

돌기접촉을 고려한 거친 표면 위 다양한 패턴 형상에 따른 윤활 특성 연구

김미루*, 이승준**, 정재호***, 이득우****.#

*부산대학교 나노융합기술학과, **부산대학교 BK나노융합기술사업단, ***경남정보대학교 기계계열,
****부산대학교 나노메카트로닉스공학과

Lubrication Properties of Various Pattern Shapes on Rough Surfaces Considering Asperity Contact

Mi-Ru Kim*, Seung-Jun Lee**, Jae-Ho Jeong***, Deug-Woo Lee****,#

*Department of Nano Fusion Technology, Pusan National UNIV., **Division of Nano Convergence Technology, Pusan National UNIV., ***Subdivision of Mechanical engineering, Kyungnam college of Information&Technology, ****Department of Nano Mechatronics Engineering, Pusan National UNIV.

(Received 29 June 2018; received in revised form 4 July 2018; accepted 8 July 2018)

ABSTRACT

Two surfaces that have relative motion show different characteristics according to surface roughness or surface patterns in all lubrication areas. For two rough surfaces with mixed lubrication, this paper proposes a new approach that includes the contact characteristics of the surfaces and a probabilistic method for a numerical analysis of lubrication. As the contact area of the two surfaces changes according to the loading conditions, asperity contact is very important. An average flow model developed by Patir-Cheng is central to the study of lubrication for rough surfaces. This average flow model also refers to a multi-asperity contact model for deriving a modified Reynolds equation and calculating the lubricant characteristics of a bearing surface with random roughness during fluid flow. Based on the average flow model, this paper carried out a numerical analysis of lubrication using a contact model by considering a load change made by the actual contact of asperities between two surfaces. Lubrication properties show different characteristics according to the surface patterns. This study modeled various geometric surface patterns and calculated the characteristics of lubrication.

Key Words : Average Flow Model(평균 유동 모델), Contact Model(접촉 모델), Lubrication Properties(윤활 특성), Asperities Contact(돌기 접촉), Surface Pattern(표면패턴)

1. 서 론

표면의 Tribology 현상에 대한 연구는 마찰감소와

에너지 효율 향상을 위해 오래 전부터 다양한 방법으로 연구가 되어져 왔다¹⁻²⁾. 특히 두 면이 상대 운동을 하여 마찰을 일으키는 베어링, 피스톤 링 등 기계 부품 분야에서는 수명과 효율을 증가시키기 위해 각 요소에 적합한 윤활제를 사용하거나 소재 위에 박막 코팅 또는 표면 패턴가공을 통한 기능성

Corresponding Author : dwoolee@pusan.ac.kr

Tel: +82-55-350-5281, Fax: +82-51-510-3129

을 부여하는 등 기본적으로 마찰을 줄이기 위한 노력이 이루어지고 있다^[3-4]. 그 중 표면에 패턴을 가공하여 마찰을 줄이는 연구는 오래 전부터 미세 딩플(Micro dimple), 미세 홈(Micro groove) 등을 사용하여 실험적인 방법 또는 윤활 이론해석을 통하여 다양하게 이루어지고 있다. 보통 곡면 또는 평면에 다양한 패턴을 가공하고 적합한 장치를 구성하여 마찰현상을 실험적으로 파악하는 것이 가장 정확하고 좋은 방법이다. 하지만 설계자가 효과적인 패턴을 설계하려는 경우 대상 표면의 넓이, 패턴의 크기, 형상, 밀도 등 매우 다양한 조건이 존재하므로 먼저 사용자가 원하는 조건에서 이론해석을 통해 다양한 표면조건에서의 윤활 현상을 예측하기도 한다.

