · 이 준 오**

* 경상대학교 기계공학부, ** 경상대학교 대학원 기계항공공학부

Lubrication Characteristics of Micro-Textured Slider Bearing: Effect of Dimple Density

Tae Jo Park*† and Joon Oh Lee**

* School of Mechanical Engineering, ERI, Gyoungsang Nat'l Univ.,

** Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyoungsang Nat'l Univ.

(Received July 9, 2012 ; Revised December 31, 2012 ; Accepted January 2, 2013)

Key Words: Slider Bearing(슬라이더 베어링), Surface Texturing(표면조작가공), micro-Dimple(미세 딴플), Friction Reduction(마찰감소), CFD(전산유체역학)

초록: 마찰을 크게 줄임과 동시에 신뢰성을 향상시키기 위하여 평행 스러스트 베어링, 메카니컬 시일과 피스톤링 등과 같은 기계부품에 표면가공방법이 최근에 적용되고 있다. 본 논문에서는 상용 전산유체역학 S/W인 FLUENT를 사용하여 반구형 미세딴플이 등간격으로 배치되어 있는 슬라이더 베어링의 윤활특성을 조사하였다. 미세딴플의 직경과 수에 따라서 압력분포, 지지하중, 누설유량과 마찰력은 아주 크게 변화하였다. 특히, 딴플의 밀도증가에 따라서 지지하중과 마찰력은 거의 선형적으로 감소하는 반면에 누설유량은 급격하게 증가하였다. 본 논문의 결과는 각종 미끄럼 베어링의 윤활성능을 향상시키기 위한 최적 딴플설계에 사용할 수 있으며, 추가적인 연구가 요구된다.

Abstract: In recent times, surface texturing methods have been widely applied to reduce friction and improve the reliability of machine components such as parallel thrust bearings, mechanical face seals, and piston rings. In this study, a numerical analysis is carried out to investigate the effect of uniformly spaced hemispherical dimples on the lubrication characteristics of a slider bearing using a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT. The pressure distributions, load capacity, leakage flowrate, and friction force are strongly affected by the dimple diameter and the number of dimples. In particular, the load capacity and friction force decrease linearly with the dimple density whereas the leakage increases. These results can be used for designing the optimum dimple characteristics in order to improve the lubrication performance of slider bearings, for which further studies are required.

1. 서 론

현재 대부분의 기계에서는 적절한 점도의 윤활유를 사용하여 상대운동부에서 발생하는 마찰을 줄이고 있다. 즉, 점성유체의 윤활작용으로 발생하는 유체압력(Hydrodynamic pressure)의 작용에 의하여 상대운동면이 하중지지 상태에서도 유막으로 분리되

므로 건마찰(Dry friction)인 경우에 비하여 마찰은 아주 크게 감소한다. 이러한 마찰은 기계의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 부품면의 마멸발생에도 크게 관여하기 때문에 이의 발생을 최소화해야만 된다. 특히, 최근에는 고유가문제로 인한 에너지절약과 화석연료의 사용에 기인한 지구온난화문제 등을 해결하기 위하여 우선적으로 저감이 요구되는 마찰에 관련된 연구주제가 새롭게 인식되고 있다.

지난 10여년 동안에 스러스트 베어링(Thrust bearing), 메카니컬 시일(Mechanical seal), 피스톤 링(Piston ring) 등과 같은 기계요소의 윤활면에 Fig. 1에 나타낸 것

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 경남지회 춘계 학술대회(2012. 5. 11., 창원대) 발표논문임

† Corresponding Author, tjpark@gnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

