

# 돌기 접촉 모델과 평균 유동 분석을 이용한 딥플 패턴의 윤활 특성에 관한 연구

김미루\*, 이승준\*\*, 리량\*, 이득우\*\*\*,#

\*부산대학교 나노융합기술학과, \*\*부산대학교 첨단정밀공학협동과정, \*\*\*부산대학교  
나노메카트로닉스공학과

## A study on lubrication Properties of a Dimple Pattern using an Average Flow Analysis with a Contact Model of Asperities

Mi-Ru Kim\*, Seung-Jun Lee\*\*, Liang-Li\*, Deug-Woo Lee\*\*\*,#

\*Department of Nano Fusion Technology, Pusan National UNIV., \*\*Interdisciplinary Department for  
Innovative Manufacturing Engineering, Pusan National UNIV., \*\*\*Department of Nano Mechatronics  
Engineering, Pusan National UNIV.

(Received 28 June 2016; received in revised form 2 August 2016; accepted 22 September 2016)

### ABSTRACT

To evaluate lubrication properties by surface roughness under boundary and mixed lubrication, a new approach is suggested by both asperity flow and contact with stochastic characteristics. Many researchers already have studied the effect of surface roughness on flow. But, it has become important to research of the phenomenon of asperities contact in surfaces because the growth of asperities contact area under heavy load conditions. In this paper, flow factors in the average flow model derived by Patir and Cheng were used, and a multi-asperity contact model was included to calculate lubrication properties of a surface with a randomly generated rough surface. A numerical analysis using the average Reynolds equation with both the average flow model and the asperity contact model was conducted, and the results were compared with those from previous research. The results showed that the influence of asperities on lubrication and the friction coefficient changed rapidly on application of contact model.

**Key Words** : Average Flow Model(평균 유동 모델), Contact Model(접촉 모델), Surface Roughness(표면거칠기), Asperities Contact(돌기 접촉), Dimple Pattern(딥플패턴)

### 1. 서 론

표면이란 보통 고체나 액체 상태를 유지하며, 다른 상(Phase)과 경계를 형성하며 노출이 되어있는 물질의 가장 바깥쪽을 뜻하는 의미로써 다양한 기

계적, 물리적, 화학적 영향들로 내부의 분자 층과는 다른 특성을 보여준다. 표면의 대표적인 특성으로 마찰, 마멸 및 윤활에 관한 Tribology 특성이 있다. 표면의 Tribology 특성을 변화시키기 위한 다양한 방법 중에서 주로 표면에 특정 패턴을 가공하여 표면 Tribology 거동을 향상시키는 방법을 많이 사용한다<sup>[1]</sup>. 또한 표면공학에서는 Tribology 거동을 향상시켜 표면과 표면이 접촉하여 물리적 운동이 발생

# Corresponding Author : [dwoolee@pusan.ac.kr](mailto:dwoolee@pusan.ac.kr)

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

하는 기계부품의 수명이나 효율을 향상시키기도 한다. 따라서 상대운동을 하는 부품의 Tribology 현상에 대한 파악은 필수적이다. 예를 들면, 자동차 내부의 엔진 베어링이나 피스톤의 부품들은 윤활상태에서 두 면의 상대운동이 발생한다. 베어링, 피스톤 링을 포함한 기계부품들은 운동을 할 때 인가되는 다양한 하중에 따라서 윤활의 3가지 운동영역인 유체윤활(Hydrodynamic lubrication), 혼합윤활(Mixed lubrication), 경계윤활(Boundary lubrication) 모두를 가지며 운동을 한다<sup>[2]</sup>. 이러한 부품들의 윤활 효율이나 비용절감 등을 위해 표면의 윤활 이론해석에 관한 연구가 많이 진행되고 있다<sup>[3]</sup>.