보통 윤활해석 연구는 유막 두께가 두꺼운 베어링의 유체윤활(Hydrodynamic lubrication) 영역이나 표면의 거칠기를 고려하지 않고 이루어지는 경우가 많다. 하지만 실제 표면은 매우 작더라도 표면거칠기(Surface roughness)를 가지고 있으며, 거친 표면의 영향을 고려한 연구도 여러 가지 방법으로 수행되고 있다^[5-6]. 거친 표면의 영향이 고려된 대표적 연구 중에서 Patir & Cheng의 연구는 3차원의 거칠기를 베어링 표면에 적용하여 유체의 압력을 계산할 수 있는 평균 유동 모델(Average flow model)을 제안하였다. 기존 레이놀즈 방정식에서 표면거칠기로부터 발생하는 유동 영향을 유동계수(Flow factor)라는 것으로 도입하여 랜덤한 거칠기를 가지는 표면에 적용 가능한 평균 레이놀즈 방정식(Average Reynolds Equation)을 유도하였고^[7-8], 평균 레이놀즈 방정식을 사용한 여러 연구들이 진행 되어왔다^[9-10]. 하지만 평균 유동 모델은 거친 돌기에 의한 유동 영향만 고려하였고, 혼합윤활(Mixed lubrication) 영역에서 상대 운동하는 두 면에서 발생하는 돌기들의 국부적인 접촉 현상을 무시하는 가정을 적용한다. 표면거칠기의 돌기들이 접촉할 때 발생하는 하중은 접촉 정도에 따라 크게 나타나기 때문에, 실제 측정되는 하중 값에는 유체의 유동에 의한 성분과 표면 돌기들의 물리적 접촉에 의한 응력 성분이 포함되어 있다. 그러므로 윤활해석을 위해서는 두 성분을 모두 고려될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는, D. W. Lee에 의해 선행

연구된 혼합윤활 상태에서 패드면 위의 표면거칠기에 의한 유동이 고려된 평균 유동 모델^[11-12]과 표면 돌기의 국부적인 접촉에 의한 연속적인 하중과 전단 응력이 고려된 돌기 접촉 모델을 사용한 윤활 이론해석 방법^[11]을 제안하고 윤활해석을 수행하였다. 또한 랜덤한 표면거칠기를 가지는 아무 패턴이 없는 기준 표면에서의 윤활효과와 비교하기 위해 다양한 기하학적 형상을 가지는 패턴을 적용하여 패턴의 형상에 따라 어떤 윤활특성과 경향을 가지는지 이론해석을 통해 비교, 분석을 하였다.

2. 표면조건 및 윤활 이론해석

2.1 거친 표면의 적용

본 연구에서는 이론 해석에 적용할 기본 표면으로 매끄러운 표면이 아닌 거친 표면을 적용한다. 따라서 거칠기를 갖는 표면을 생성할 필요가 있으며 대면적의 표면을 생성할 경우 주로 평균 중심값(Mean value), 표준편차(Standard deviation)를 사용한 가우스(Gaussian) 분포 함수를 사용한다. 본 연구에서의 거친 표면은 D. W. Lee에 의해 선행 연구된 표면으로, MATLAB 프로그램으로 생성된 정규분포를 가지는 랜덤한 거칠기의 3차원 표면을 사용하였다. 생성된 거친 표면의 거칠기 조건은 중심값인 Mean value of roughness = 0, 표면거칠기의 Rq로 알려진 Standard deviation(σ) = 1, Kurtosis, $ku = 2.8312$, Skewness, $sk = 0.00374$ 이다^[11-12].

2.2 평균 유동 모델과 돌기 접촉 모델

본 연구에서의 이론해석은 표면 돌기에 의한 유체유동 영향을 기반으로 접촉에 의한 하중의 영향까지 2가지를 고려한다. 따라서 먼저 Patir & Cheng^[7-8]에 의해 제안된 방법인 평균 유동 모델에서 거친 표면의 유동영향을 나타내는 유동계수를 계산하였다. 유동계수는 압력 유동계수(ϕ_x, ϕ_y), 전단 유동계수(ϕ_s), 전단응력 계수(ϕ_{fp}, ϕ_{fs})로 분류된다. 기존의 레이놀즈 방정식의 수식 (1)에서 Patir & Cheng^[7-8]에 의해 유도된 유동계수를 포함한 평균 레이놀즈 방정식은 수식 (2)와 같이 나타난다. 수식 (1)과 (2)에서 P 는 Hydrodynamic pressure, \bar{P} 는

Mean value of hydrodynamic pressure을 나타내고 h_t 는 Local film thickness, \bar{h}_t 는 Mean value of local film thickness, h 는 Nominal film thickness를 나타내며 U 는 이송 속도, μ 는 윤활제의 점성계수를 나타낸다. 수식 (2)에서의 σ 는 표면거칠기의 Standard deviation(=Rq)을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h_t^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h_t^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \frac{U}{2} \frac{\partial h_t}{\partial x} + \frac{\partial h_t}{\partial t} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right) \\ = \frac{U}{2} \frac{\partial \bar{h}_t}{\partial x} + \frac{U}{2\sigma} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}_t}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

