

미세 딤플 가공 표면의 수력학적 윤활특성에 대한 수치해석

홍사훈,¹ 이재응,² 조민행,² 이성혁^{*2}

NUMERICAL INVESTIGATION ON HYDRODYNAMIC LUBRICATION CHARACTERISTICS OF MICRO DIMPLE TEXTURED SURFACES

Sa Hoon Hong,¹ Jaeung Lee,² Min Haeng Cho² and Seong Hyuk Lee^{*2}

This study deals with the numerical investigation on two-dimensional lubrication characteristics of micro-dimple shapes fabricated on solid surfaces by using the commercial CFD code (Fluent V.6.3) to examine the influence of micro dimple depth and width on the reduction in friction under the sliding plate condition. In addition, single and multiple dimple arrays are simulated, all for a fixed area fraction of dimple on the surface. As a result, it is found that the existence of micro-dimpled surface makes it possible to substantially reduce the friction forces exerted on the surfaces, and such an optimum dimple depth would be present because the dimple depth larger than the optimum value did no longer affect the reduction in shear stresses, indicating that the reduction of friction is likely to be associated with inner flows of lubricant inside dimples. Moreover, it is observed that at the fixed area fraction, the friction reduction increases with the increase of dimple diameter.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 미세 딤플(Micro Dimple), 윤활특성(Lubrication), 마찰 감소(Friction Reduction)

1. 서 론

산업 현장에서 사용되는 대부분의 기계부품은 부품들 간의 상대적인 운동에 의해 발생하는 마찰 현상에 의한 마모와 마멸이 부품의 수명을 결정하는 중요한 요인이 된다. 최근, 동력 기계 부품에서 마찰에 의한 마찰에너지 손실을 절감하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며 고부가가치의 부품 신뢰성을 향상시키기 위한 방법 중 하나로 인식되고 있다. 일반적으로 마찰과 마모를 줄이기 위한 가장 보편적인 방법은 윤활에 의한 방법으로 상대운동을 하는 두 개의 접촉면을 오일, 그리스, 가스 또는 고상 윤활막으로 분리시키는 것이며 그 외에 접촉표면의 연마 또는 코팅하는 방법 등이 있다. 또한 최근 부각되고 있는 마찰 마모 저감을 통한 수명 향상 방법 중의 하나로서 미세가공기법을 이용한 패턴화된 형상을 표면위에 제작함으로써 마찰 마모를 줄이는 표면텍스처링

(surface texturing)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 표면 텍스처링 가공 방법 중 레이저 텍스처링 기법은 비교적 빠르고 간단한 공정으로 표면 가공이 가능하며 레이저의 강도를 조절함으로써 딤플 크기 및 형상 제어가 가능한 장점을 가지고 있어 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다[1]. Fig. 1은 레이저 표면 텍스처링을 이용한 가공 형상에 대한 예를 보여준다. 최근까지 표면 텍스처링이 윤활에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. Hamilton 등[2]은 평평한 두 개의 평판내의 기계적 밀봉(mechanical seal)에 대한 실험 연구를 진행하여 미세 거칠기 형태에 의한 표면 텍스처링 효과를 분석하였다. Etsion과 Burstein[3]은 규칙적인 미세 구멍 배열에 대한 기계적 밀봉 특성을 분석하기 위해 레이저 표면 텍스처링 가공을 통한 실험을 수행하였으며, 반구형 딤플 형상이 윤활 성능 개선에 큰 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 그들은 최적의 딤플 직경은 유막의 점성, 내부 압력, 딤플의 면적비 등과 같은 요인에 의해 영향을 받음을 지적하였다. Kavalchenko 등[4]은 딤플이 있는 경우, 윤활영역 변화에 따른 마찰계수 천이영역이 달라짐을 확인하였고, 경계윤활(boundary lubrication) 영역에서 매우 큰 효과가 나타남을 관찰하였다. 채영훈 등[5]은 혼합 윤활조건 및 수력학적 영역에서 마이크로 딤플 밀도에 따른 마찰특성을 연구하였고 하중 범위에 따

접수일: 2009년 9월 7일, 수정일: 2009년 11월 30일,
계재확정일: 2009년 12월 4일.