하지만 실제 표면은 수많은 산과 골이 교차되고 연결되어 면을 이루고 있다. 윤활 해석 연구 중 유막 두께가 두껍거나 이상적인 매끄러운 표면이 아닌, 실제 부품 표면이 가지는 표면거칠기(Surface roughness)에 대한 영향을 고려한 연구가 수행되고 있다<sup>[4]</sup>. 표면거칠기의 영향이 고려된 윤활 해석 연구 중에서, Patir & Cheng의 연구는 3차원의 거칠기를 가지는 표면에 적용할 수 있는 평균 유동 모델(Average flow model)을 제안하였다. 기존 레이놀즈 방정식에서 표면거칠기로 부터 발생하는 유동 영향을 유동계수(Flow factor)라는 것으로 도입하였다. 유동계수는 압력 유동계수( $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ), 전단 유동계수( $\phi_s$ ), 전단응력 계수( $\phi_{fp}$ ,  $\phi_{fs}$ )가 존재한다. 유동계수를 유동 해석을 통해 구하고 일반적인 거칠기를 가지는 표면에 적용 가능한 평균 레이놀즈 방정식(Average Reynolds Equation)을 유도하였고<sup>[5-6]</sup>, 이와 관련된 여러 연구들이 진행 되어왔다<sup>[7-8]</sup>.

하지만 이러한 평균 유동 모델은 돌기에 의한 유동 영향만 고려하였고, 경계윤활 시 상대 운동하는 두 면에서 발생하는 돌기들의 실제 국부적인 접촉에 대한 현상을 무시하는 가정을 적용한다. 표면거칠기의 돌기들이 접촉할 때 발생하는 하중은 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에, 실제 측정되는 마찰력 값에는 유체의 유동에 의한 성분과 이러한 표면의 돌기들의 접촉에 의한 전단 응력 성분이 포함되어 있다. 따라서 윤활 해석을 위해서는 두 성분을 모두 고려해야 한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 돌기 접촉 모델(Asperities contact model)의 기본적인 아이디어는, 경계윤활 상태로 상대운동을

하는 거친 표면에는 돌기들의 국부적인 접촉, 또는 접촉에 의한 연속적인 하중과 전단 응력이 발생되는데 이러한 변화를 베어링의 윤활 해석에 적용하는 것이다. 이러한 연구는 D. W. Lee와 S. M. Lee에 의해 윤활 해석의 문제점을 보완하기 위해 상대운동이 일어나는 두 표면에 있어 표면 돌기들의 하중과 전단응력을 고려한 돌기 접촉 모델을 제안하였다<sup>[9]</sup>.

따라서 본 연구에서는, D. W. Lee와 S. M. Lee에 의해 선행 연구된 표면거칠기의 유동이 고려된 평균 유동모델<sup>[5-6]</sup>과 표면 돌기의 접촉이 고려된 돌기 접촉 모델을 사용한 새로운 윤활 이론해석 방법<sup>[9]</sup>으로 표면해석을 수행하였다. 랜덤한 표면거칠기를 가지는 아무 패턴이 없는 기준 표면에서의 윤활효과와 비교하기 위해 딴플이 있는 패턴을 적용하여, 딴플(Dimple) 패턴의 조건에 따라 어떤 윤활특성과 경향을 가지는지 이론해석을 통해 비교, 분석을 하였다.

## 2. Lubrication 이론해석 연구

### 2.1 해석표면의 표면거칠기 생성

윤활 해석에 사용되는 표면의 거칠기에 의한 영향을 분석하기 위해서 상용화된 수치해석 프로그램인 MATLAB을 사용하여 3차원 표면을 생성하였다. 아래의 Fig. 1은 거칠기가 생성된 표면을 나타낸다. 생성된 표면의 조건은 중심선 평균 거칠기(mean value of roughness,  $R_a$ ) = 0, 제곱 평균 거칠기(root mean square of roughness = standard deviation,  $R_q$ ) =  $\sigma$  = 1, kurtosis( $R_{ku}$ ) = 2.8312, skewness( $R_{sk}$ ) =

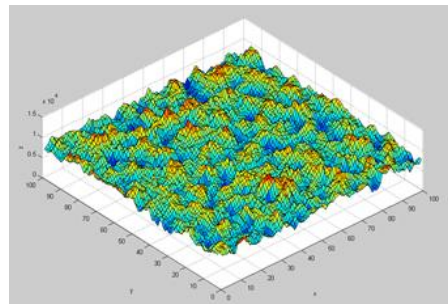


Fig. 1 Generated rough surface for analysis

0.00374 이다. Fig. 1과 같이 거칠기를 가지는 표면을 이론해석에 적용하였다.  $\sigma$ 는 표면거칠기의  $R_q$  값과 같은 의미를 가진다.

