

2차원 미세 포켓이 있는 무한장 Slider Bearing의 CFD 해석

박태조[†] · 황윤건* · 손자덕** · 정호경**

경상대학교 기계항공공학부·공학연구원, *경상대학교 대학원, **두산모트롤(주)

CFD Analysis of an Infinitely Long Slider Bearing with Two-Dimensional micro-Pockets

Tae-Jo Park[†], Yun-Geon Hwang*, Ja-Deok Sohn** and Ho-Gyeong Chung**

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

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

**Doosan Mottrol Co., Ltd

(Received December 28, 2008; Revised December 25, 2009; Accepted January 31, 2009)

Abstract – It is reported by many researchers that the textured bearing surfaces, where many tiny micro-pockets or enclosed recesses were incorporated, can enhance the load support and reduce friction force. Recently, the basic lubrication mechanism of micro-pocketed parallel surfaces are explained in terms of “inlet suction” using continuity equation and simply cavitation condition. However, it is required that more actual cavitation condition in the pocket region should be applied to estimate exact bearing performance. In this paper, a commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT is used to investigate the exact lubrication characteristics of infinitely long slider bearing with micro-pockets. The results show that the pressure distributions are highly affected by pocket depths, its positions and numbers. The numerical method adopted in this paper and results can be use in optimal design of textured sliding bearings.

Key words – slider bearing, micro-pocket, cavitation, CFD (computational fluid dynamics), FLUENT

1. 서 론

모든 기계에 필수적으로 사용되는 부품인 베어링에서는 상대운동을 하는 윤활면 사이에 존재하는 윤활유의 점성작용에 의해서 발생하는 유체압력(Hydrodynamic pressure)이 하중을 지지함과 동시에 상대운동면을 서로 분리시킨다. 1886년, O. Reynolds가 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식에 적절한 가정을 도입하여 제시한 레이놀즈 방정식으로부터 유체압력을 발생시키는 주된 기구가 윤활면의 썸기작용(Wedge action)이라는 것은 널리 알려진 사실이다[1]. 따라서, 완전하게 평행한 윤활면인 경우에는 이론적으로 유체압력이 발생하지 않는다.

하지만 미끄럼운동을 하는 평행한 베어링 표면에 작

은 크기의 포켓(Pocket)이나 리세스(Recess) 등이 있을 경우에는 마찰력이 줄어들 뿐만 아니라 어느 정도의 하중지지도 가능하다는 다수의 실험결과가 지난 10여년 사이에 발표되었다. 특히, Etsion[2,3]은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 레이저를 사용하여 등간격, 반구형의 미세 딴플(micro-Dimple)을 가공한 베어링(Textured bearing)에서는 마찰력이 크게 감소한다는 결과를 발표하는 등 이에 대하여 많은 연구를 수행하고 있다. 최근에 Olver 등[4]은 포켓이 있는 평행한 패드 베어링에서는 포켓 내부에서의 캐비테이션(Cavitation)에 의해서 입구부 흡입(Inlet suction)이 발생하고 이의 결과로 하중지지가 가능하다는 결과를 처음으로 제시하였다. 이들의 연구에 이어서 Fowell 등[5]은 여러개의 포켓이 있는 평행 베어링의 해석에 1차원 레이놀즈 방정식과 단순한 캐비테이션 조건을 적용하여 하중지지와 마찰력 감소에

[†]주저자 · 책임저자 : tjpark@gnu.ac.kr

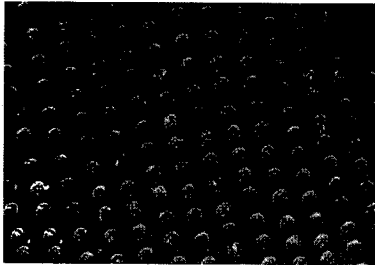


Fig. 1. An example of micro-dimpled bearing surface using Laser surface texturing.

미치는 각종 설계변수들의 영향을 조사하였다.