1 학생회원, 중앙대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 중앙대학교 기계공학부

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

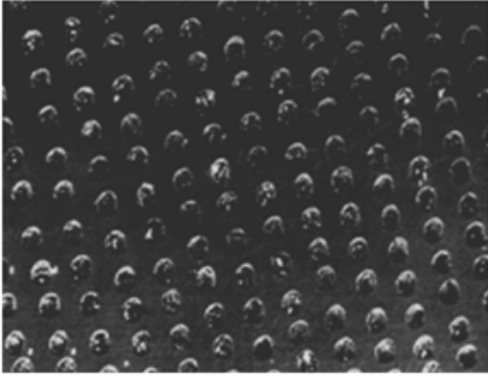


Fig. 1 Laser surface texturing structure with micro-dimples[13]

라 딤플의 최적 밀도가 존재함을 지적하였다.

최근 미세 딤플 형상에 대한 유허 특성에 대한 연구는 실험 연구와 함께 수치해석 연구가 활발하게 진행 중이며 주로 레이놀즈(Reynolds) 방정식을 이용한 해석연구가 대부분이다. Ren 등[6,7]은 딤플과 그루브 배열 및 밀면 형상이 내부 압력과 유막 두께에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Rahmani 등[8]은 딤플의 수와 깊이, 딤플 길이비와 높이비에 따른 최적화 유허조건을 도출하였으며, Ighil 등[9]은 저널 베어링 내에 반구 형상의 딤플이 존재하는 경우에 대한 수치해석을 수행하여 딤플이 유막두께와 압력 분포, 토크 등에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 최근 표면 텍스처링 관련 수치해석 연구는 평행면 사이의 유막 유동에 대한 분석과 캐비테이션(cavitation) 현상에 대한 해석을 위하여 전산유체역학을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Sahlin 등[10]은 반구 형상의 딤플에 따른 효과 및 레이놀즈수에 따른 효과를 분석하여 레이놀즈수 및 딤플 폭이 커질수록 지지하중이 커지는 것을 발표하였으며, Mitidieri 등[11]은 딤플의 깊이 및 위치에 따른 딤플의 효과를 전산해석 기법을 이용하여 분석하고 두 운동면이 평행에 가까울수록 딤플 내의 압력저하에 의해 공동(cavitation)현상이 발생함을 확인하였다. Fowell 등[12]은 딤플 내의 압력이 입구 압력보다 낮아질 경우 두 구역의 압력 차에 의해 딤플의 유허액 흡입 효과가 발생하며, 이로 인해 유허액 유량이 증가하여 지지압력이 증가하는 딤플 효과를 언급한 바 있다. 그러나 수치해석에서 주로 사용되고 있는 레이놀즈 방정식은 관성력을 무시하는 가정을 가지고 있으며 미세 딤플과 같이 급격한 형상 변경이 있는 경우에는 정확한 해석이 어려울 수 있다. 또한 레이놀즈 방정식은 두 미끄럼면이 평행 운동하는 경우 내부 압력 해석과 국부 유동 특성에 대한 해석이 어려울 수 있다. 이 외에도 공동 현상에 미치는 딤플의 영향을 고려하는 경우, 딤플 형상과 유허유 종류에 따라 공동현상의 발생이 제한적이기 때문에 일반적으로 딤플

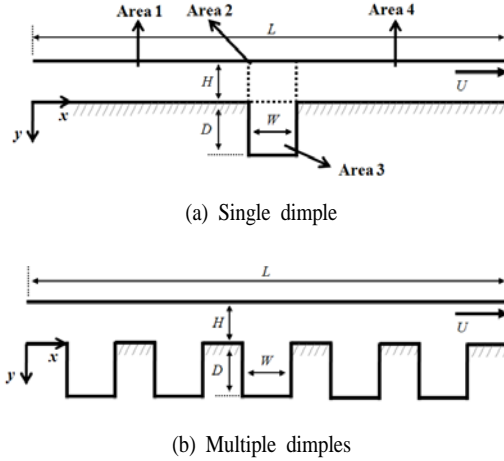


Fig. 2 Sketch illustrating multiple dimple shapes on textured surfaces for calculation

