



# 미세 딤플 가공 표면의 수력학적 윤활특성에 대한 수치해석 연구

홍 사 훈,<sup>1</sup> 이 재 봉,<sup>1</sup> 조 민 행,<sup>2</sup> 이 성 혁<sup>\*2</sup>

## NUMERICAL STUDY ON HYDRODYNAMIC LUBRICATION CHARACTERISTICS OF MICRO-DIMPLE TEXTURED SURFACES

S.H. Hong,<sup>1</sup> J.B. Lee,<sup>1</sup> M.H. Cho<sup>2</sup> and S.H. Lee<sup>\*2</sup>

Recently, the manufacturing of micro-cavity by means of laser surface texturing (LST) technique and low friction study by the LST have been in great progress. Most of current works have been dealing with the effect of cavity on friction and wear. The main objective of the present study was to investigate numerically two-dimensional lubrication characteristics of micro-dimple shapes fabricated on solid surfaces, and this study utilized the commercial CFD code (Fluent V.6.3). For the evaluation, preliminary simulation was conducted and numerical predictions were compared with the analytic solution obtained from the Reynolds's equation. Mainly, the present study investigated the influence of dimple depth, pattern shapes, and film thickness on lubrication characteristics related to the reduction of friction. It is found that the existence of micro-dimpled surface makes it possible to substantially reduce the friction forces exerted on the surfaces. In particular, substantial decrease in shear stresses was observed as the lubricant film thickness decreases. For instance, in the case of the film thickness of 0.01 mm, the estimated shear stress decreases up to about 40%. It indicates that the film thickness would be important factor in designing the micro-dimpled surfaces. Furthermore, it was observed that such a optimum dimple depth would be present because the dimple depth larger than the optimum value did no longer affect the reduction in shear stresses.

**Key Words :** 마이크로딤플(Micro-Dimple), 윤활(Lubrication), 레이저 표면 텍스처(Laser Surface Texturing), 마찰(Friction)

### 1. 서 론

산업 현장에서 사용되는 대부분의 기계부품은 금속으로 구성되어 있으며 금속 부품들의 상대적인 운동에 의해 발생하는 마찰 현상에 의한 마모와 마멸이 기계 부품의 수명을 결정하는 중요한 요인이 된다. 이에 대해 동력 기계 부품에서 마찰에 의한 에너지 손실을 절감하기 위한 연구가 여러 가지 방법으로 이루어지고 있다. 일반적으로 마찰과 마모를 줄이기 위한 가장 보편적인 방법은 윤활막에 의한 방법으로 상대운동을 하는 두 개의 접촉면을 오일 그리스, 가스 또는 고상 윤활막으로 분리시키는 것이며 그 외의 접촉표면의 연마 또는 코팅하는 방법 등이 있다.

또한 최근 여러 선진국 등에서는 또 다른 에너지 절감 및 마찰 손실 개선 방법의 하나로 표면 가공 방법을 통해 접촉 상대 운동을 하는 윤활 된 기계요소 표면에 일정한 형상을 만들고 이로 인해 마찰 마모를 줄이는 표면텍스처링(surface texturing)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 표면 텍스처링기술은 윤활계를 매개로 상대 운동을 하는 두 표면 사이의 윤활 특성을 개선할 것을 목적으로 두 표면 중 적어도 한 표면에 딤플(dimple)이나 그루브(groove)같은 요철을 다수로 가공하는 것을 말한다. 이러한 표면텍스처링의 가공방법에는 vibrorolling, reactive ion etching(RIE), LIGA, laser surface texturing(LST) 등이 있다. 특히, LST기법은 비교적 빠르고 간단한 공정으로 표면 가공이 가능하며 레이저의 강도를 조절함으로써 딤플의 크기 및 형상 제어가 가능한 장점을 가지고 있어 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다[1].