과 같은 미세한 포켓(Pocket)이나 딴플(Dimple) 형상을 가공(Surface texturing이라고 부름)하여 마찰을 저감시키기 위한 연구가 시도되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 특히, Etsion⁽³⁾이 주도적으로 개발한 레이저를 사용한 표면조직(Laser surface texturing : LST) 가공법은 다른 방법에 비하여 많은 장점이 있기 때문에 가장 널리 적용되고 있다. 지금까지의 실험결과, 표면이 매끈한 경우에 비하여 Surface texturing한 경우의 마찰계수가 한층 작고 마멸발생도 크게 감소하는 것으로 조사되었으며, 최근에 이의 효과를 이론적으로 규명하기 위한 연구가 집중적으로 수행되고 있다.⁽²⁻¹³⁾ 특히, Fowell 등⁽⁷⁾은 베어링면의 입구부에 설계된 다수의 미세포켓내에서 발생하는 캐비테이션(Cavitation)에 의해서 윤활유가 포켓내로 흡입(Inlet suction)되며, 이 결과 평행 스러스트 베어링인 경우에도 유체압력이 발생하여 하중지지 가능성이 보였다. 하지만 지금까지 수행된 대부분의 이론해석은 베어링면이 서로 평행한 경우를 대상으로 하였기 때문에 정확하게 실험결과와 비교하기는 어려운 실정이다. 따라서, 딴플이 미끄럼 베어링의 윤활특성에 미치는 영향을 보다 상세하게 조사하기 위해서는 운동방향으로 유막두께가 변하는 Slider 베어링에 대한 이론해석이 요구되지만 현재까지 관련연구는 크게 미흡한 상태이다. 특히, 베어링면에 작용하는 마찰의 감소에 대해서만 주로 고찰되었을 뿐 지지하중의 변화와 같은 중요한 윤활특성에 대한 연구결과는 아직까지 제시되지 않고 있는 상태이다. 본 연구자⁽¹⁴⁾의 미세딴플이 있는 Slider 베어링에 대한 해석에서 아주 제한된 경우를 제외한 대부분의 운전조건에서는 마찰력의 감소와 함께 지지하중도 감소하는 결과를 제시하였다.

한편, Surface texturing을 적용하는 실제 베어링에서 딴플 깊이는 대략 20 μ m 이내이지만 이는 유막두께에 비하여 한층 깊을 뿐만 아니라 딴플 부근에서 유막형상이 급격하게 변한다. 따라서, 딴플이 있는 미끄럼 베어링의 윤활특성을 해석하기 위해서는 레이놀즈 방정식 대신에 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 그대로 수치해석하는 것이 보다 정확하며, 이 경우에는 전산유체역학(Computational fluid dynamics : CFD) 해석방법을 사용하는 것이 보다 현실적이다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 Surface texturing한 Slider 베어링의 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 딴플의 면적변화가 베어링의 윤활특성에 미치는 영향을 상용 CFD 해석 프로그램인 FLUENT⁽¹⁵⁾를 사용하여 조사하고자 한다.

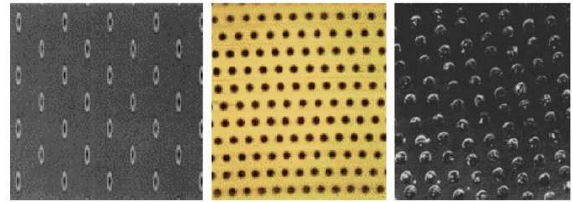


Fig. 1 Example of laser surface textured bearing surfaces^(2,3)

2. 해석 모델 및 방법

본 논문에서는 Surface texturing한 Slider 베어링의 윤활특성해석에 상용 CFD 프로그램을 사용하고자 한다. 정상상태 3차원 비압축성 층류유동에 대한 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식은 각각 다음의 식 (1)~식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

Fig. 2는 해석에 사용한 Slider 베어링의 형상을 개략적으로 나타낸 그림으로 베어링의 길이와 폭은 각각 L과 2r₁이다. 여기에 참고문헌[2~4]과 동일하게 반경과 깊이가 각각 r_p와 h_p인 반구형 미세딴플을 등간격으로 배치하였다. 베어링 입구부와 출구부에서의 유막두께를 각각 h₀와 h_n이라고 할 때 딴플이 없는 x위치에서의 유막두께 h는 다음 식으로 표현된다.

$$h = h_0 + (h_n - h_0) \frac{x}{L} \quad (3)$$

베어링의 입·출구부에 작용하는 압력은 p₀, p_n이며, y방향 양측경계에는 다음의 대칭조건을 적용하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad y = \pm r_1 \quad (4)$$

Fig. 3에는 수치해석을 위하여 FLUENT의 전처리 프로그램인 ICEM CFD를 이용하여 생성한 격자계의 예를 나타내었다. (a)는 13개의 미세딴플

이 가공된 경우의 격자를, (b)는 하나의 미세딴플을 확대하여 나타내었다. 이때, 고체면 부근과 유막이 급격히 변하는 부분에서는 격자를 조밀하게 배치하였으며, 윤활유와 접하는 모든 벽면에는 No-slip 조건을 적용하였다. Table 1에는 베어링의 사양과 해석조건을 나타내었으며, 윤활유의 점도와 밀도는 각각 962 kg/m^3 , $0.013468 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다.