효과를 구체적으로 설명하는 데에 다소 한계가 있다. 본 연구는 상용화된 전산유체역학 해석프로그램인 FLUENT(Ver. 6.3)을 이용하여 미세 딤플을 가지는 표면의 유체의 거동 특성을 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식에 기초하여 해석하고 딤플 형상 변화 및 배열 변화에 따른 유허특성과 전단응력의 변화 등을 분석하였다.

2. 수치해석

본 논문에서는 딤플을 가지는 표면 형상에 대한 유막의 유동을 분석하기 위하여 다음과 같은 연속방정식과 운동량방정식을 사용한다[14].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g} \tag{2}$$

여기에서, P, τ , 그리고 ρ 는 유허유의 압력, 전단응력 그리고 밀도를 나타낸다. 상기 방정식들은 미소 제어체적을 기반으로 하는 유한체적법을 사용하여 차분화하고 정상상태의 경우에 대해 해석을 수행하였다. 또한, 대류항의 경우는 1차 상류도식을 사용하여 해석하였다. 본 연구에서는 입구와 출구 조건을 대기압으로 설정하였으며 작동유체에 대하여 레이놀즈수를 고려하여 층류조건으로 설정하였고 외벽 조건에 대하여 점착조건을 설정하였다. 속도와 압력의 연결은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며 격자수는 조건 별 약 30,000 개의 cell로 구성하였다. 본 연구를 위하여 해석 형상의 구성은

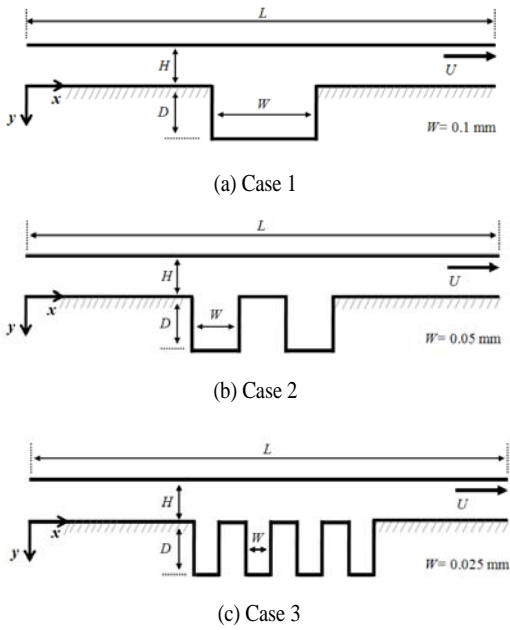


Fig. 3 Schematic of different type of textured surfaces: effect of different dimple width on lubrication

Pro-Engineer Wildfire(Ver. 2.0)를 사용하였으며 격자는 ICEM-CFD(Ver. 11)을 이용하였고 범용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT(Ver. 6.3)을 이용하여 계산하였다. 각 조건 별 해석시간은 2.0 GHz, 16 GB RAM (Intel Xeon CPU Quad core Processor) 사양의 컴퓨터를 이용하여 약 10분의 처리 시간이 소요되었다.

Fig. 2는 딴플의 깊이(D)에 따른 효과를 분석하기 위한 2차원 해석 형상이다 해석 형상은 전체 길이가 L이며, 중앙부에는 폭과 깊이가 각각 W와 D인 딴플을 설치하였다. 딴플의 깊이는 0.005 mm에서 0.15 mm까지 변경하면서 수치해석 하였다. 모든 경우에 대해 상판의 운동 속도는 1 m/s 이며 유막의 점성은 0.01 Pa·s로 설정하였다[11]. 해석을 위한 형상 크기와 조건은 Table 1과 같다. 또한 본 논문에서는 딴플의 폭(W) 변화가 딴플내의 유동변화와 마찰계수 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같이 고정된 딴플의 면적비에 대해