미세 딤플의 효과에 대한 연구는 주로 실험을 통해 이루어지고 있다. Hamilton 등[2]은 두 면이 평행한 기계적 밀봉

1 중앙대학교 대학원 기계공학부

2 정회원, 중앙대학교 기계공학부

\* Corresponding author, E-mail: shlee89@cau.ac.kr

(mechanical seal)에 대한 연구를 진행하여 미세 딥플에 대한 효과를 확인하였다. 미세딥플의 효과에 대한 발표 후 Anno 등에 의해 평행 운동을 하는 기계적 밀봉 특성에 대한 연구가 주로 진행 되었다[3]. Etsion 등[4]은 규칙적으로 미세 구멍이 배열된 기계적 밀봉 특성에 대해 LST가공을 통한 실험을 수행하여 반구형의 딥플 형상이 윤활 성능 개선을 위한 최적의 표면 텍스처링 형상이라고 하였으며, 딥플 직경에 대한 깊이의 비를 주요 변수로 제시하였다. 이후 딥플 및 그루브 형상의 최적화를 위한 연구 및 재료에 따른 효과 등에 대한 연구가 지속적으로 진행 중에 있다. Costa 등[5]은 LST가공을 이용한 chevron 형상을 가지는 그루브에 대한 효과를 연구하였다. 또한 Borghi 등[6]은 LST가공 후 표면 질화 처리된 스틸의 마찰특성을 연구하였으며 Guo[7]는 AISI O<sub>1</sub> 표면의 마찰특성을 상대운동 속도에 따라 관찰하였다. 국내 연구 동향으로는 채영훈 등[8]이 혼합 윤활조건 및 수력학적 영역에서의 마이크로 딥플 패턴의 밀도에 따른 마찰거동을 연구하였고 또한 딥플 간격 및 크기에 대한 마찰특성을 연구를 하여 설계인자를 도출하였다. 또한 김성기 등[9]은 윤활제로서 그리스를 사용하여 미세딥플의 영향을 분석하였다.

미세딥플 형상에 대한 실험적 방법을 통한 연구와 함께 수치 해석을 이용한 연구가 진행 중에 있으며 주로 Reynolds 방정식을 이용한 개별 코드에 의한 연구가 대부분에 있다. Ren 등[10,11]은 딥플 및 그루브 형상 및 밑면의 형상에 따른 효과를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 통한 최적의 조건에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Rahmani 등[12]은 딥플의 수와 깊이에 따른 효과를 분석하였으며 Ighil 등[13]은 저널 베어링 내에 반구 형상의 딥플을 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다 또한 Marian 등[14]은 트러스트 베어링에 대해 에너지 방정식을 이용하여 미세딥플 효과를 분석하고 수력학적 영역에서의 마찰 표면의 온도분포 특성을 해석하였다.

최근 수치해석 연구는 평행면 사이의 윤활제 유동에 대한 분석과 캐비테이션현상에 대한 해석을 위하여 CFD기법을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Sahlin 등[15]은 반구 형상의 딥플에 따른 효과 및 Re수에 따른 효과를 분석하였으며 Mitidieri 등[16]은 딥플의 깊이 및 위치에 따른 효과를 분석하고 전단응력과 압력의 영향을 연구하여 마찰계수로 나타내어 딥플의 효과를 분석하였다. Almqvist 등[17]은 탄성유체윤활영역(elastohydrodynamic)에서 CFD기법과 Reynolds 방정식을 이용한 연구와의 차이를 비교 분석하였으며 박상조 등[18]은 딥플의 깊이와 캐비테이션의 발생이 압력, 속도 및 밀도에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 평행 운동하는 두 면의 마찰 특성을 상용 수치 해석 프로그램인 Fluent Ver. 6.3을 이용하여 미세 딥플 효과에 윤활제의 두께가 미치는 영향을 분석하였으며 딥플의

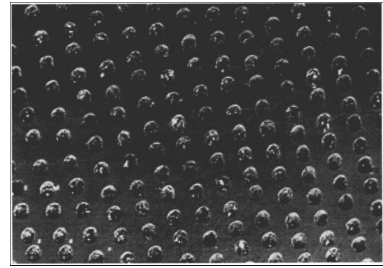


Fig. 1 LST regular micro-surface structure with microdimples

깊이가 마찰 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 본 논문의 타당성을 검증하기 위하여 Reynolds 방정식의 결과 및 기존 해석 결과와 상호 비교하였다.