하지만, 베어링면에 포켓이나 리세스가 있는 경우에는 레이놀즈 방정식의 유도에 적용한 가정이 성립하지 않기 때문에 정확한 해석을 위해서는 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 그대로 해석해야 된다. 특히, 캐비테이션이 발생하는 경우에는 전산유체역학 (Computational fluid dynamics : CFD) 해석방법을 채용하여 것이 보다 현실적이다. 최근에 CFD 해석방법이 정압 베어링, 하이브리드(Hybrid) 베어링 등의 윤활특성해석에 많이 적용되고 있다[6-10]. Brajdic-Mitidieri 등[9]은 포켓이 있는 패드 베어링의 포켓 내에서의 윤활유 거동을 CFD 해석방법을 적용하여 처음으로 해석한 결과, 포켓의 존재는 마찰계수를 크게 줄인다는 결과를 제시하였다. 박태조[11-13]은 유막두께에 비하여 포켓이나 그루브의 깊이가 큰 경우의 윤활문제해석에 CFD 해석방법을 적용하였다.

본 논문에서는 무한장인 2차원 Slider 베어링에서 유막두께와 비슷한 크기의 미세한 포켓이 베어링면에 존재하는 경우의 윤활문제를 상용 열유체해석 CFD 프로그램인 FLUENT[14]를 사용하여 해석하고자 한다. 특히, 윤활면이 평행한 경우에 포켓의 깊이, 위치 등에 따른 압력분포 등을 상세하게 조사하였다.

2. 해석 방법

Fig. 2는 본 논문에서 해석하고자하는 포켓이 있는 2차원 Slider 베어링 형상을 개략적으로 나타낸 그림으로 베어링의 전체폭은 B이며, 중앙부에는 폭과 깊이가 각각 b와 h_p 인 포켓이 설계되어 있다. 이때, 베어링 양단에 작용하는 압력 P_a 는 대기압이고, 포켓 내에서 캐비테이션이 발생하는 영역에서는 윤활유의 증기압 P_c 가 작용하며, 모든 벽면에는 No-slip 경계조건을 적용하였다. 참고로, 포켓이 없는 경우에는 레이놀즈 방정

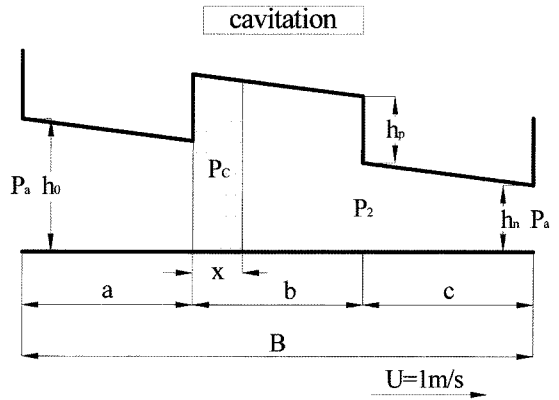


Fig. 2. Schematic of a pocketed slider bearing.

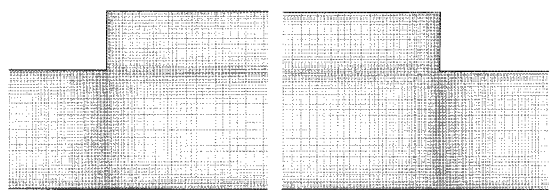


Fig. 3. Grid system used in numerical analysis.

식을 사용하여 유막 내에서의 유체압력은 해석적으로 구할 수 있다.

Fig. 3은 FLUENT의 전처리 프로그램인 Gambit을 이용하여 구성한 포켓의 입구부와 출구부 부근에서의 격자계의 예를 나타낸 그림으로 베어링면에 인접한 영역과 유막이 급격하게 변하는 부분에서는 격자를 조밀하게 배치하였다. 전체격자 수는 포켓의 깊이 h_p 가 $2 \mu\text{m}$ 인 경우에 대략 50,000개 정도이다.

해석에 사용한 Slider 베어링의 사양과 해석조건은

Table 1. Bearing size and operating conditions

	symbol	value
bearing size	b	0.5 mm
	B	2.0 mm
pressure condition	P_a	100 kPa _{abs}
	P_c	50 kPa _{abs}
sliding speed	u	1 m/s

Table 2. Oil properties

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

Table 1에, 윤활유의 주요 물성자료는 Table 2에 각각 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 베어링 출구측 유막두께 $h_n=4\ \mu\text{m}$ 와 포켓이 있는 경우에는 이의 폭은 $b=0.5\ \text{mm}$ 로 고정하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 본 논문에서 사용한 CFD 해석방법의 정확성을 검증하기 위하여 이론적인 윤활특성이 알려져 있는 단순한 경사진 Slider 베어링과 Rayleigh step 베어링에 대한 압력분포를 비교하여 각각 나타내었다. 이 결과, 본 논문의 해석결과와 이론적인 압력분포가 아주 잘 일치하였다. 참고로 Fig. 4에는 비교를 위하여 Slider 베어링의 중앙부에 깊이(h_p)가 $2\ \mu\text{m}$ 인 포켓이 있는 경우의 결과도 함께 나타내었다.