Table 1 Specification of dimple geometry, sliding velocity, and viscosity of lubricant

Total length	L (mm)	0.5
Fluid film thickness	H (mm)	0.001
Depth of a dimple	D (mm)	0.005~0.15
Width of a dimple	W (mm)	0.05
Velocity of upper plate	U (m/s)	1.0
Fluid viscosity	μ (Pa·s)	0.01

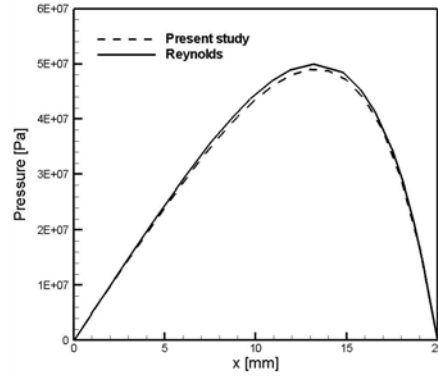


Fig. 4 Comparison between the present results and Reynolds equation's solution for pressure distribution

서 다양한 딴플의 폭 변화에 따른 해석을 수행하였으며 이때 사용된 해석 조건은 Table 2와 같다. 본 논문은 해석 격자의 민감도를 파악하기 위해 딴플(예: Fig. 2(a)의 Area 1~4)의 영역별 격자개수를 변화시키면서 해석을 수행하였고, 결과적으로 Area 1과 4의 경우, 800×10, Area 2는 100×10, 그리고 딴플 내부인 Area 3은 100×100로 조밀한 격자를 사용하였다.

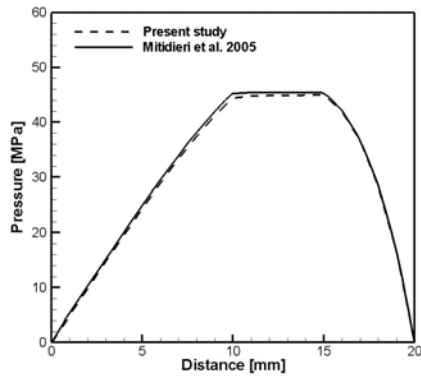
3. 결과 및 고찰

본 논문에서 사용한 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 딴플이 없고 경사가 있는 형상에 대해 레이놀즈 방정식을 이용하여 이론적으로 해석한 결과와 본 논문에서 예측한 압력 결과를 상호 비교하였다. Fig. 4와 같이 본 논문에서 예측된 결과와 레이놀즈 방정식에 의해 예측된 결과는 거의 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 본 논문에서는 해석 형상 내에 딴플이 존재하는 경우에 대해 기존 연구[12]와 압력 및 전단응력에 대해 비교 분석하였다. Fig. 5는 기존 연구와 본 연구에서 예측된 압력과 전단응력의 분포를 나타내는 그림으로 그림에서와 같이 두 연구의 결과가 서로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 상기 결과를 토대로 본 논문에서 수행한 수치해석 모델은 타당하다고 사료된다.