본 논문에서는 등간격으로 배치된 딴플의 크기와 수의 변화에 따른 윤활특성을 조사하고자 한다.

Table 1 Bearing size and operating conditions

	Symbol	Value
Bearing length, μm	L	1,950
Dimple size & depth, μm	r_1	75
	r_p	25, 50, 65
	h_p	10
Film thickness, μm	h_0	2
	h_n	1
Pressure B. C., kPa_{abs}	P_0, P_n	100
Bearing speed, m/s	U	1

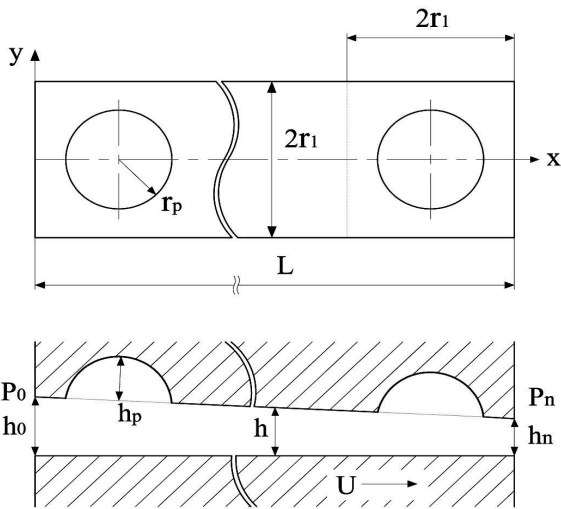


Fig. 2 Schematic of micro-dimpled slider bearing

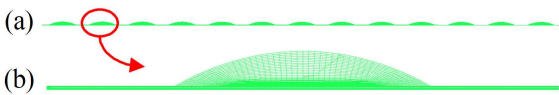


Fig. 3 Grid system used in numerical analysis

결과를 효율적으로 정리하기 위하여 도입한 딴플 밀도(Density) D_d 는 베어링 면적에서 전체딴플부의 면적백분율로서 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$D_d = \frac{\pi r_p^2 N}{2r_1 L} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서, N은 딴플의 수이다.