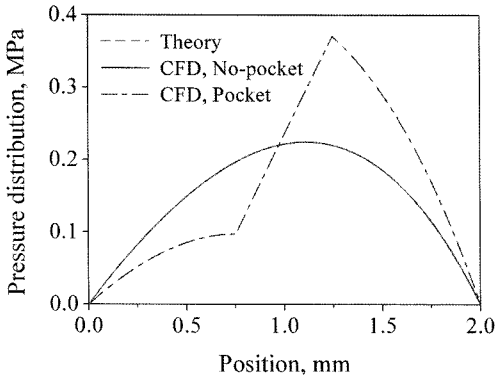


Fig. 4. Pressure distribution for convergent slider bearing. $h_o=5\ \mu\text{m}$, $h_n=4\ \mu\text{m}$

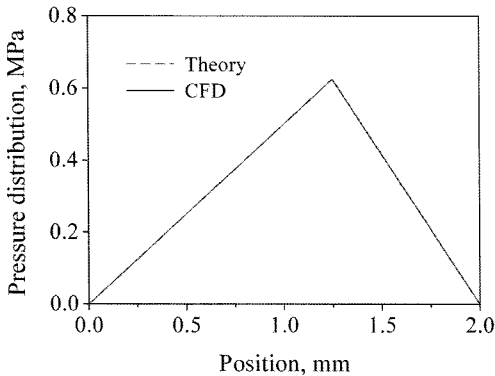


Fig. 5. Pressure distribution for Rayleigh step bearing. $h_o=6\ \mu\text{m}$, $h_n=4\ \mu\text{m}$

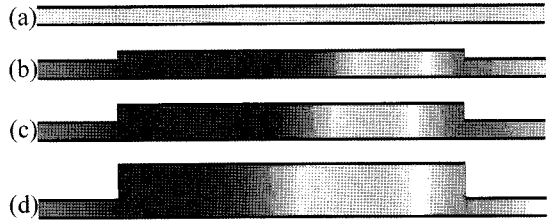


Fig. 6. Pressure distribution. (a) no-pocket, (b) $h_p=2\ \mu\text{m}$, (c) $h_p=4\ \mu\text{m}$, (d) $h_p=8\ \mu\text{m}$

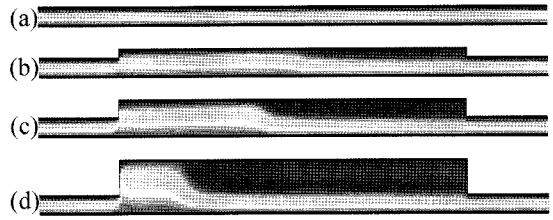


Fig. 7. Velocity distribution. (a) no-pocket, (b) $h_p=2\ \mu\text{m}$, (c) $h_p=4\ \mu\text{m}$, (d) $h_p=8\ \mu\text{m}$

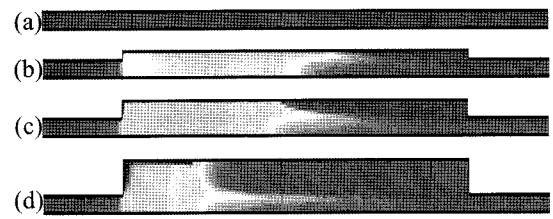


Fig. 8. Oil density distribution. (a) no-pocket, (b) $h_p=2\ \mu\text{m}$, (c) $h_p=4\ \mu\text{m}$, (d) $h_p=8\ \mu\text{m}$

다음에는 베어링 랜드부의 유막두께가 $h_o=h_n=4\ \mu\text{m}$ 인 평행 Slider 베어링에 포켓이 있는 경우, 포켓의 위치와 수 등에 따른 해석결과를 나타내었다.