표면의 기하학적 형상을 수치적으로 표현하는 데는 한계가 있다. 그러나 산업계에서는 일반적으로 통용되는 규격으로 정의 하여 사용 하고 있다<sup>[10]</sup>.

표면 거칠기는 중심선 평균 거칠기( $R_a$ ), 제곱 평균 거칠기( $R_q$ )를 표면 전체의 거칠기를 대표적인 값으로 가장 많이 표현한다.

$R_a$ 는 아래 수식에 따라 구해지는 값을 마이크로미터( $\mu m$ )로 나타낸 것을 말한다.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dx$$

$R_a$  값은 기준길이 내의 거칠기의 평균값이므로, 우연히 나타나는 한 두 개의 이례적인 산이나 골은 평균값에 영향을 주지 않는다.  $R_a$  값은 기준길이 주어져지 않으면 의미가 없으며, 같은 기준 길이가 주어져야만 값이 산출된다.  $R_a$  값은 거칠기 모양에 대한 정보를 주지 않는다. Fig. 2는  $R_a$ 를 나타내는 프로파일이다.

$R_q$ 는  $R_a$ 와 비슷한 의미를 갖는 parameter 이지만, 계산 방법에 차이가 있다.  $R_a$ 는 산술평균으로 구했으나,  $R_q$ 는 제곱평균제곱근(RMS)의 방법을 써서 구한다. Fig. 3은  $R_q$ 를 나타내는 프로파일이며 아래 수식은  $R_q$ 를 구하는 식을 표시하고 있다.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$$

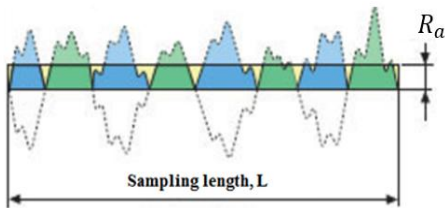


Fig. 2 Surface profile of  $R_a$

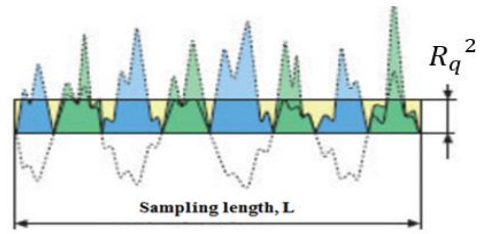


Fig. 3 Surface profile of  $R_q$

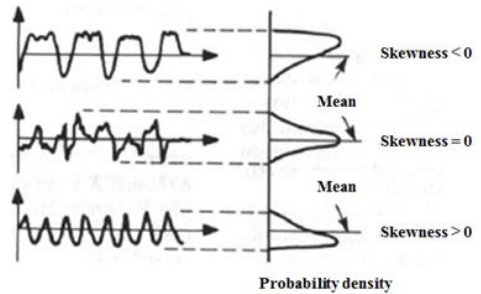


Fig. 4 Surface profile of  $R_{sk}$

또한 표면 거칠기를 표현하는 인자 중 Skewness라고 불리는 3차 모멘트( $R_{sk}$ )는 분포 곡선의 대칭성을 평가하는 비대칭도 혹은 왜도와 관련된 값으로, 일반적으로 표준편차 값으로 무차원화 하여 아래와 같이  $R_{sk}$  값을 표현할 수 있다.

$$R_{sk} = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} z^3 f(z) dz$$

$R_{sk}$  값은 양수나 음수가 될 수 있으며 정의되지 않을 수도 있다. 표면에 골과 산이 제어된 형상의 경우 음수(-)의 값을 가지며 반대인 경우 양수(+)를 나타낸다. 평균과 중앙값이 같으면 0이 된다. Fig. 4는  $R_{sk}$  값에 따른 프로파일을 보여주고 있다.