압력 유동계수 (ϕ_x, ϕ_y)

$$\phi_x = 0.966 - 0.925e^{-0.652 \frac{h}{\sigma}} \quad (3)$$

$$\phi_y = 1 - 0.391e^{-0.34 \frac{h}{\sigma}} \quad (4)$$

전단 유동계수 (ϕ_s)

$$\phi_s = 1 - e^{-0.5144 \left(\frac{h}{\sigma} - 2.99 \right)} \quad \text{at } \frac{h}{\sigma} < 4$$

$$\phi_s = 1.225 + 1.919e^{-0.36 \frac{h}{\sigma}} \quad \text{at } \frac{h}{\sigma} > 4 \quad (5)$$

전단응력 계수(ϕ_{fp}, ϕ_{fs})

$$\phi_{fp} = 0.974 - 1.392e^{-0.764 \frac{h}{\sigma}} \quad (6)$$

$$\phi_{fs} = 0.032 - 13.324e^{-1.087 \frac{h}{\sigma}} \quad (7)$$

D. W. Lee의 선행연구에 의해 2.1절에서 생성된 거친 표면과 평균 유동 모델을 사용하여 이론해석

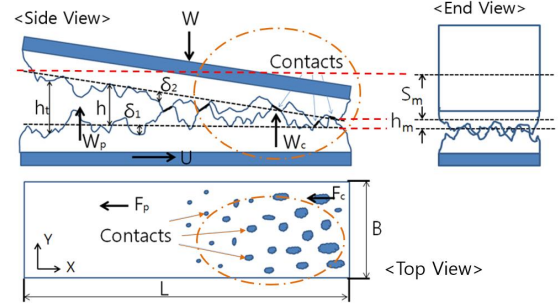


Fig. 1 Schematic of the load and relative motion between rough surfaces

을 통해 계산된 표면의 유동계수는 아래의 수식 (3)~(7)과 같다^[11-12]. 평균 유동 모델의 유동계수를 구한 후, 계산된 유동계수와 평균 레이놀즈 방정식을 사용하여 거친 표면 위에서 발생하는 유체압력을 계산을 수행하였다.

평균 유동 모델을 적용하여 거친 표면을 고려하는 유체 압력을 계산하였고 이어서 거친 표면에서 돌기들의 접촉에 의한 접촉하중을 계산하였다. 먼저, Fig. 1은 서로 상대 운동을 하는 두 표면 사이의 미끄럼 접촉 운동을 하는 패드 면의 모습과 돌기들의 접촉에 의해 발생하는 힘을 표현한 것이다^[12]. 특히 Fig. 1과 같이 전체 수직하중(W)은 표면의 이동에 따라 발생하는 유체 압력(W_p)과 표면 돌기들의 접촉 하중(W_c)의 균형으로 표현될 수 있다. 마찬가지로 마찰력의 합(F_r)은 유체에 의해 발생하는 전단응력(F_p)과 표면 돌기 간의 접촉에 의해 발생하는 접촉 전단응력(F_c)의 합으로 표현이 가능하다. 돌기 접촉에 의한 하중 W_c 와 F_c 의 경우는 레이놀즈 방정식을 기반으로 하는 W_p 와 F_p 와는 다르게 하중 계산을 위해 접촉면적과 접촉응력을 구할 필요가 있다. D. W. Lee의 선행연구에 의하면 두 상대면의 전체 표면면적 대비 유막두께에 따른 실제 돌기들 간의 접촉 면적과 접촉 하중을 계산하기 위해 GW model^[13]의 통계모델을 적용하였으며, 하중계산을 위해 KE model^[14], CKE model^[15] 등 여러 가지 거친 표면의 접촉하중 모델들을 적용하여 돌기 접촉에 의한 하중을 계산하고 윤활 이론해석에 적용하였다.