## 2. 지배방정식 및 해석 조건

Reynolds 방정식은 윤활막 두께와 압력에 대한 방정식으로 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식에 의해 유도될 수 있으며 다음과 같다[19].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = U \frac{\partial \rho h}{\partial y} + h \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

위 식에서  $\rho$ 는 윤활제의 밀도,  $h$ 는 윤활제의 두께를 나타낸다. 또한  $\eta$ 는 윤활제의 점성계수이며,  $U$ 는 상대면의 이동 속도를 나타낸다.

본 연구는 윤활제의 유동을 분석하기 위하여 연속 방정식과 운동량 방정식을 사용하였으며, 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다[20].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

수치해석은 범용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT Ver. 6.3을 이용하였으며, 각 조건별 해석시간은 2.0GHz, 16GB RAM (Intel Xeon CPU Quad core Processor) 사양의 컴퓨터를 병렬 연결하여 약 10 분의 처리 시간이 소요되었다.

해석을 위한 형상은 격자 전용 프로그램인 ICFM-CFD Ver. 10을 이용하였으며, 전체 길이  $L$ 은 5 mm, 딥플의 깊이  $D$ 와 폭  $W$ 는 각각 0.05 mm로 설정하였다. 윤활제의 물성은 밀도

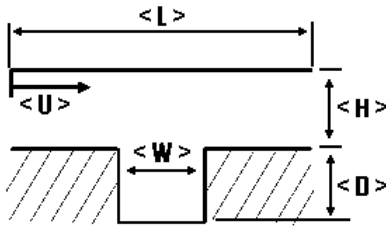


Fig. 2 A Schematic of 2-dimensional single dimple shape

를  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 점성을  $0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  로 설정하였으며 베어링의 입구와 출구는 대기압으로 처리하였다. 두 면의 평행운동 속도  $U$ 는  $1.0 \text{ m/s}$  이며 해석 형상은 Fig. 2와 같다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 CFD기법의 타당성을 검증하기 위하여 본 연구의 수치해석 결과와 기존의 Reynolds방정식을 이용한 연구결과[21]를 압력 분포에 대해 상호 비교 한 것으로 해석 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 4는 미세 덩플이 있는 형상에 대해 기존의 CFD 해석결과와 본 연구에서 사용한 CFD 결과를 상호 비교한 것이다. 그림에서와 같이 압력과 전단응력의 경우, 덩플이 있는 영역에서 급격히 감소함을 알 수 있으며 기존의 해석결과와도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 덩플의 효과에 윤활제의 두께가 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 덩플 크기에 대해 윤활제의 두께를 변경하면서 평행 이동하는 면의 전단응력을 나타낸 그림이다. 윤활제의 두께는 각각  $0.01 \text{ mm}$ ,  $0.005 \text{ mm}$ ,  $0.001 \text{ mm}$ 으로 설정하였다. 전단응력은 덩플의 입구와 출구에서 상승하였다가 덩플의 중앙에서 급격히 떨어지는 경향을 보이고 있으며 이것은 유로의 급격한 확장으로 인한 압력의 집중이 덩플의 입구와 출구에 일어나기 때문으로 사료된다.  $0.01 \text{ mm}$ 의 경우 상승부와 하락부의 변화량이 거의 비슷함을 볼 수 있지만 이에 비해  $0.005 \text{ mm}$ ,  $0.001 \text{ mm}$ 는 상승부에 비해 덩플의 중앙 부분의 하락부에서 전단응력이 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 6은 각 깊이에 대한 항력(drag force)를 나타낸 것이다.  $0.01 \text{ mm}$ 의 경우, 덩플에 의한 항력 감소효과는 거의 없었으며  $0.005 \text{ mm}$ 의 경우 역시 약간의 항력 감소효과는 있으나 상대적으로 매우 작게 나타난다. 이에 비해  $0.001 \text{ mm}$ 의 경우 약 40%의 항력 감소 효과를 확인할 수 있다.