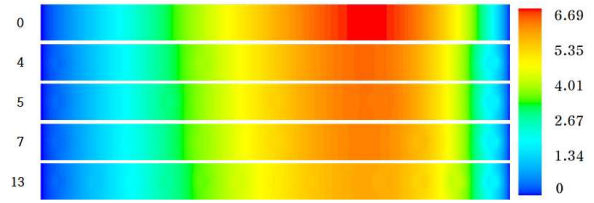


Fig. 4 Pressure distribution for $r_p=25\mu\text{m}$

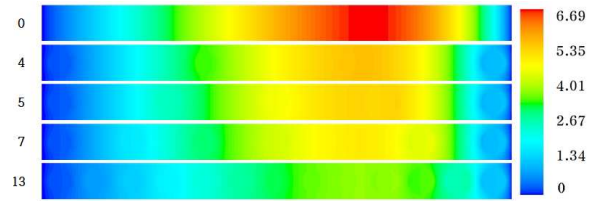


Fig. 5 Pressure distribution for $r_p=50\mu\text{m}$

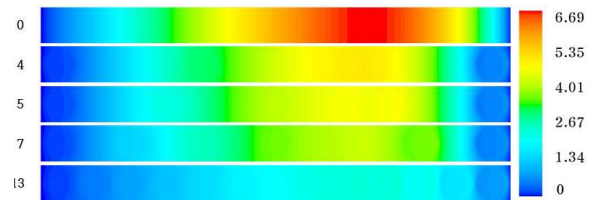


Fig. 6 Pressure distribution for $r_p=65\mu\text{m}$

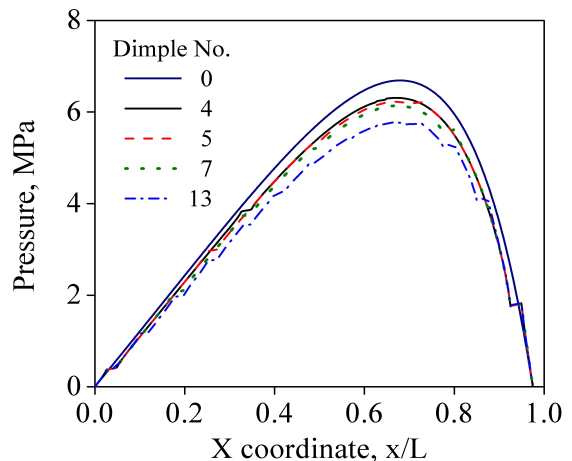


Fig. 7 Comparison of pressure distribution, $r_p=25\mu\text{m}$

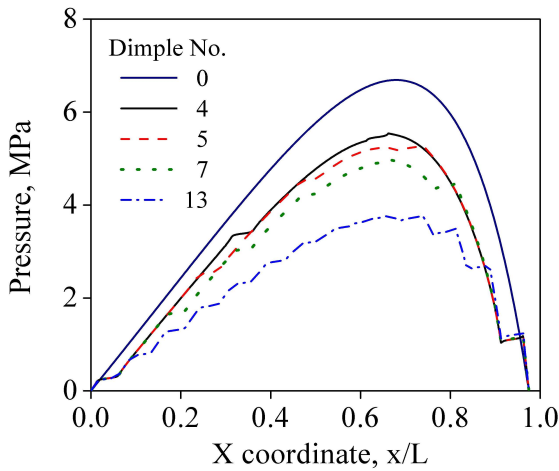


Fig. 8 Comparison of pressure distribution, $r_p=50\mu\text{m}$

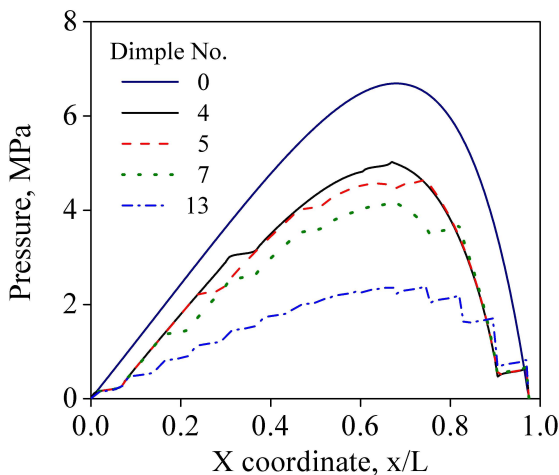


Fig. 9 Comparison of pressure distribution, $r_p=65\mu\text{m}$

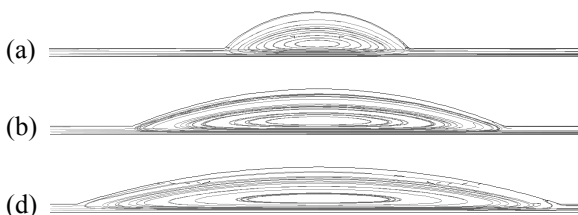


Fig. 10 Streamline distributions for various dimple size. (a) $r_p=25\mu\text{m}$, (b) $r_p=50\mu\text{m}$ (c) $r_p=65\mu\text{m}$

3. 결 과

Fig. 4~Fig. 6에는 디플 반경 r_p 가 각각 $25\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $65\mu\text{m}$ 인 경우에 디플 수 N 의 변화에 대한 압력 분포를 순서대로 나타낸 결과로 전체의 최고 압력을 기준으로 나타내었다. 여기서, 각 그림의 좌