2.3 패턴 형상 및 이론해석 조건

2.2절에서 언급했던 Fig. 1은 상대 운동을 하는 두 표면의 하중뿐만 아니라 두 표면의 움직임을 같이 표현한다. Fig. 1의 End view 부분에서 h_m 은 두 면의 최소 유막두께를 나타내고, S_m 은 두 상대 면이 운동할 때 발생하는 기울기 값을 나타낸다. 실제 상대 운동하는 표면은 두 면들 중에 하나의 면이 이동을 하고 있을 경우 이동 방향으로 윤활제가 이끌려 들어가기 때문에 면과 면 사이에는 약간의 기울기가 발생을 한다. 본 논문에서는 이 기울기를 Slope parameter(h_m/S_m)로 명명하였고^[11], 윤활 해석 시 두 면의 기울기 값을 적용하고 진행하였다.

윤활 이론해석에 적용할 패턴의 형상은 Fig 2와 같다. 패턴이 없는 표면 Fig. 2 (a)를 Reference surface로 명명하고 이와 비교대상으로, 골프공과 필름 등 주변에서 자주 볼 수 있는 사물에 적용되는 효과적인 패턴들을 조사하고 윤활 해석에 적용할 수 있도록 패턴을 모델링 하였다. 먼저 Fig. (b)는 별집모양과 같은 육각 패턴 구조로, 공기저항을 줄여 골프공의 비거리를 늘리기 위해 Callaway사에서 골프공에 적용한 패턴으로 Hexagonal pattern으로 명명하였다^[16]. Fig. (c)는 타원형 뒨플을 이용한 꽃무늬 모양의 패턴인데, 단풍나뭇잎 모양이라고 알려진 이 패턴은 일본 미쯔비시 항공연구센터에서 개발하여 KAEDE사 골프공에 적용된 패턴으로 공기 저항이 최대 18%를 감소시키는 효과를 가지고 있다고 하며 Flower pattern으로 명명하였다^[17]. Fig. 2 (d)는 Skarklet사에서 Ethan Mann의 연구에 의해 개발된 패턴으로, 상어 피부에서 영감을 얻어 자연모사를 통해 패턴을 설계하여 필름에 향균 효과를 적용시킨 패턴이고 Sharkskin pattern으로 명명하였다^[18]. Fig. 2 (e)의 패턴은 Fig.2 (b), (c)와 마찬가지로 골프공에 적용된 패턴으로 2-Circular pattern이라 명명하였고, 풀라라 골프공으로 알려져 있으며 특정한 상황에서의 기능을 위해 크기가 다른 이중 뒨플을 적용시킨 패턴이다^[19]. 마지막으로 Fig. (f)의 패턴은 많은 연구사례에서 가장 많이 찾아볼 수 있는 일반 원형 뒨플 패턴으로, Circular pattern으로 명명하고 본 연구에서도 적용하였다. 패턴의 모델링은 상용화 프로그램인 CATIA V5와 MATLAB 프로그램

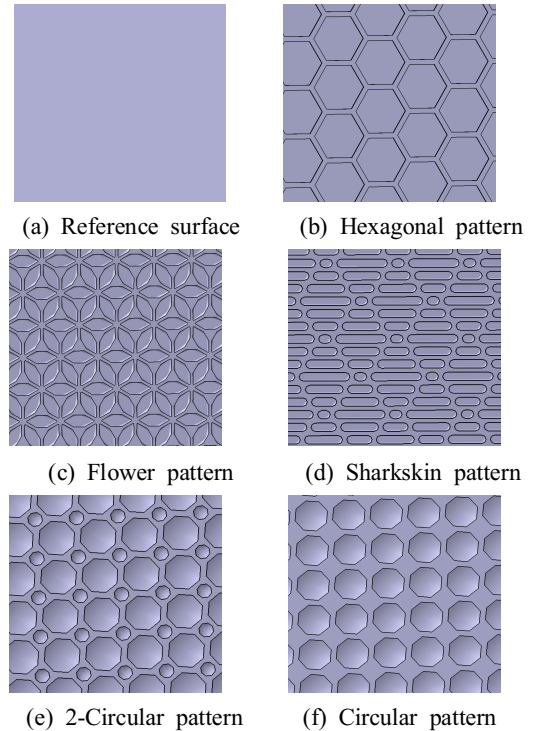


Fig. 2 Various pattern shapes for theoretical analysis

램을 사용하였다. 패턴 제작 조건은 패턴을 포함하는 마찰 표면이 $100 \times 100 \text{mm}^2$ 의 면적을 갖도록 하였고, 패턴 1cycle의 크기는 약 10mm로 하여 가로, 세로로 10cycle의 패턴이 들어가도록 하였으며 깊이는 $3 \mu\text{m}$ 로 제작하였다. 해석에 적용하기 위해 위 크기의 표면 데이터를 전체 200×200 크기의 무차원 노드 면에 각각 패턴이 배열되도록 모델링을 하였다.