Fig. 7은 동일한 깊이의 비 ( $H/D$ )에 대해 서로 다른 윤활제의 두께 및 덩플의 깊이에 대한 해석 결과로서 깊이의 비는 1:50 으로 고정하였다. 해석 결과  $0.01 \text{ mm}$ 의 경우 전단응력 감소가 거의 없었지만  $0.001 \text{ mm}$ 의 경우 전단응력이 크게 감

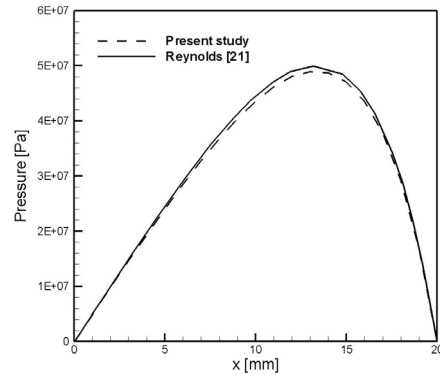


Fig. 3 Comparison between the present results and Reynolds equation's solution for pressure distribution

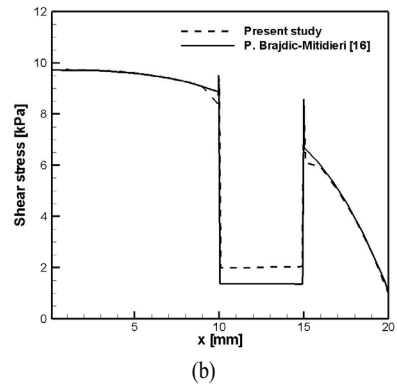
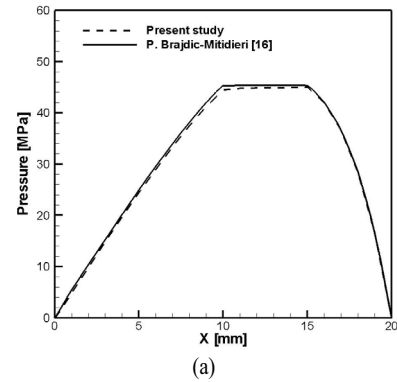
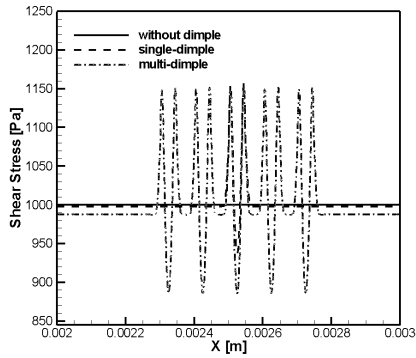


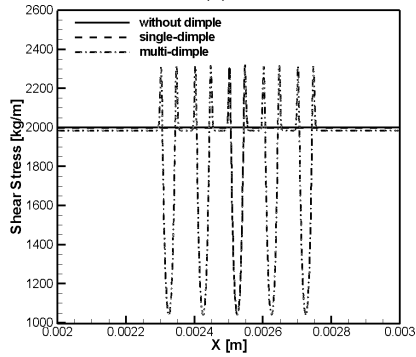
Fig. 4 Comparison of the estimated pressure and shear stress with the previous study[16]

소하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 덩플 효과는 윤활제의 두께에 크게 영향을 받고 있으며 수력학적 윤활영역보다 단성유체 윤활영역으로 갈수록 그 효과가 커질 것으로 예측된다.

