

반구형 및 반타원형으로 텍스처링된 평면 베어링의 부하지지능력과 등가마찰계수에 대한 해석

이수영⁺, 김필기⁺, 석종혁⁺⁺, 석종원^{*}

(Manuscript received: Mar, 30, 2012 / Revised: Jun, 29, 2012 / Accepted: Jul, 11, 2012)

A Study on the Load Carrying Capacity and Equivalence Friction Coefficient of a Textured Plane Bearing with Semi-spherical Dimples and Semi-ellipsoidal Dimples

Sooyoung Lee⁺, Pilkee Kim⁺, Jonghyuk Seok⁺⁺, Jongwon Seok^{*}

Abstract

The increase of energetic efficiency in plane bearing is getting more important in the transfer mechanism of semi-conductor and display panel manufacturing processes. To accomplish this objective, the technique of surface texturing on bearing surface has recently emerged as one of the most effective candidates. In this study, the effects of various pattern parameters on two bearing performance indices(load carrying capacity and effective friction coefficient) are investigated through a semi-analytic method, i.e., the 2-dimensional Reynolds equation incorporated into the finite difference scheme. Here, cavitation effect is also taken into account by employing an appropriate numerical scheme.

In this study, the patterns in the textured surface are composed of a series of semi-spheres or semi-ellipsoids in shape. The effects of their size and number density on the performance indices are examined through the performance of various numerical experiments. Also, the effects of the anisotropy of the semi-ellipsoidal pattern on the bearing's lubrication characteristics are investigated and discussed.

Key Words : Plane bearing(평면 베어링), Surface texturing(표면 텍스처링), Cavitation(공동 현상), Semi-spherical dimple(반구형 딴플), Semi-ellipsoidal dimple(반타원체 딴플)

1. 서론

반도체 제조 공정은 크게 웨이퍼 제조공정, 웨이퍼 가공공정, 패키지 조립공정, 모듈 조립공정의 네 가지 공정으로 나뉘진다. 반도체 제조 공정은 이러한 단위 공정들을 반복적으로 수행하기 때문에 공정의 효율성 및 수월성 제고를 위해서는 에너지

측면에서 보다 효율적인 웨이퍼 이송과정이 요구된다. 한편, LCD로 대표되는 평판 디스플레이 패널의 경우, 점차 가속되고 있는 패널의 대형화 및 단위공정의 복잡성, 그리고 지구 온난화 및 기상이변을 방지하기 위한 그린 테크놀로지에 대한 지속적인 요구에 기인하여 이송과정의 효율성은 무엇보다도 중요해지고 있다^{(1,2)}}.

+ 중앙대학교 기계공학부 대학원
++ 인하공업전문대학 신소재공학부 화공환경과
* 교신저자, 중앙대학교 기계공학부 (seokj@cau.ac.kr)
주소: 156-756 서울특별시 동작구 흑석로 84

이러한 반도체 및 디스플레이 패널 등의 이송 과정에 많이 이용되는 평면 베어링은 윤활 면의 마찰·마모 저감이 에너지 효율 증대, 베어링의 수명 향상 및 폐기물 최소화 등을 결정하는 주된 인자가 된다. 최근에 들어, 이러한 윤활 면의 마찰 에너지를 최소화하기 위해 기존의 다축 머시닝 센터에 레이저 가공을 추가하여 표면의 미세형상을 가공하는 레이저 표면 텍스처링(surface texturing)기법 등이 개발되었다^(3,4). 이러한 베어링의 윤활특성을 크게 향상시킬 수 있는 표면 텍스처링의 장점에 기인하여 현재 베어링의 표면에 일정 패턴을 가공하는 연구가 많이 수행되고 있다⁽⁵⁻⁸⁾.

베어링 표면에 텍스처링으로 형성된 미세가공 형상(주로dimple)은 윤활면의 양압은 향상시키고 음압은 감소시켜 베어링의 하중지지능력을 향상시키고 윤활영역의 증대로 인한 저마찰 구조를 제공해 준다. 또한 이는 마모된 잔해물을 제거하는데 효과적일 뿐 아니라 윤활유를 저장하여 신뢰성을 향상시키는 역할도 하게 된다. 이러한 결과로 마모가 감소되고 이로 인한 매끄러운 계면을 형성하여 마찰계수 감소 현상을 야기하는 등 에너지 저감 및 베어링 수명향상 등에 지속적인 순기능을 제공한다.

이러한 표면의 텍스처링 가공을 위해서는 식각(Etching), 깊은 반응이온식각(Deep Reactive Ion Etching; DRIE), 집속이온빔(Focused Ion Beam; FIB) 등 반도체 공정을 이용하기도 하지만 이들 중 레이저를 이용한 표면 텍스처링 가공법은 다른 미세표면 가공법에 비하여 빠르고 간단한 공정으로 표면의 딥플 가공이 가능하며 레이저의 강도를 조절함으로써 딥플의 크기 및 형상 제어가 가능한 장점을 가지고 있어 현재 크게 각광받고 있는 가공법이다⁽⁹⁾.