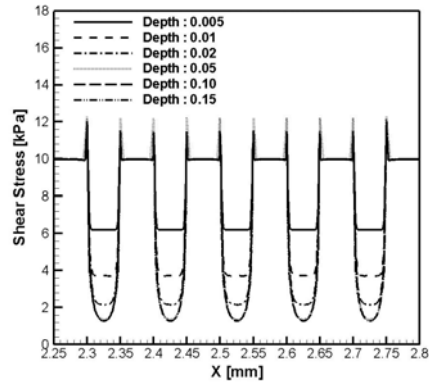
본 논문에서 해석 대상으로 한 윤활 영역은 수력학적 영역

Table 2 Simulation conditions for different dimple width at the fixed area ratio

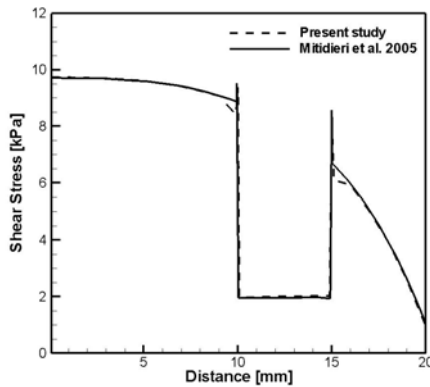
	No. of dimples	W (mm)	H = 0.001 mm D = 0.05 mm
Case 1	1	0.1	
Case 2	2	0.05	
Case 3	4	0.025	



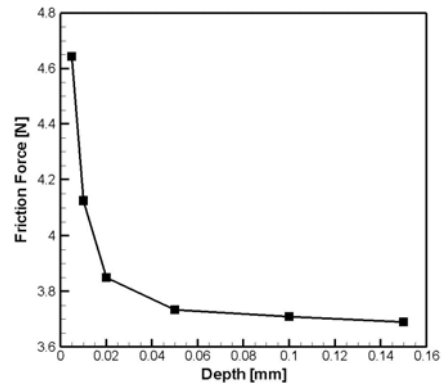
(a) Pressure



(a)



(b) Shear stress



(b)

Fig. 5 Comparison of the estimated pressure and shear stress with the previous study[11]

Fig. 7 Influence of dimple depth on shear stress and friction force for the multiple dimples

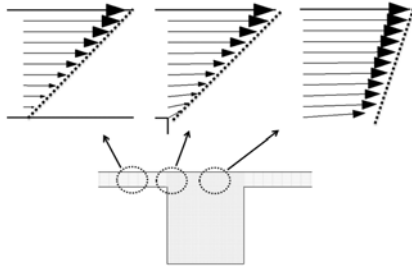


Fig. 6 Velocity profiles near the surface for different regions

으로 유막에 의해 두 상대면이 완전히 분리되어 있는 상태이며 유막의 거동 특성에 의해 마찰 특성이 결정된다. 마찰계수는 유막에 작용하는 하중과 마찰력의 크기에 의해 결정되며 마찰력은 운동면에 작용하는 전단응력을 적분하여 예측할 수 있다. 또한, 유막 두께와 운동면의 속도는 일정하게 유지하였

으며 유막이 받는 하중은 일정하게 유지된다고 가정하였다. 따라서 마찰계수는 운동면에 작용하는 마찰력에 의해 결정이 되며 마찰력의 크기 및 전단응력을 비교함으로써 딤플의 효과를 분석하였다.

Fig. 6은 2차원 단일 딤플 주위의 유동 특성을 보여준다. 딤플 앞부분 영역에서는 상판의 유동방향 운동으로 인해 Couette 유동의 전형적인 특성을 보여주며, 이 영역의 경우는 상판의 속도에 비례하여 마찰력이 증가한다. 딤플의 입구와 달리 딤플의 중앙부분에서는 전단변형율이 상대적으로 작게 나타나며 딤플 내의 유체와 연속적인 변형을 일으키며 전단응력을 작게 할 것으로 사료된다. Fig. 7은 딤플의 깊이에 따른 평행운동 면의 전단응력 및 마찰력을 보여준다. 그림에서 딤플의 깊이가 증가함에 따라 전단응력과 마찰력은 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 딤플 깊이가 0.05 mm 이상인 경우, 딤플 깊이에 따른 마찰력 감소효과가 더 이상 나타나지 않음을 알 수 있다. 따라서 딤플의 효과는 일정 깊이 이상에서는