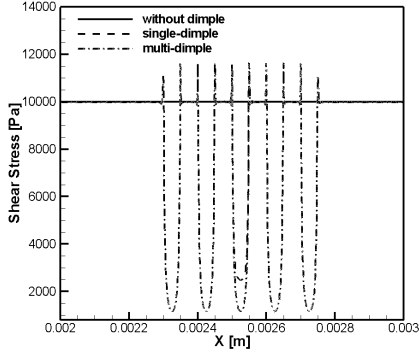
Fig. 8은 덩플의 깊이에 따른 평행이동 면의 전단응력을 보여 준다. 덩플의 깊이가 커짐에 따라 전단응력은 감소함을



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Estimated shear stress distributions for different lubrication thickness ((a):0.01 mm, (b):0.005 mm, (c):0.001 mm)

알 수 있으며 두께가 깊어짐에 따라 감소율이 작아짐을 확인할 수 있다.

또한, 0.005 mm 이상에서는 깊이에 따른 전단응력의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 딤플의 효과는 일정 깊이 이상에서는 더 이상 개선되지 않음을 알 수 있으며 미세딤플 가공 시 최적 효율을 위한 최적 깊이에 대한 설계인자가 반드시 고려되어야 함을 알 수 있다.

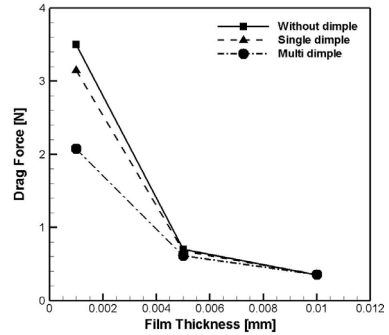


Fig. 6 Estimated drag force with respect to the lubrication thickness with and without dimples

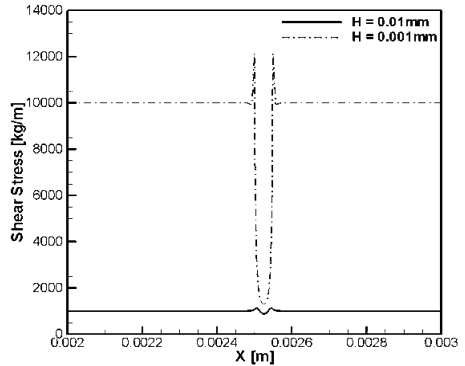


Fig. 7 Variation of shear stress for different lubricant heights

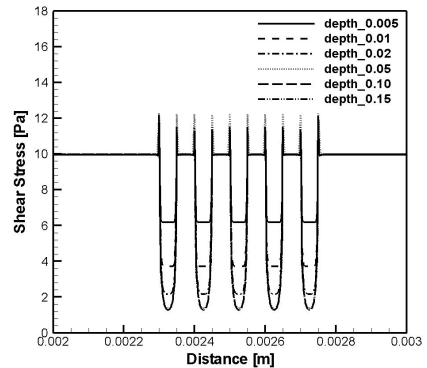


Fig. 8 Influence of dimple depth on shear stress distribution

### 4. 결론

본 연구에서는 미세 딤플 표면의 윤활특성에 대한 전산유체해석을 수행하여 표면 마찰에 미치는 윤활 두께의 영향과 딤플 깊이에 따른 마찰 저감 효과에 대해 분석하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.



- (1) 미세 딥플은 이동하는 면의 전단응력을 감소시켜 마찰 특성을 개선시키는 효과를 가지고 있으며 그 효과는 윤활제의 두께에 의해 크게 영향을 받는다. 특히 윤활제의 두께가 0.001 mm일 경우 약 40%의 drag force를 감소시키는 효과를 확인하였다.
- (2) 전단응력은 딥플의 깊이가 깊어질수록 작아지지만 그 효과는 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 일정 깊이 이상에서는 더 이상 전단응력 감소효과가 개선되지 않음을 알 수 있었다.