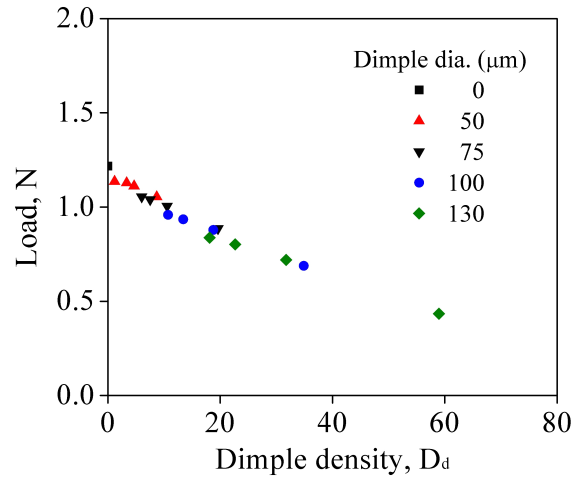


Fig. 11 Variation of load capacity with dimple density

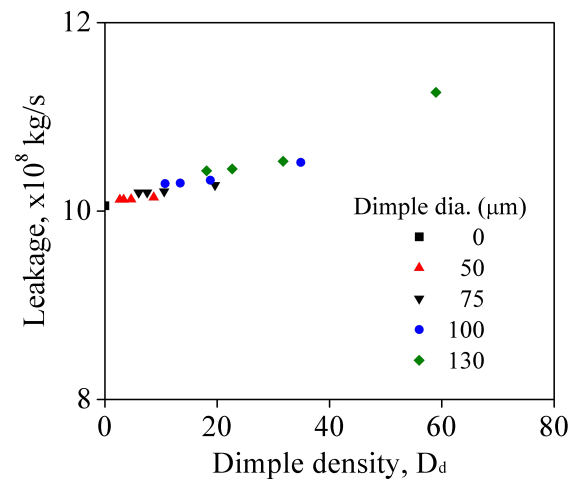


Fig. 12 Variation of leakage flowrate with dimple density

측 숫자는 베어링 표면에 가공된 디플의 수를 의미한다. 따라서, 0은 디플이 없는 단순한 Slider 베어링에 해당된다. 디플이 있는 경우에는 전체 해석 모델의 입구부와 출구부에 디플을 배치한 다음 나머지를 등간격으로 배치하였다. Fig. 7~Fig. 9에는 Fig. 4~Fig. 6의 결과를 $y=0$ 에서의 길이방향 압력분포로 각각 나타내었다. 유막두께가 베어링의 운동방향으로 작아지는 형상이므로 췌기효과(Wedge effect)에 의하여 유체압력이 발생하였다. 사용한 해석조건에서는 디플이 없는 경우에 가장 높은 압력이 발생하였으며 디플의 수가 많아지고 디플의 직경이 커질수록 발생압력은 낮아졌다. 이러한 디플의 크기와 수에 따른 압력분포의 차이는 Slider 베어링의 지지하중과

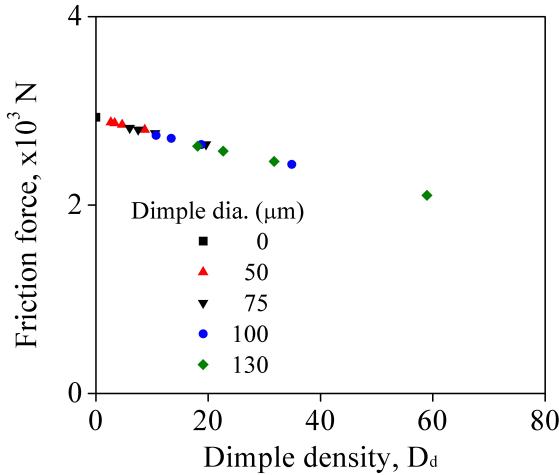


Fig. 13 Variation of friction force with dimple density

마찰력 등의 윤활특성에 직접적인 영향을 미칠 것으로 쉽게 예상할 수 있다.⁽¹⁴⁾

Fig. 10은 입구부 딩플에 대한 x-z단면에서의 유선의 분포를 비교하여 나타낸 그림이다. 딩플의 크기 차이에도 불구하고 딩플내에서는 전 영역을 차지하는 하나의 와류(Vortex)가 모든 경우에 생성되었다. 따라서, 이러한 와류의 크기와 강도는 베어링면에 작용하는 점성마찰력의 크기에 아주 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Fig. 11~Fig. 13에는 식 (5)와 같이 정의한 딩플 밀도의 변화에 따른 베어링의 지지하중, 마찰력 및 간극을 통하는 누설유량(이론급유량)의 변화를 순서대로 나타내었다. Fig. 4~Fig. 9에서 고찰한 바와 같이 딩플밀도가 증가할수록 발생압력이 감소하기 때문에 베어링의 지지하중은 감소하였다. 딩플밀도가 증가할수록 평균적인 유막두께는 커지므로 누설량은 증가하는 반면에 간극을 통하는 유체의 속도구배가 감소하므로 마찰력은 감소하였다. 특히, 딩플의 크기와 수에 차이가 있음에도 불구하고 딩플밀도에 따라서 지지하중, 누설유량 및 마찰력은 거의 선형적으로 변화하는 점이 주목할 결과이다. 이와 같이 Slider 베어링에서 미세 딩플의 크기와 수는 윤활특성에 아주 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LST 방법에서와 같이 등간격으로 Surface texturing한 Slider 베어링에서 미세딩플