4차 모멘트 Kurtosis는 분포 곡선의 날카로운 정도, 즉 데이터 분포의 모양을 평가하는 첨도( $R_{ku}$ )와 관련된 값으로  $R_{sk}$  값과 동일하게 표준편차 값으로 무차원화 하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{ku} = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{+\infty} z^4 f(z) dz$$

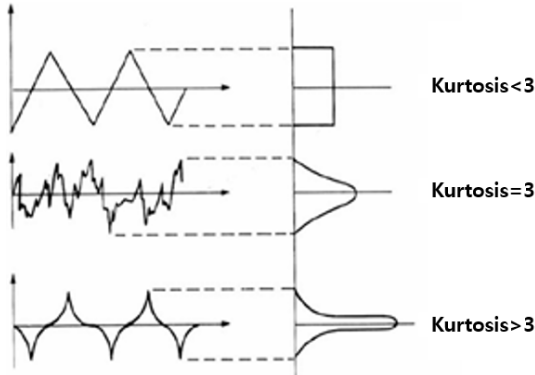


Fig. 5 Surface profile of  $R_{Ku}$

Fig. 5는  $R_{Ku}$  값에 따른 프로파일과 측정된 3차원 표면 형상에 따른 히스토그램(Histogram)을 보여주고 있다.

## 2.2 유동계수와 돌기 접촉

본 연구의 윤활 해석은 평균 유동 모델의 돌기에 의한 유동영향과 돌기 접촉에 의한 접촉 영향을 모두 고려한다. 따라서 먼저 유동과 관련된 인자인 유동계수를 구해야 한다. 먼저, Patir & Cheng<sup>[5-6]</sup>에 의해 제안된 방법을 사용하여 평균 유동 모델의 유동계수를 계산하였다. Patir & Cheng에 의해 유도된 평균 레이놀즈 방정식은 아래 수식과 같이 나타난다.

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

유동계수와 더불어  $h$ 는 nominal film thickness,  $\mu$ 는 유체의 viscosity,  $\bar{P}$ 는 mean hydrodynamic pressure,  $\bar{h}_t$ 는 mean value of film thickness,  $U$ 는 velocity of slider의 의미를 타나낸다.

평균 레이놀즈 방정식에서, 유체 유동이 표면거칠기에 의한 영향을 표현하는 유동계수는 압력 유동계수( $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ), 전단 유동계수( $\phi_s$ ), 전단응력 계수

( $\phi_{fp}$ ,  $\phi_{fs}$ )가 존재한다. 압력 유동계수( $\phi_x$ ,  $\phi_y$ )는 검사 체적(Control volume)의 경계(Boundary)에서 표면거칠기의 영향을 반영하는 압력을 표현하기 위해 도입된 유동계수이다. 전단 유동계수( $\phi_s$ )는 미끄럼 운동을 하는 표면에 있어 거칠기로 인해 발생하는 추가적인 유동을 고려한 계수이다. 전단응력 계수 중  $\phi_{fp}$ 는 평균 압력 유동에 대한 전단응력의 보정 계수이고  $\phi_{fs}$ 는 미끄럼 운동과 표면의 거칠기로 인해 발생하는 전단응력에 대한 보정 계수이다. 평균 레이놀즈 방정식을 기반으로, 이론해석 방법인 유한차분법(Finite Difference Method)을 적용하고 수치적으로 근사화 시켜 계산된 Fig. 1의 표면의 유동계수는 아래와 같다.

① 압력 유동계수 :

$$\phi_x = 0.966 - 0.925e^{-0.652 \frac{h}{\sigma}}$$

$$\phi_y = 1 - 0.391e^{-0.34 \frac{h}{\sigma}}$$

② 전단 유동계수 :

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

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

③ 전단응력 계수 :

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

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

계산된 유동계수에서  $h$ 는 두 상대면 사이의 nominal film thickness,  $\sigma(=R_q)$ 는 표면 거칠기의 제곱 평균 거칠기(standard deviation)을 나타낸다. 본 연구에서의 표면 거칠기라 함은 제곱 평균 거칠기인  $\sigma$ 을 나타낸다. 위와 같이 돌기의 유동에 의한 영향을 나타내는 평균 유동 모델의 유동계수를 구한 후, 상대운동을 하는 두 표면의 돌기 간 접촉할 때 발생하는 압력, 전단응력이 고려된 해석에 적용하였다.