## 후 기

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

## 참고문헌

- [1] 2005, Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing," *ASME Journal of Tribology*, Vol.127, pp.248-253.
- [2] 1966, Hamilton, D.B., Walowit, J.A. and Allen, C.M., "A Theory of Lubrication by Micro asperities," *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol.88, No.1, pp.177-185.
- [3] 1968, Anno, J.N., Walowit, J.A. and Allen, C.M., "Micro asperity Lubrication," *ASME Journal of Lubrication of Technology*, Vol.90, No.2, pp.351-355.
- [4] 1996, Etsion, I. and Burstein, L., "A Model for Mechanical Seals with Regular Micro Surface Structure," *Tribology Transaction*, Vol.39, No.3, pp.677-683.
- [5] 2007, Costa, H.L. and Hutchings, I.M., "Hydrodynamic Lubrication of Textured Steel Surfaces under Reciprocating Sliding Conditions," *Tribology International*, Vol.40, pp.1227-1238.
- [6] 2008, Borghia, A., Gualtieri, E., Marchetto, D., Moretti, L. and Valeria, S., "Tribological Effects of Surface Texturing on Nitriding Steel for High-Performance Engine Applications," *Wear*, Vol.265, pp.1046-051.
- [7] 2009, Guo, K.W., "Effect of Sliding Speed on Tribological Characteristics of Different Surface Textures on AISI O<sub>1</sub> Steel Irradiated by Nd:YAG Pulsed Laser," *Ironmaking and Steelmaking*, Vol.36, No.1, pp.63-74.
- [8] 2005, 채영훈, 김석삼, "혼합 및 유체윤활 하에서 Micro-Scale Dimple Pattern의 마찰특성," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.22, No.2, pp.188-193.
- [9] 2008, 김성기, 송근철, 김상범, 채영훈, "그리스 윤활 하에서 표면요철의 영향," *The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers*, Vol.24, No.5, pp.234-240.
- [10] 2007, Ren, N., Nanbu, T., Yasuda, Y., Zhu, D. and Wang, Q., "Micro Textures in Concentrated-Conformal-Contact Lubrication : Effect of Distribution Patterns," *Tribology Letters*, Vol.28, pp.275-285.
- [11] 2008, Nanbu, T., Ren, N., Yasuda, Y., Zhu, D. and Wang, Q., "Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication : Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion," *Tribology Letters*, Vol.29, pp.241-252.
- [12] 2007, Rahmani, R., Shirvani, A. and Shirvani, H., "Optimization of Partially Textured Parallel Thrust Bearings with Square-Shaped Micro-Dimples," *Tribology Transactions*, Vol.50, pp.401-406.
- [13] 2007, Ighil, N.T., Maspeyrot, P., Fillon, M. and Bounif, A., "Effects of Surface Texture on Journal-Bearing Characteristics under Steady-State Operating Conditions," *Engineering Tribology*, Vol.221, pp.623-633.
- [14] 2007, Marian, V.G., Kilian, M. and Scholz, W., "Theoretical and Experimental Analysis of a Partially Textured Thrust Bearing with Square Dimples," *Engineering Tribology*, Vol.221, pp.771-778.
- [15] 2005, Sahlin, F., Sergei, B., Glavatskih, Almqvist, T. and Larsson, R., "Two-Dimensional CFD-Analysis of Micro-Patterned Surfaces in Hydrodynamic Lubrication," *ASME Journal of Tribology*, Vol.127, pp.96-102.
- [16] 2005, Mitidieri, P.B., Gosman, A.D., Ioannides, E. and Spikes, H.A., "CFD Analysis of a Low Friction Pocketed Pad Bearing," *ASME Journal of Tribology*, Vol.127, pp.803-812.
- [17] 2004, Almqvist, T., Almqvist, A. and Larsson, R., "A Comparison between Computational Fluid Dynamic and Reynolds Approaches for Simulating Transient EHL Line Contacts," *Tribology International*, Vol.37, pp.66-69.
- [18] 2008, 박태조, 황운건, "미세 딥플의 깊이가 Laser Texturing한 평행 스러스트 베어링의 윤활특성에 미치는 영향," *한국 윤활학회 추계 학술대회 논문집*, pp.83-88.
- [19] 1994, Hamrock, B.J. Schmid, S.R. and Jacobson, B.O., *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill.
- [20] 2006, Fluent Inc., *FLUENT 6.2 User's Guide*.
- [21] 1981, Cameron, A. and Ettles, C.M.Mc., *Basic Lubrication Theory 3rd*, Ellis Horwood.