본 윤활 해석에 적용되는 입력값과 해석 조건은 두 표면의 표면거칠기($\sigma=Rq$)는 $1 \mu\text{m}$ 이고 두 면 사이의 최소 유막두께(h_m) 범위는 $0.8 \sim 5 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 기울기 값인 Slope parameter(h_m/S_m)는 D. W. Lee의 선행연구에서 패턴의 효과가 나타나는 해석 조건 값이라고 알려진 10의 값을 적용하였다^[12]. 두 표면이 상대 운동하는 방향과 윤활제의 흐름은 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 이루어지며, 이송 속도는 0.5m/s , 윤활제의 점성계수는 $0.001 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 로 설정하고 윤활 해석을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 돌기 접촉 모델의 해석

여러 가지의 패턴을 사용한 윤활 해석을 수행하기 전에 본 연구에서 제안하는 거친 표면과 돌기 접촉을 이용하는 해석 방법의 효과에 대해서 먼저 알아 볼 필요가 있으므로, 패턴이 없는 Fig. 2 (a)와 같은 Reference surface를 대상으로 기존에 많이 사용되는 다른 해석 Model들을 사용하여 윤활 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다^[11]. 해석에 사용된 Model은 표면의 거칠기를 고려하지 않은 매끄러운 표면에서 유체윤활 영역을 대상으로 이루어지는 해석 방법과 Patir & Cheng의 평균 유동 모델을 사용한 거친 표면의 유체유동만을 고려한 해석방법, 본 연구에서 제안하는 평균 유동 모델과 돌기 접촉 모델을 고려한 해석방법 총 3가지 방법으로 윤활 해석을 수행하였다. 표면과 해석의 조건은 상대 운동하는 두 패턴이 없는 표면의 표면거칠기($\sigma=Rq$)는 1 μ m, 최소 유막 두께(h_m) 범위는 0.8~5 μ m, 이송 속도는 0.5m/s, 적용 윤활제의 점성계수는 0.001 Pa·s로 위에서 언급한 조건과 동일하며 기울기 값인 Slope parameter(h_m/S_m)는 1의 값을 적용하였다.

각각의 해석 결과는 Fig. 3과 같이 나타난다. x축은 무차원 값의 유막 계수(Film parameter)로 알려진 Film thickness ratio(h_m/σ)를 나타낸다. 먼저 사각형 symbol을 가진 검정 선은 본 연구에서 제안한 거친 면의 유동과 접촉영향이 모두 고려된 결과를 나타낸다. 원형 Symbol을 가진 붉은 선은 거친 표면에서 Patir & Cheng의 평균 유동 모델을 사용한 결과를 나타낸다. 정삼각형 Symbol을 가진 파란 선은 거칠기 영향이 무시된 매끄러운 표면의 기존 베어링 해석 방법을 사용한 결과를 나타낸다. Film thickness ratio가 4.5를 초과하는 영역은 두 면 사이의 유막의 두께가 상대적으로 두꺼운 유체윤활 영역에 가까운 영역으로, 3가지 해석 결과 모두 Film thickness ratio가 작아질수록 마찰계수가 감소하는 현상을 나타낸다.

또한 본 연구의 결과와 평균 유동 모델의 결과는 마찰계수가 거의 같은 값을 가지고, 매끄러운 면을 사용한 결과에 비해 조금 더 크게 나타났고 거친 면을 고려하는 효과를 보여주고 있다. 하지만 Film