Fig. 6~Fig. 8에는 베어링 중앙부에 위치한 폭 $b=0.5\ \text{mm}$ 이고 깊이가 서로 다른 포켓 주위에서의 압력, 속도 및 윤활유의 밀도 분포를 순서대로 제시하였다. 이때, 비교를 쉽게 하기 위하여 유막두께 방향으로 크게 확대하여 각각의 최대값을 기준으로 상대적으로 나타내었다. 포켓이 없는 경우에는 전 윤활면에서 유막이 평행하므로 압력발생이 없으며, 유막두께방향으로의 속도구배와 윤활유의 밀도도 일정하였다. 하지만 포켓이 있는 경우에는 입구측 베어링 랜드를 통과한 윤활유는 포켓부에서 유막두께가 급격하게 커짐에 따라 팽창하므로 압력은 갑자기 낮아진다. 만일, 윤활유의 증기압보다 압력이 낮아지면 캐비테이션이 발생하며, 이 경우에 윤활유는 거의 증기상태이므로 밀도는

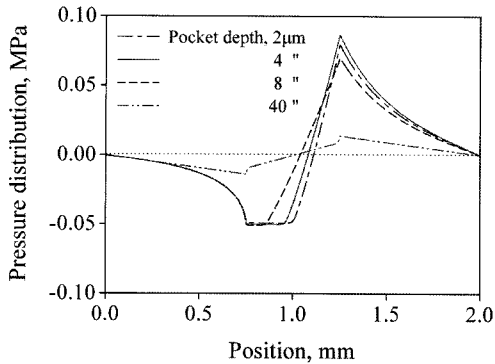


Fig. 9. Comparison of pressure distribution according to pocket depth.

아주 낮아지게 된다. 따라서 베어링의 입구부와 포켓 사이에는 차압(Pressure difference)이 형성되고 이로 인하여 유동(Poiseuille flow)이 발생한다. Olver 등[4]은 이를 “입구부 흡입(Inlet suction)”으로 명명하였다. 따라서, 포켓이 있는 평행 Slider 베어링에서는 베어링면의 운동에 따른 Couette 유동과 함께 포켓의 존재로 인한 Poiseuille 유동의 결과로 포켓내부로 유힬유가 유입된다. 한편, 출구측 베어링 랜드가 시작되는 포켓 내에서는 유막두께가 급격하게 작아짐에 따라서 유힬유의 유동방향과 유속이 크게 변화하게 된다. 이 결과, 포켓은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 Step 베어링 역할을 하고 출구측 포켓영역에서는 압력이 크게 상승하게 되며[10,15], 이는 포켓내부의 전체 압력분포와 캐비테이션 특성에도 영향을 받게 된다. 결과적으로 포켓의 깊이에 따라서 포켓 내에서의 압력, 속도 및 밀도 분포는 크게 변화하게 된다. 특히, 특정깊이 이내에서는 포켓이 깊어질수록 캐비테이션이 발생하는 거리는 짧아지는 반면에 이의 강도는 상대적으로 크게 증가하였다.

Fig. 9는 포켓의 깊이에 따른 베어링 내에서의 압력 분포를 나타낸 그림으로 이의 크기는 압력분포와 캐비테이션의 발생에 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 특히, 포켓으로 인하여 발생하는 포켓 내에서의 압력은 출구측 베어링에는 입구압력으로 작용하므로 유막두께가 일정함에도 불구하고 하중을 지지할 수 있게

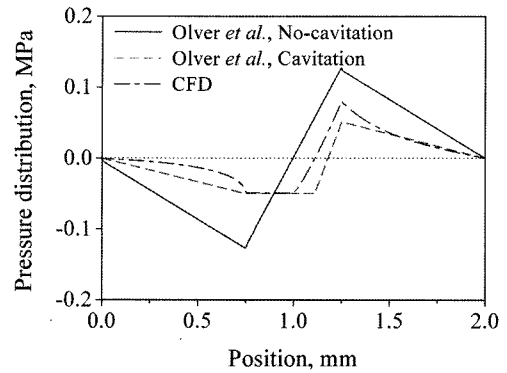


Fig. 11 Pressure distribution for parallel slider bearing. $h_o=h_n=4 \mu\text{m}$, $h_p=2 \mu\text{m}$

된다. 참고로, 유막두께에 비하여 포켓이 깊을 경우에는 입구부 흡입으로 인한 포켓내에서의 압력발생은 상대적으로 미약하였다[11,12].