상대 운동하는 두 표면은 두 면들 중에 하나의 면이 다른 면으로 접근을 하고 있을 경우 면과 면 사이에는 기울기가 발생을 한다. 본 논문에서는 이 기울기의 정도를 Slope parameter( $h_m/S_m$ )로 나타내었고, 최소 유막두께( $h_m$ )가 일정할 경우 기울기( $S_m$ )가 작아질수록 Slope parameter 값은 커지고 두 상대 면은 평행에 가까워진다. 두 상대운동 하는 면의 Slope parameter에 의해 윤활 현상이 어떤 영향을 받는지에 대해 알아보았다. Fig.7 (b)는 본 윤활 이론해석에 사용될 딴플 패턴의 모습을 나타낸다. 딴플의 제작 조건은 상용화된 수치해석 프로그램인 Visual Fortran을 사용하여 전체  $240 \times 240$ 의 무차원 node에서 딴플의 직경은  $12 \times 12$ node, 딴플과 딴플의 중심점 사이의 거리는  $24 \times 24$ node가 되도록 하였고 딴플의 깊이는  $3\mu m$ 로 패턴을 제작하였다.

본 윤활 이론해석에 적용되는 해석 조건으로, 적용되는 두 표면의 표면거칠기( $\sigma$ )는  $1\mu m$ 이고 최소 유막두께( $h_m$ ) 범위는  $0.8-5\mu m$ 로 설정하였고 그에 따른 Slope parameter( $h_m/S_m$ )는 1, 10, 100의 값을 적용하였다. 해석에 적용되는 정사각형 표면의 면적은  $10 \times 10 mm^2$ 이고 표면의 소재로는 Yield strength가  $333 MPa$ 인 Cold drawn copper를 적용하였다. 마지막으로 두 표면이 상대 운동하는 Sliding velocity는  $0.5 m/s$ , 적용 윤활제의 Viscosity는  $5cP$ 로 설정하고 윤활 이론해석을 수행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 접촉 돌기가 고려된 표면 해석 결과

Fig. 8은 Slope parameter( $h_m/S_m$ )가 10인 경우, 아무 패턴이 없는 기준 표면을 적용하여 각 해석 모델들의 윤활 이론해석의 결과를 나타낸다. x축은 Stribeck number로 윤활에서 무차원 변수인 Film parameter( $h_m/\sigma$ )와 같은 의미를 나타낸다. 사각형 symbol을 가진 검정선(with contact model)은 본 논문에서 사용한 돌기의 유동영향과 접촉영향이 모두 고려된 해석 결과를 나타내고 원형 symbol을 가진 빨간 선(without contact model)은 돌기 간 접촉영향이 없는 Patir & Cheng의 평균 유동 모델만 적용된 해석 결과를 나타낸다. 마지막으로 삼각형 symbol을

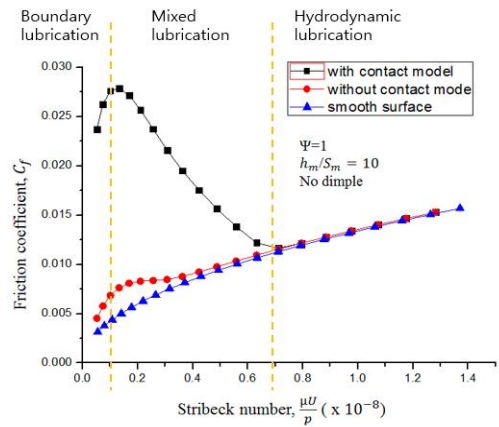


Fig. 8 Results of theoretical analysis models on the friction coefficient

가진 파란선(smooth surface)은 표면 돌기에 의한 영향이 무시된 기존 베어링 해석에 이용되는 방법을 사용한 해석 결과를 나타낸다. 3가지 경우 모두 Stribeck number가 0.7정도가 되었을 때까지 모두 마찰계수가 감소하는 현상을 나타낸다.