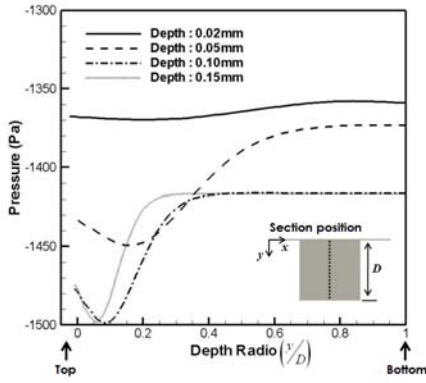


Fig. 8 Influence of dimple depth on pressure distribution

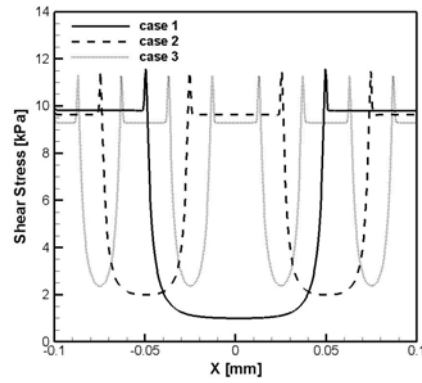


Fig. 10 Influence of dimple width on shear stress distribution

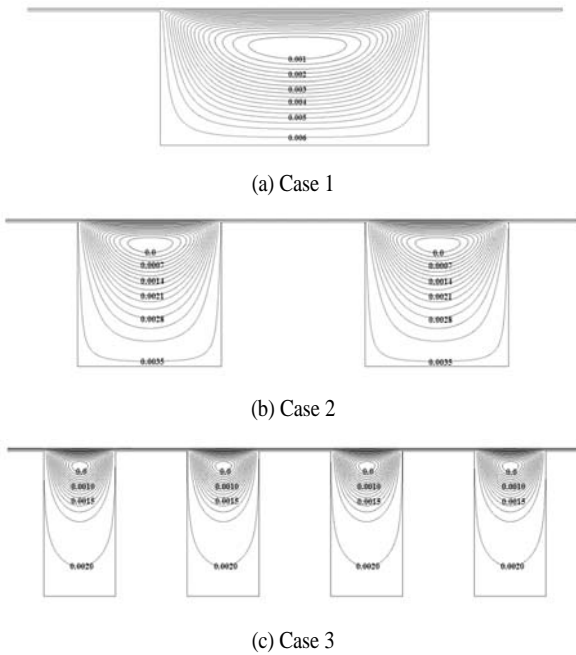


Fig. 9 Contours of stream functions inside the dimples for cases

더 이상 개선되지 않음을 알 수 있으며 미세 디ンプル 가공 시 가공 효율을 위하여 작동 조건에 따른 최적화된 디ンプル 깊이를 설계하는 것이 필요하다.

Fig. 8은 디ンプル 중심에서 깊이에 따른 압력변화를 나타낸다. 그래프의 x 축은 디ンプル 전체 깊이에 대한 y 방향의 진행비를 나타내며 0.1~0.2의 디ンプル 깊이 비율의 경우, 음의 기울기가 나타나고 0.2 이상에서는 양의 기울기가 나타난다. 디ンプル 깊이 방향으로 나타나는 압력 변화로 인해 디ンプル 내 유체 유동이 발생하며 음의 기울기와 양의 기울기가 교차되는 영역에서 유체 회전이 발생하여 유체역학적으로 잘 알려진 캐비티 유

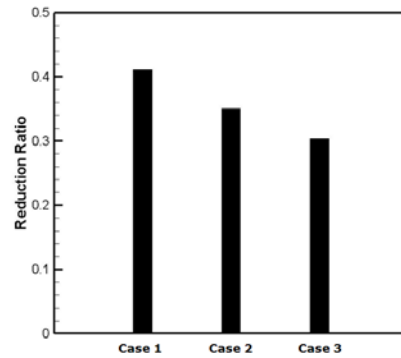


Fig. 11 Comparison of the friction reduction ratio for cases 1~3

동의 전형적 특성이 나타난다. 또한 압력은 일정 깊이 이상에서는 변화가 없기 때문에 디ンプル 내의 유동은 압력 변화가 있는 일정 깊이 내에서만 회전하는 유동을 가지며 디ンプル의 효과가 일정 깊이 이상으로 전파되지 않을 것으로 예측된다.