Fig. 10에는 포켓 깊이가 $h_p=4 \mu\text{m}$ 인 경우의 결과인 Fig. 7(c)를 부분적으로 확대하여 유선으로 나타낸 것으로 포켓의 출구측 내부에는 상당한 크기의 입구방향으로 역류하는 와류(Vortex)가 발생하고 있다[13]. 이러한 포켓으로 인한 유동특성은 포켓이 없는 경우에 비하여 유막 내에서의 속도구배를 크게 감소시키므로 마찰력은 감소할 것으로 예상된다.

다음에 제시한 결과에서는 포켓의 깊이를 $h_p=2 \mu\text{m}$ 로 일정하게 두었다.

Fig. 11은 참고문헌[4,5]의 이론해석결과와 본 논문의 CFD 해석결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 주어진 운전조건에서 캐비테이션 발생을 고려하지 않으면 상당한 크기의 음압(Negative pressure)이 발생한다. 참고문헌[4]에서는 이를 피하기 위하여 연속조건에 캐비테이션 압력을 고려한 결과, 직선적인 압력분포를 제시하였다. 하지만 이들의 결과는 음압의 발생에 따른 유힬유의 액/기상으로의 2상유동(2-Phase flow)을 고려한 본 논문의 결과와는 입구부 랜드와 포켓 내에서의 압력분포가 상당한 차이를 나타내고 있다. 따라서, 본 논문의 결과가 보다 정확할 것으로 생각된다.

Fig. 12에는 포켓의 위치에 따른 압력분포를 비교하



Fig. 10. Stream lines. $h_p=4 \mu\text{m}$

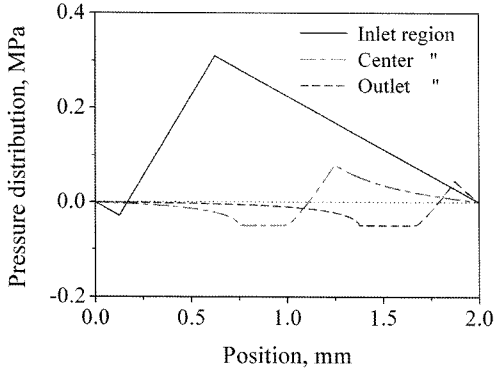


Fig. 12. Comparison of pressure distribution according to pocket position.

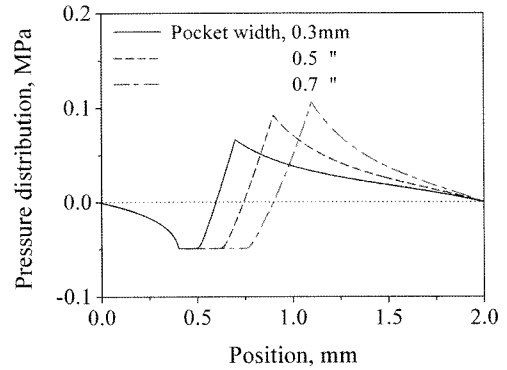


Fig. 14. Comparison of pressure distribution according to pocket width. $a=0.4$ mm

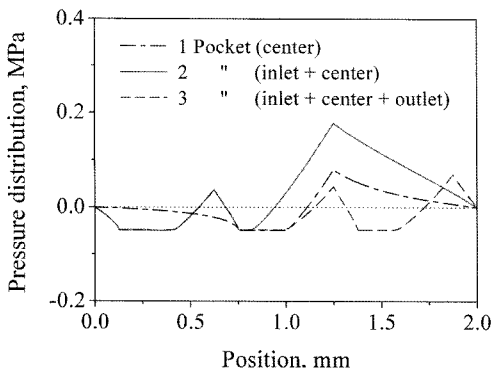


Fig. 13. Comparison of pressure distribution according to number of pockets.

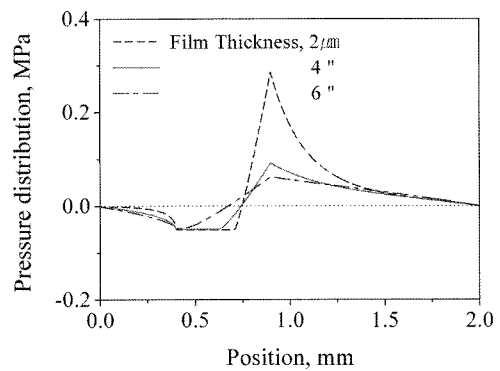


Fig. 15. Comparison of pressure distribution according to film thickness. $a=0.4$ mm