이 부분은 두 상대 면 사이의 유막두께가 큰 유체윤활 영역으로, 유막두께가 감소하면서 마찰력보다 수직 하중이 더 커졌기 때문에 마찰계수가 감소한다. 하지만 본 연구에서 제안된 돌기 간 접촉영향이 고려된 해석 결과는 Stribeck curve와 같은 그래프 형태를 보이며 Stribeck number가 0.1에서 0.7 사이인 혼합윤활 영역에서는 마찰계수가 증가하는 모습을 보여준다. 본 해석에 적용된 표면의 거칠기  $\sigma = 1$ 이기 때문에, 두 표면의 돌기의 접촉영향이 나타나고 있는 것이라 볼 수 있다. Stribeck number가 0.1 이하인 영역은 표면 돌기 간 접촉영향을 크게 받는 경계윤활 영역이다. 본 연구의 결과와 비교하여 Patir & Cheng에 의한 평균 유동모델만 적용한 결과는 혼합윤활 영역에서 돌기에 의한 마찰계수의 영향이 나타나긴 하지만 유동영향만 고려하기 때문에 마찰계수의 변화가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 마지막 베어링 해석에 이용이 되는 표면 돌기 영향을 무시하는 경우는 돌기에 의한 영향이 없기 때문에 계속 마찰계수가 감소하는 것을 보여준다.

다른 해석 모델들과 비교한 결과, 혼합윤활 영역에서 돌기에 의한 접촉 영향을 고려한 마찰계수의 결과는 경향을 파악하는데 더 중요한 역할을 할 수 있다.

### 3.2 딩플 패턴 조건에 따른 해석 결과

패턴이 없는 기준 표면을 이용하여 돌기 접촉영향에 대한 해석 결과를 확인한 후, 앞서 제작한 딩플 패턴을 이용하여 윤활 해석을 수행하였다. 딩플 패턴의 구체적인 제작 조건에 관한 내용은 2.3절에 언급하였다. 딩플 패턴에 의한 마찰계수의 효과를 알아보기 위해 비교 대상으로 아무 패턴이 없는 표면을 기준으로 하였다.

Fig. 9는 패턴이 없는 기준표면과 깊이  $3\mu\text{m}$ 의 딩플패턴 표면의 윤활 이론해석의 결과를 나타낸다. 보통 윤활 해석에서 x축 값으로 자주 쓰이는 무차원 변수인 Film parameter( $h_m/\sigma$ )는  $\sigma = 1$ 이기에 최소 유막두께( $h_m$ )와 같은 값을 가진다. 따라서 최소 유막두께( $h_m$ )에 의해 돌기 간 접촉 정도를 더 쉽게 파악할 수 있으므로 x축은 유막 두께로 나타내었다.

두 가지의 다른 표면의 차이를 알아보기 위한 변수로 Slope parameter( $h_m/S_m$ )의 값을 다르게 하여 해석을 수행하였다. Fig. 9 (a)는  $h_m/S_m = 1$  일 때 해석 결과를 나타낸다. 두 상대면 사이의 기울기 (slope)가 상대적으로 큰  $h_m/S_m = 1$ 인 경우는, 딩플이 있는 패턴이 오히려 아무 패턴이 없는 표면보다 마찰계수가 전 영역에 걸쳐 크게 나타났다. 이와 같은 경우 표면 딩플 패턴에 의한 유체유동이 마찰에 더 안 좋은 영향을 미치는 것으로 판단된다. Fig. 9 (b)는  $h_m/S_m = 10$  일 때 해석 결과이다.  $h_m/S_m = 1$ 과는 다르게 기울기가 더 작아져서 상대면들이 평행에 더 가까워지는  $h_m/S_m = 10$  인 경우, 혼합윤활 영역에서 딩플패턴의 마찰계수가 더 작아지면서 딩플 패턴의 효과가 나타난 것을 확인할 수 있다. Fig. 9 (c)의  $h_m/S_m = 100$ 인, 두 상대면 사이의 기울기가 매우 작은 평행에 가까운 경우 딩플 패턴의 영향으로 전 영역에 걸쳐 마찰계수가 크게 작아지는 것을 확인할 수 있다. 위의 결과들을 분