평면 베어링 구동 시 상대운동을 하는 두 개의 표면 사이에 점성유체로 구성되는 얇은 윤활 막이 형성이 되는데 이의 윤활 특성을 해석하기 위해서는 주로 레이놀즈 윤활 방정식(Reynolds lubrication equation)이 사용된다. 한편, 윤활막 내에서 공동현상(Cavitation phenomenon)이 일어나는 경우 상기 방정식의 적용을 위해서는 공동현상에 의한 압력의 변화를 적절히 반영해야 한다. 특히 베어링에서 윤활면의 패턴을 이용하여 저마찰 특성을 얻기 위해서는 패턴 내 공동현상을 이용하게 되는데, 수치해석 시 음압이 대기압 이하로 떨어지게 되는 경우 해석적 방법으로 이를 반영하기 매우 어려운 문제가 야기되어 주로 수치해석적 방법을 이용하고 있다. 이러한 공동현상이 일어나는 경우에 대해 수치적 수단으로 이를 반영하는 연구는 크게 두 가지 방향으로 수행되었다. 그 중 하나는 레이놀즈 윤활 방정식의 변형 없이 수치적으로 해에 수정을 가하여 계산하는 방식과 다른 하나는 스칼라 변수 하나를 추가로 도입하여 식을 변형시킨 Elrod & Adams의 p-θ 모델의 도입이^(10,11) 현재 개발되어 널리 사용되고 있는 주된 방법들이다.

본 연구에서는 텍스처링 된 평면 베어링의 윤활 메커니즘을 해석하여 다양한 패턴 인자에 따른 윤활특성을 고찰하고 각 인

자들의 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해 베어링의 윤활 메커니즘은 레이놀즈 방정식을 사용하였고 이 방정식은 유한차분법(Finite difference scheme)을 이용하여 수치적으로 해석하였다. 한편, 패턴 내 공동현상은 Gauss-Seidel방법을 이용하여 음압이 나오는 영역을 수치적으로 제거하고 반복적 계산을 통해 수렴된 결과를 도출하였다. 미세 가공된 패턴의 형상은 반타원형으로 이들의 크기, 개수 밀도와 같은 형상인자의 변화에 의한 두 가지 성능지수, 즉 윤활 막의 부하지지능력(Load Carrying Capacity)과 윤활 면에 작용하는 등가마찰계수(Equivalence Friction Coefficient)의 변화를 도출하여 각 인자들의 이들 베어링 성능지수들에 대한 영향을 파악하였다.

2. 해석 방법

일반적으로 유체의 유동 해석에는 Navier-Stokes방정식(N-S 방정식)과 레이놀즈 방정식이 사용된다. 이 중 N-S 방정식을 사용하여 3차원 표면 텍스처링에 대한 해석을 수행 할 경우 보다 정확한 계산이 가능하지만 장시간의 계산이 요구되는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 해석 대상을 베어링에 국한하고 이에 따라 N-S 방정식 대신 레이놀즈 방정식을 이용하여 해석을 수행하였다. 본 해석의 타당성 검증을 위해 하나의 2차원 반구형 딥플 형상으로 표면이 가공 된 베어링 면과 하단의 고정판(Fig. 1 참조) 사이에 형성된 윤활 막의 압력분포 경향에 대하여 N-S 방정식과 레이놀즈 방정식을 사용하여 해석을 수행하고 이 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 이 그림에서는 상기 두 가지 방법으로 수행한 해석결과들은 거의 차이가 없음을 확인할 수 있으며 따라서 본 연구에서 사용한 변수들이 해석적으로 레이놀즈 방정식을 사용하기에 적절한 범위의 값들을 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 해석 대상인 평면 베어링을 점성 유체의 내부 유동이 있는 채널이라 가정을 하였고, 이 채널은 가로·세로의 길이가 동일한 사각 평면에 x, y, z축 방향이 각각 R_x , R_y , R_z 로 이루어진 반타원형 딥플이 x축과 y축으로 일정한 간격으로 분포되어 있는 형태로 모델링을 하였다. 이러한 반타원형 형상으로 미세 가공 된 평면 베어링의 형상은 Fig. 3에 표현되어 있다. 한편, 본 해석에 사용된 레이놀즈 방정식은 아래 식 (1)과 같으며, 패턴 내 영역에서는 조밀하게 격자를 구성하고 이 외의 영

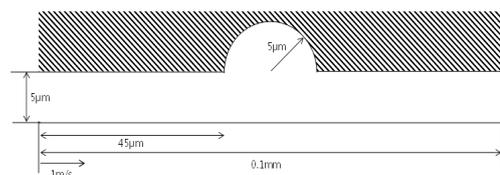


Fig. 1 Configuration of the channel with a half-spherical dimple used in the analyses

역은 보다 성기계 격자를 구성하기 위해 이 편미분 방정식을 식 (2)와 같이 변형된 유한차분식으로 변환하여 수치해석을 수행 하였다.