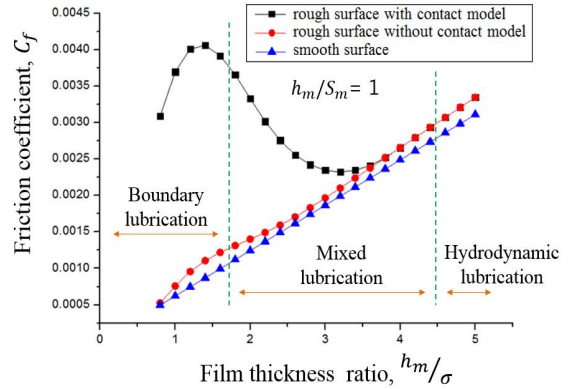


Fig. 3 Results of theoretical analysis using various models

thickness ratio가 약 1.8~4.5 사이의 구간은 혼합윤활 영역에 가까운 구간이며 두 면 사이의 유막 두께가 작아지며 거친 면의 돌기들의 영향과 접촉이 발생한다. 이 구간에서는 3가지 방법의 해석 결과가 각각 다르게 나타났다. 본 연구의 결과는 다른 두 Model들과 다르게 혼합윤활 영역에서 마찰계수가 감소하다가 증가하는 결과를 나타낸다. 이는 두 거친 표면의 돌기 접촉과 돌기에 의한 유동 영향이 나타나고 있는 것으로 보인다. 매끄러운 면을 사용한 결과는 혼합윤활 영역에서 Film thickness ratio가 작아질수록 마찰계수가 계속해서 작아지며, 평균 유동 모델을 사용한 결과는 거친 면의 유동 영향을 고려하기 때문에 크진 않지만 표면 돌기의 영향이 마찰계수에 나타나는 것을 볼 수 있다. 각각 3가지 다른 모델들과 비교한 결과, 본 연구에서 제안한 방법은 혼합윤활 영역에서 거친 면에 의한 영향을 잘 나타내며 실제 윤활 현상인 Stribeck curve와 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 패턴 형상에 따른 이론해석 결과

2.3절에서 언급한 여러 가지 패턴들과 입력값들을 사용하여 6가지 종류의 각 표면에서의 마찰 현상을 확인하기 위한 윤활 해석을 수행하였다. 표면의 마찰현상은 전체 표면의 넓이와 표면거칠기 또는 패턴의 크기와 깊이, 밀도 등 표면 조건에 따라 다양하게 달라지는 부분이 있지만, 본 연구의 표면 조건에서 각 패턴들의 해석 결과는 Fig. 4와 같이

나타났다. 6가지 표면의 해석 결과는 모두 Stribeck curve와 같이 거친 면의 영향과 실제 윤활현상의 모습을 나타내었다.

먼저 Film thickness ratio가 4.5 이상인 유체윤활 영역에서는 Flower pattern이 Sharkskin pattern과 근소한 차이로 마찰계수가 가장 크게 나타났으며, 2-Circular pattern과 Circular pattern이 Reference surface에 이어 작게 나타났고 Hexagonal pattern이 가장 작은 마찰계수를 나타내었다. 두 면 사이의 유막 두께가 큰 유체윤활 영역의 경우, 두 표면 사이의 거리가 상대적으로 멀기 때문에 두 면 사이의 돌기들의 접촉이 없으며 두 면의 기울기에 관계없이 표면의 거칠기의 영향보다는 표면 사이의 유체의 움직임의 영향이 더 커지게 된다. 따라서 Flower pattern과 Sharkskin pattern의 경우 패턴의 효과가 오히려 유체의 유동과 압력의 분포에 역효과를 나타내어 패턴이 없는 Reference pattern보다 마찰계수가 더 크게 나타났다. 하지만 드문 경우로 마찰력을 더 크게 만들어서 적용하는 산업분야가 존재하기 때문에^[20] 이 두 가지 패턴의 큰 마찰계수는 부정적이기 보다는 다른 기능으로 작용할 가능성이 있다. 그에 반해 2-Circular pattern과 Circular pattern은 원형 딩플패턴의 다양한 연구와 마찬가지로 원형 딩플에 의해 유체의 유동과 압력 분포가 패턴의 효과를 가지도록 작용하였고 Reference pattern보다 더 작은 마찰계수를 나타내었다. Hexagonal pattern의 경우는 유체윤활 영역과 Film thickness ratio이 약 2~4.5 인 혼합윤활 영역 전반에 걸쳐 가장 작은 마찰계수를 가졌다. 육각 별집구조로 잘 알려진 Hexagonal pattern은 유체윤활 영역에서 유체의 유동과 압력 분포가 5가지 패턴 중 가장 강한 부하지지 능력을 가질 것으로 예상할 수 있다. 혼합윤활 영역의 경우는 두 표면 간 돌기들의 접촉이 발생하며 표면의 거칠기의 영향이 나타난다. 거친 표면과 돌기들의 국부적 접촉, 패턴에 의해 유체의 유동이 유체윤활 영역과는 다른 거동을 가지게 되며 마찬가지로 Hexagonal pattern이 가장 작은 마찰계수를 나타냈다.