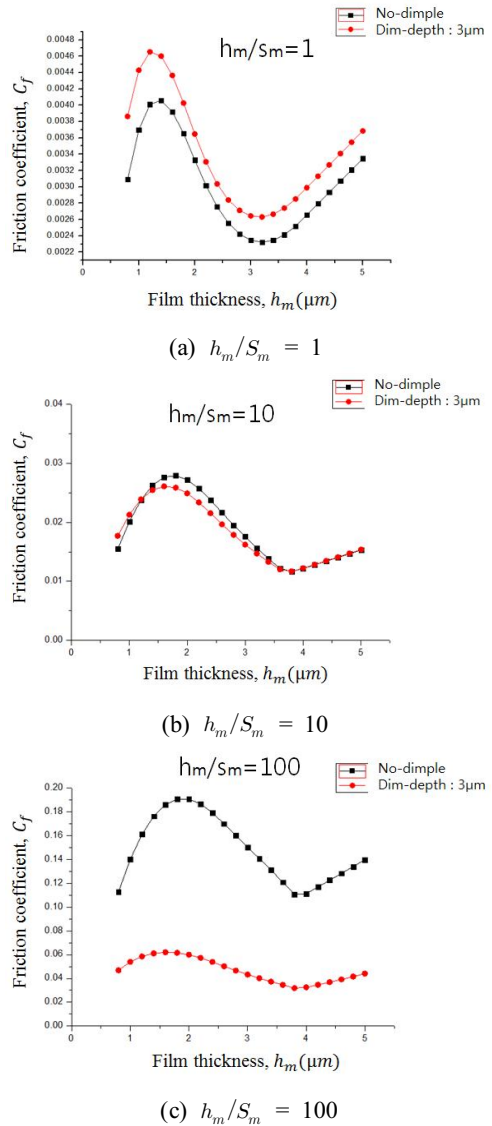
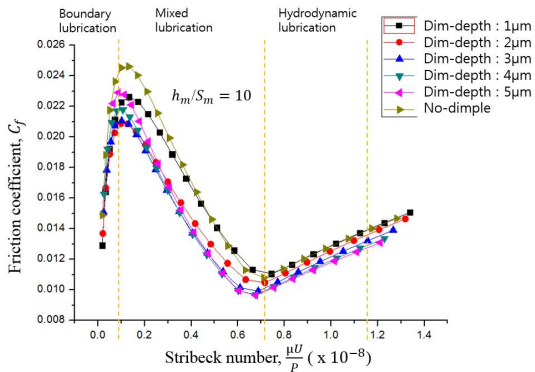


Fig. 9 Results of theoretical analysis on dimple surface for slope parameter

석하면, 표면이 특정 패턴을 가지는 경우라 할지라도 무조건적으로 패턴의 효과가 마찰특성을 향상시키지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 마찰 운동을 하는 두 상대면 사이의 기울기에 따라 마찰계수와 윤활현상이 크게 달



**Fig. 10 Results of theoretical analysis on dimple surface for dimple depth**

라질 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 제작된 깊이  $3\mu\text{m}$ 인 딴플패턴의 효과는  $h_m/S_m = 10$ 에서 나타나기 시작한다.

따라서  $\sigma = 1$ 과  $h_m/S_m = 10$ 의 조건에서, 딴플패턴의 깊이를 다르게 했을 때 어떤 윤활현상을 나타내는지 알아보기 위해 딴플 깊이를 1, 2, 3, 4, 5  $\mu\text{m}$  깊이로 패턴을 만들고 해석을 수행하였다. Fig. 10은 딴플패턴의 깊이에 따른 이론해석 결과를 나타낸다. 기준 대상인 딴플 패턴이 없는(No-pattern)의 경우가 전 영역에 걸쳐 마찰계수가 가장 크게 나타났다. Fig. 10의 결과를 살펴보면, 딴플 깊이에 따라 윤활특성을 다르게 나타나기도 하지만, 혼합윤활 영역과 유체윤활 영역에서의 현상이 다르게 나타난다. 먼저, 혼합윤활 영역에서는 딴플의 깊이가 깊을수록 마찰계수가 커지고 깊이가 작아질수록 마찰계수가 더 작아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 딴플 깊이가  $1\mu\text{m}$ 인 경우, 깊이  $5\mu\text{m}$ 인 경우보다 더 마찰계수가 크게 나타났다. 즉, 딴플의 깊이가  $2\mu\text{m}$  미만으로 내려갈 경우부터 딴플의 깊이가 마찰특성에 오히려 더 안 좋은 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 깊이가  $1\mu\text{m}$ 인 딴플 패턴의 마찰계수 특성을 살펴보면, 패턴이 없는 경우와 유사한 그래프를 나타낸다. 딴플의 깊이가  $1\mu\text{m}$ 로 작아져서 상대운동 시 경계면에 발생하는 유체유동이 패턴이 없는 표면과 큰 차이가 없기 때문에 마찰계