Fig. 9는 디ンプル의 폭이 유동함수의 크기 및 마찰력에 미치는 영향을 분석하기 위해 디ンプル의 면적비를 고정한 상태에서 디ンプル의 폭을 변화시켰을 경우, 유동함수의 변화를 예측한 결과이다. 디ンプル의 폭이 감소할수록 디ンプル의 깊이와 무관하게 발생하는 유동함수의 크기는 감소하며 전반적으로 회전 유동 영역이 감소함을 확인 할 수 있다.

Fig. 10은 유동함수의 크기가 전단응력에 미치는 영향을 보여주는 그림이다. 유동함수의 크기가 가장 크게 나타났던 case 1의 경우에서 가장 낮은 전단응력이 나타났으며 이는 case 1에서 가장 많은 체적 유량 변화가 발생하여 디ンプル이 존재 하는 구역에서의 속도 구배를 크게 낮추기 때문으로 사료 된다. 한편 유동 함수 크기가 가장 작았던 case 3의 경우 전단응력 감소효과가 case 1에 비해 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 딤플 폭에 따른 마찰력 감소비를 나타내는 그래프이다. 여기서 마찰력 감소비(friction reduction ratio, R)는 딤플이 없는 경우의 마찰력에 대한 딤플이 존재하는 경우 발생하는 마찰력의 감소비로서 다음과 같이 정의된다.

$$R = 1 - \frac{F_D}{F_{D0}} \quad (3)$$

딤플에 의한 마찰력 감소효과는 case 1의 경우 case 3에 비하여 약 10 % 정도 더 개선되는 것으로 예측되었고 딤플 깊이보다는 딤플의 폭에 대한 변화가 마찰력 감소에 더 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 평행 운동하는 두 면의 마찰 특성을 2차원 수치해석 기법을 이용하여 미세 딤플 효과에 의한 윤회특성 변화를 해석하였다. 특히, 딤플의 깊이와 폭 등과 같은 설계 요인의 변화에 따른 마찰 감소효과를 예측하여 미세 딤플 표면에서 발생하는 마찰 감소 메커니즘을 분석하였다. 미세 딤플은 운동하는 면의 전단응력을 감소시켜 마찰특성을 개선시키는 효과를 가지고 있으며 전단응력은 딤플의 깊이가 깊어질수록 작아지지만 그 효과는 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 딤플의 깊이 방향으로 압력변화가 발생되며 음의 압력과 양의 압력이 교차하는 점에서 유체가 회전 유동을 가지는 것을 확인하였다. 딤플의 폭과 깊이 비가 1:1인 경우 이상의 깊이에 대한 경우, 더 이상의 마찰 감소효과가 나타나지 않음을 확인하였다. 딤플에 의한 마찰력 감소효과는 딤플 내 유체의 유동에 의해 크게 영향을 받으며 딤플의 폭이 커질수록 딤플 내의 체적 유량이 증가하며 이로 인해 마찰력의 감소효과가 크게 나타났다. 본 연구결과를 바탕으로 이후 3차원 수치해석 연구를 수행하여 윤회성능에 미치는 3차원 형상의 영향을 분석하는 것이 필요하다고 사료된다.

후 기

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 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] 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.
- [4] 2005, Kovalchenkoa, A., Ajayia, O., Erdemira, A., Fenske, G., and Etsion, I., "The Effect of Laser Surface Texturing on Transitions in Lubrication Regimes during Unidirectional Sliding Contact," *Tribology International*, Vol.38, pp.219-225.
- [5] 2005, 채영훈, 김석삼, "혼합 및 유체윤회 하에서 Micro-Scale Dimple Pattern의 마찰특성," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.22, No.2, pp.188-193.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 2005, Sahlin, F., Glavatskih, S.B., 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.
- [11] 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.
- [12] 2007, 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," *Journal of Tribology*, Vol.129, pp.336-347.
- [13] 2004, Etsion, I., "Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing," *Tribology Letters*, Vol.17, pp.733-734.
- [14] 2006, *FLUENT 6.3 User's Guide*, Fluent Inc.