혼합윤활 영역에서는 Reference surface가 전반적으로 가장 큰 마찰계수를 가졌으며, 이는 두 면 사이의 거리가 가까워지기 때문에 거친 표면의 영향이 더 커지고 패턴의 효과가 훨씬 더 크게 나타난

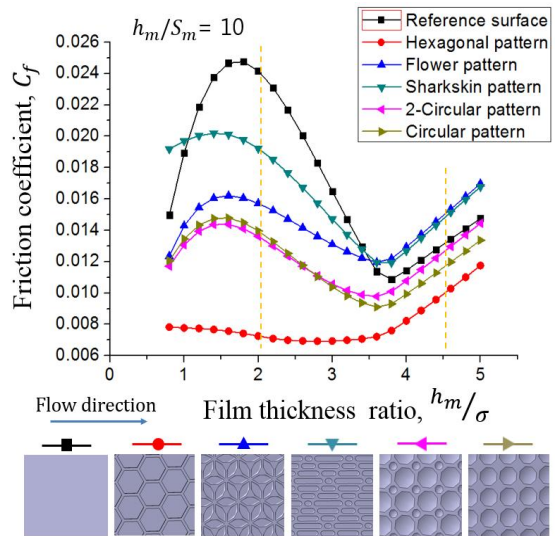


Fig. 4 Results of theoretical analysis using various patterns

것으로 판단된다. 유체윤활 영역과는 반대로 모든 패턴을 가지는 표면들이 Reference surface에 비해 마찰계수 더 작아지긴 했으나 Sharkskin pattern이 패턴 표면 중 가장 큰 마찰계수를 가졌다. 그 다음으로 Flower pattern이 작게 나타났고 2-Circular pattern과 Circular pattern은 Hexagonal pattern을 제외하면 유사한 크기로 전 윤활 영역에 걸쳐서 전반적으로 작고 안정적인 마찰현상을 나타내었다.

Fig. 2와 같이 다른 분야에서 적용되는 패턴들을 대상으로 본 연구의 표면 조건에서 마찰효과를 알아보았을 때, 부분적으로 좋은 효과를 가지는 타원형 패턴인 Flower pattern과 2-Circular pattern 및 Hexagonal pattern과 같은 육각무늬는 골포공에 적용이 적합한 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 Shark skin pattern을 포함하여 마찰을 감소시키고 에너지 효율을 향상시킬 수 있는 기계 시스템에도 적용될 가능성이 있을 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 윤활 이론해석에 관하여 거친 표면을 대상으로 표면 위 유동영향과 돌기의 접촉에

의한 영향을 복합적으로 고려하는 방법으로 다양한 기하학적 패턴의 마찰현상을 알아보기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제안한 방법의 해석은 거친 면에 의한 유동과 접촉 영향을 잘 나타내었으며 Stribeck curve와 유사한 실제 윤활 현상을 나타내었다. 또한 패턴이 없는 거친 표면인 Reference surface와 비교하여 육각 모양 패턴인 Hexagonal pattern, 꽃무늬 패턴인 Flower pattern, 자연모사에 의한 상어 피부 패턴인 Sharkskin pattern, 두 가지 종류의 덩플패턴의 2-Circular pattern, Circular pattern으로 각각 다른 분야에서 적용되고 있는 효과적인 5가지의 패턴들을 조사하였고 이 패턴들을 본 연구에 알맞게 모델링하여 윤활 해석을 수행하고 마찰현상을 비교하였다. 해석의 결과는 유체윤활 영역에서는 마찰계수의 크기가 Flower pattern, Sharkskin pattern, Reference surface, 2-Circular pattern, Circular pattern, Hexagonal pattern 순서로 나타났으며 혼합윤활 영역에서는 Reference surface, Sharkskin pattern, Flower pattern, 근소한 차이로 Circular pattern과 2-Circular pattern, Hexagonal pattern 순서로 나타났다. 기준 표면인 Reference surface에 비해 거친 표면과 패턴으로 인해 압력분포가 제대로 형성되지 못해 마찰계수가 더 증가한 경우가 일부 있지만, 대부분 마찰계수 감소의 효과가 나타났고 적합한 패턴이 마찰 저감이 필요한 기계부품과 상대 운동이 발생하는 기계요소에 적용될 수 있을 것이다.