수에 거의 영향을 주지 않는 등 패턴으로써의 기능을 크게 나타내지 못하는 것으로 생각된다. 표면 패턴에서 패턴의 깊이는 매우 민감하다. 본 연구결과에 의하면 패턴의 깊이가 무조건 작을수록 마찰특성이 향상되는 것이 아니라 패턴 제작 시 깊이의 조절이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 두 번째로, 유체윤활 영역의 경우 혼합윤활 영역과는 다르게,  $1\mu\text{m}$ 의 깊이와 관계없이 딴플 깊이가 깊어질수록 마찰계수가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이 경우는 유막두께가 커지면서 표면 돌기에 의한 영향이 매우 작아지기 때문에 표면 패턴에 의한 영향을 크게 받은 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 표면의 돌기에 의한 영향을 고려하는 윤활 이론해석 연구를 수행하였다. 그 중 기존의 표면돌기의 유동영향을 고려하는 평균 유동 모델과 돌기 접촉에 의한 영향을 추가적으로 고려하여 새로운 해석방법에 대해서 제안하였다. 본 연구내용에 대한 결론을 다음과 같다.

- (1) 아무런 패턴이 없는 표면을 기준으로 적용하였을 때 표면 돌기에 의한 유동영향의 유무, 돌기 접촉에 의한 하중영향의 유무에 따라 달라지는 마찰계수와 마찰현상을 전 윤활영역에서 확인할 수 있었다.
- (2) 또한 돌기 접촉과 딴플 패턴이 있는 표면을 사용하여 윤활영향에 미치는 효과에 대해서도 알아보았다. 두 상대면 사이의 기울기(Slope)와 패턴 깊이(Dimple depth)를 변수로 하였다. 그 결과, 마찰 운동하는 두 상대면에 발생하는 기울기에 따라 마찰계수나 패턴에 의한 영향이 달라질 수 있다는 것을 확인하였고, 혼합윤활과 유체윤활 영역에서 딴플의 깊이에 따라 마찰계수가 무조건 규칙적인 경향을 나타내지 않는다는 것을 확인하였다.
- (3) 윤활현상은 운동하는 표면의 표면거칠기에 의한 유동 및 접촉영향을 무시할 수 없을 정도로 크게 받으며, 운동하는 상대면 간의 기울기에 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다.



## 후 기

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

## REFERENCES

1. Kim, J., Je, T. J., Cho, S. H., Jeon, E. C., and Whang, K. H., “Micro-cutting with diamond tool micro-patterned by femtosecond laser,” International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 15, No. 6, pp. 1081-1085, 2014.
2. Riaz Ahmad Mufti, “Total and Component Friction in a Motored and Firing Engine”, A Thesis for a Doctorate, University of Leeds, United Kingdom, 2004.
3. Lee, S. M., Lee, D. W., Ha, Y. H., Lee, S. J., Hwang, J. H., & Choi, Y. H., “A study on the influence of waviness error to a hydrostatic bearing for a crankshaft pin turner,” Tribology Transactions, Vol. 56, No. 6, pp. 1077-1086, 2013.
4. Tzeng, S.T, Saibel, E., “Surface Roughness Effect on Slider Bearing Lubrication,” ASLE Transactions, Vol. 10, pp.334-338, 1967.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Susan, R. H., Salant, R.F., “An Average Flow Model of Rough Surface Lubrication with Inter-Asperity Cavitation,” ASME Journal of Tribology, Vol.123, No.1, pp.134-143, 2001.
9. Lee, S. M., “A study on the lubrication and friction characteristics of the contact surface through the surface analysis”, A Thesis for a Doctorate, Pusan National University, Republic of Korea, 2015.
10. Retrieved from [http://www.olympusims.com/fr/knowledge/metrology/roughness/2d\\_parameter/](http://www.olympusims.com/fr/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/)