의 밀도에 따른 윤활특성의 변화를 상용 CFD 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석하였다. 이 결과, 딩플의 크기와 수에 따라서 발생압력, 지지하중, 누설유량 및 마찰력은 아주 크게 변화하였다. 특히, 딩플밀도에 따라서 지지하중과 마찰력은 선형적으로 감소하는 반면에 누설유량은 거의 선형적으로 증가하였다. 따라서 본 논문의 해석방법과 결과는 각종 Slider 베어링의 윤활성능향상을 위하여 미세딩플을 설계하는 경우에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 예상되며, 추가적인 연구를 요한다.

후기

이 논문은 2단계 BK21사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) McNickle, A. D. and Etsion, I., 2004, "Near-Contact Laser Surface Textured Dry Gas Seals," *J. of Tribology*, Vol. 126, pp. 788~794.
- (2) Brizmer, V., Kligerman, Y. and Etsion, I., 2003, "A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing," *Tribology Trans.*, Vol. 46, pp. 397~403.
- (3) Etsion, I., 2005, "State of the Art in Laser Surface Texturing," *J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 248~253.
- (4) Feldman, Y., Kligerman, Y., Etsion, I. and Haber, S., 2006, "The Validity of the Reynolds Equation in Modeling Hydrostatic Effects in Gas Lubricated Textured Parallel Surfaces," *J. of Tribology*, Vol. 128, pp. 345~350.
- (5) Brajdic-Mitidieri, P., Gosman, A. D., Ioannides, E. and Spikes, H. A., 2005, "CFD Analysis of a Low Friction Pocketed Pad Bearing," *J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 803~812.
- (6) de Kraker, A., van Ostayen, R. A. J., van Beek, A. and Rixen, D. J., 2007, "A Multiscale Method Modelling Surface Texture Effects," *J. of Tribology*, Vol. 129, pp. 221~230.
- (7) Fowell, M., Olver, A. V., Gosman, A. D., Spikes, H. A. and Pegg, I., 2007, "Entrainment and Inlet Suction: Two Mechanisms of Hydrodynamic

- Lubrication in Textured Bearings," *J. of Tribology*, Vol. 129, pp. 336~347.
- (8) Marian, V. G., Gabriel, D., Knoll, G. and Filippone, S., 2011, "Theoretical and Experimental Analysis of a Laser Textured Thrust Bearing," *Tribology Lett.*, Vol. 44, pp. 335~343.
- (9) Shi, X., and Ni, T., 2011, "Effects of Groove Textures on Fully Lubricated Sliding with Cavitation," *Tribology Int.*, Vol. 44, pp. 2022~2028.
- (10) Park, T. J. and Hwang, Y. G., 2009, "Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 1 - Effect of Dimple Depth," *J. of KSTLE*, Vol. 25, No. 5, pp. 305~310.
- (11) Park, T. J. and Hwang, Y. G., 2010, "Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 2 - Effect of Dimple Location," *J. of KSTLE*, Vol. 26, No. 1, pp. 1~6.
- (12) Park, T. J., 2011, "Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 3 - Effect of Number of Dimples," *J. of KSTLE*, Vol. 27, No. 6, pp. 302~307.
- (13) Park, T. J., 2011, "Lubrication Characteristics of Laser Textured Parallel Thrust Bearing : Part 4 - Effect of Dimple Shape," *J. of KSTLE*, Vol. 27, No. 6, pp. 338~343.
- (14) Lee, J. O., Jeong, Y. H., Jang, M., J. and Park, T. J., 2011, "Lubrication Characteristics of a Micro-textured Slider Bearing," *Proc. of KSTLE 2011 Fall Conf.*, pp. 139~140.
- (15) FLUENT, 2009, FLUENT 12.1.2 Manual.