여 나타낸 그림으로 입구부, 중앙부 및 출구부는 순서대로 $a=0.125$ mm, 0.75 mm 및 1.375 mm인 위치에서 포켓이 시작된다(Fig. 2 참조). 이 결과, 포켓의 위치에 따라서 발생압력은 아주 큰 차이를 나타내고 있다. 특히, 입구부에 포켓이 위치할수록 음압상태인 포켓내부로 윤활유가 쉽게 흡입되기 때문에 결과적으로 높은 압력이 발생하고 있다. 이와는 반대로 출구측에 위치할 경우에는 흡입저항으로 인하여 대부분의 윤활면에는 음압이 작용하므로 윤활특성은 포켓이 없는 경우보다도 불리할 것으로 추정된다. 따라서, 베어링면이 거의 평행한 상태로 운전되는 Slider 베어링에서는 베어링의 입구부측에 미세한 포켓을 설계하면 윤활특성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

Fig. 13에는 포켓의 수에 따른 압력분포를 비교하여 나타낸 결과로 각 경우에 대한 포켓 위치는 Fig. 12의 경우와 동일하다. 즉, 포켓이 2개인 경우에 $a=0.125$

mm와 $a=0.75$ mm에서 포켓은 시작된다. 이 결과, 포켓의 수와 위치는 베어링 면에서의 압력분포에 아주 크게 영향을 미치며, Fig. 12에서 제시한 입구부에 위치한 포켓에 의한 압력발생효과도 포켓이 하류에서 추가되면 도리어 감소하고 있다.

Fig. 14와 Fig. 15는 포켓 시작위치가 0.4 mm인 경우에 포켓의 폭과 유막두께의 변화에 따른 베어링 내에서의 압력분포를 각각 나타낸 그림이다. 포켓의 폭이 넓어질수록 캐비테이션 영역은 증가하며 최대발생 압력도 커지고 있다. 특히, 포켓의 깊이가 유막두께와 비슷한 크기일 경우에 압력발생이 제일 크게 나타나는 점이 새로운 결과로 생각되며, 이는 미세 딥플을 가공한 베어링의 개발에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

이상의 결과에서, 포켓의 유무와 이의 깊이, 위치, 폭 및 유막두께는 평행한 Slider 베어링의 윤활특성에 아주 큰 영향을 미침을 알 수가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 무한장 Slider 베어링면에 포켓이 존재하는 경우의 윤활특성을 조사하기 위하여 상용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 이 결과, 포켓의 깊이, 위치, 수, 폭 및 유막두께에 따라서 압력 분포가 아주 크게 변화하였다. 특히, 입구부에 포켓을 설계하면 평행한 조건인 경우에도 베어링의 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 예측되었다. 또한, 본 논문의 방법은 포켓 내에서의 캐비테이션 특성을 보다 정확하게 해석할 수 있기 때문에 기존의 입구부 흡입에 의한 해석방법보다는 윤활특성을 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 다양한 설계변수에 대한 집중적인 추가연구가 요구된다.

후 기

이 논문은 2단계 BK21사업과 두산모트롤(주)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Cameron, A., Basic Lubrication Theory, Longman Green, 1981.
2. Etsion, I., "Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing", *Tribology Letters*, Vol. 17, pp. 733-737, 2004.
3. Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing", *J. of Tribology*, Vol. 127, pp. 248-253, 2005.
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. 유재찬, 박태조, 정호경, "사관식 유압 피스톤 펌프용 Slipper Bearing내의 유동해석", 한국윤활학회 추계학술대회논문집, pp. 259-263, 2007.
11. 박태조, 황윤건, 박경택, "유압 Spool valve의 Groove 형상에 따른 윤활특성 해석", 한국윤활학회 추계학술대회논문집, pp. 150-156, 2007.
12. 박태조, "유압 Spool valve Groove내에서의 유동특성 해석", 유공압시스템학회지, 제4권, 제4호, pp. 45-20, 2007.
13. 유재찬, 박태조, 손자덕, 정호경, "포켓 형상에 따른 무한장 Slider Bearing의 윤활특성 해석", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 101-102, 2007.
14. FLUENT, "FLUENT 6.0 Manual", 2002.
15. Kim, J. S., and Kim, K. W., "Effects of Distance Between Pads on the Inlet Pressure Build-up on Pad Bearings", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 124, pp. 506-514, 2002.