후 기

“이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Bruzzone, A. A. G., Costa, H. L., Lonardo, P. M., Lucca, D. A., “Advances in engineered surfaces for functional performance,” CIRP annals, Vol. 57, No. 2, pp. 750-769, 2008.
2. Lee, D. H., Park, S. S., Ko, T. J., Shim, J. S., “Effect of the Texture Shape Aspect Ratio on Friction Reduction in a Hydrodynamic Lubrication Regime,” J. of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 63-68, 2017.
3. Hwang, N. S., “A Study on Friction Characteristics According to Micro-dimple Patterns,” J. of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 124-130, 2015.
4. Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G., Etsion, I., “The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact,” Tribology International, Vol. 38, No. 3, pp. 219-225, 2005.
5. Zhou, R., Cao, J., Wang, Q. J., Meng, F., Zimowski, K., Xia, Z. C., “Effect of EDT surface texturing on tribological behavior of aluminum sheet,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, No. 10, pp. 1643-1649, 2011.
6. Akbarzadeh, S., Khonsari, M. M., “Effect of surface pattern on stribeck curve,” Tribology letters, Vol. 37, No. 2, pp. 477-486, 2010.
7. Patir, N., Cheng, H. S., “An Average Flow Model for Determining Effects of Three Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication,” ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 100, pp. 12-17, 1978.
8. Patir, N., Cheng, H. S., “Application of the Average Flow Model to Lubrication between Rough Sliding Surfaces,” ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 101, pp. 220-229, 1979.
9. Teale, J. L., Lebeck, A. O., “An Evaluation of the Average Flow Model for Surface Roughness Effects in Lubrication,” ASME Journal of Lubrication Technology, Vol. 02, pp. 360-367, 1980.
10. Susan, R. H., Salant, R. F., “An Average Flow Model of Rough Surface Lubrication with Inter-Asperity Cavitation,” ASME Journal of Tribology, Vol. 123, pp. 134-143, 2001.

11. Kim, M. R., Lee, S. M., Park, S., Kim, S., Lee, D. W., "Tribological effects of a rough surface bearing using an average flow analysis with a contact model of asperities," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 18, No. 1, pp. 99-107, 2017.
12. Kim, M. R., Lee, S. J., Li, L., Lee, D. W., "A study on lubrication Properties of a Dimple Pattern using an Average Flow Analysis with a Contact Model of Asperities," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 41-49, 2016.
13. Greenwood, J. A., Williamson, J. B. P., "Contact of Nominally Flat Surfaces," *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 295, No. 1442, pp. 300-319, 1966.
14. Kogut, L., Etsion, I., "A Finite Element based Elastic-Plastic Model for the Contact of Rough Surfaces," *Tribology Transactions*, Vol. 46, No. 3, pp. 383-390, 2003.
15. Cohen, D., Kligerman, Y., Etsion, I., "A Model for Contact and Static Friction of Nominally Flat Rough Surfaces under Full Stick Contact Condition," *Journal of Tribology*, Vol. 130, No. 3, pp. 031401, 2008.
16. "Callaway Golf,"(2017) <https://www.callawaygolfkorea.co.kr/product/balls/47>(accessed 24, Nov., 2017)
17. "KAEDE KOREA,"(2016) <http://www.naeungolf.com/index.html>(accessed 27, Dec., 2016)
18. Mann, E. E., Manna, D., Mettetal, M. R., May, R. M., Dannemiller, E. M., Chung, K. K., Brennan, A. B., Reddy, S. T., "Surface micropattern limits bacterial contamination," *Antimicrobial resistance and infection control*, Vol. 3, No. 1, pp. 28, 2014.
19. "Polara Golf,"(2017) <http://www.polaragolf.co.uk/technology.html>(accessed 13, Nov., 2017)
20. Choo, H. H., Kim, D. H., Kim, K. H., Kim, S. H., Yoo, C. H., Park, J. H., "Non-linear Structural Analysis Based on Multi-Body Dynamics for Yaw Brake System of Large Wind Turbine," *Journal of Wind Energy*, Vol. 5, No. 2, pp. 20-26, 2014.