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

$$= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} (u_b - u_a) + \frac{\partial h}{\partial y} (v_b - v_a) \right\}$$

$$+ \frac{h}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (u_a + u_b) + \frac{\partial}{\partial y} (v_a + v_b) \right\} + w_a - w_b$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \alpha} = \frac{\Delta \alpha_{i-1} (\beta_{i+1,j} - \beta_{i,j}) + \Delta \alpha_i (\beta_{i,j} - \beta_{i-1,j})}{2 \Delta \alpha_{i-1} \Delta \alpha_i} \quad (2-a)$$

$$\frac{\partial^2 \beta}{\partial \alpha^2} = \frac{2 \{ \Delta \alpha_{i-1} (\beta_{i+1,j} - \beta_{i,j}) - \Delta \alpha_i (\beta_{i,j} - \beta_{i-1,j}) \}}{\Delta \alpha_{i-1} \Delta \alpha_i (\Delta \alpha_{i-1} + \Delta \alpha_i)} \quad (2-b)$$

본 논문에서는 각각 등방형 및 이방형 딤플을 고려하기 위해 딤플을 반구형 딤플과 반타원형 딤플로 모델링하였다.

식 (1)의 h는 윤활막이 형성되어 있는 채널의 높이, R_x, R_y, R_z 는 각각 x, y, z축에 대한 딤플의 반지름, η 는 해석에 사용된

윤활유의 점도이다. 딤플이 있는 평면의 x축, y축, z축 속도는 각각 u_a, v_a, w_a , 딤플이 없는 평면의 속도는 각각 u_b, v_b, w_b 이다.

본 연구에서는 해석의 편의성을 위해 반구형 딤플의 경우 $u_a = v_a = w_a = 0$ m/s, $u_b = 1$ m/s의 속도조건을 인가하였으며 반타원형 딤플의 이방성에 대한 해석을 위한 속도조건은 각각 $u_a = v_a = w_a = 0$ m/s, $u_b = 1$ m/s와 $u_a = u_b = v_a = 0$ m/s, $v_b = 1$ m/s를 인가하였다.

한편, 채널의 경계조건으로 외부의 압력은 대기압으로 설정하였고, 공동현상이 발생하는 딤플의 입구 부분에는 윤활 유체의 증기압을 최소 압력으로 설정하였다. 또한 점성 유체의 두께, 즉 채널의 높이는 5 μ m이고 채널의 길이는 0.5mm으로 설정하였다. 이러한 조건에서 반구형 및 반타원형 딤플의 크기와 개수밀도를 변화시키며 부하지지능력과 등가마찰계수를 구하여 이들 패턴의 베어링 성능에 대한 영향을 분석하였다. 또한 반타원형 딤플의 반지름 변화에 따른 영향을 고찰하기 위해 레이놀즈 방정식의 기하학적 제한 조건을 만족시키며 딤플의 높이를 조절하는 방법을 사용하였다⁽¹²⁾.

3. 해석 결과

3.1 반구형 딤플과 반타원형 딤플의 크기와 개수밀도 변화에 따른 베어링 성능지수의 변화

반구형 딤플과 반타원형 딤플의 크기는 이들의 반경으로 변화시켰으며 x축으로 5개, y축으로 5개로 총 25개의 딤플에 대해 계산을 수행하였다. 한편, 반타원형 딤플의 반경은 x축의 반경(R_x)을 Fig. 4와 Fig. 5에 명시되어 있는 바와 같이 1-9 μ m 사이에서 변화시켰으며, y축의 반경(R_y)과 z축의 반경(R_z)의 값은 5 μ m로 동일하게 고정하여 해석을 수행하였다.

딤플의 밀도는 전체 면적의 36%에 해당하는 면적에 딤플의

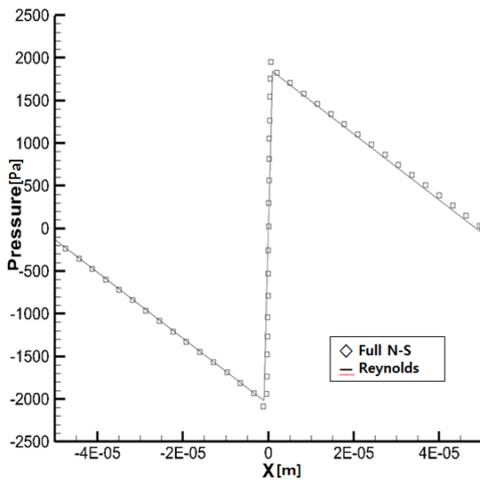


Fig. 2 Comparison of pressure profiles obtained from the N-S equation and the Reynolds equation

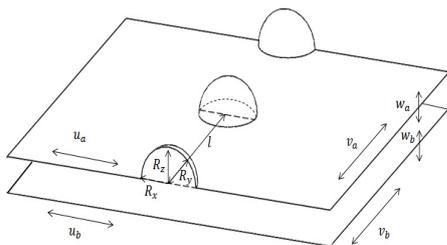


Fig. 3 Schematic of the plane bearing surface textured in semi-ellipsoidal dimples

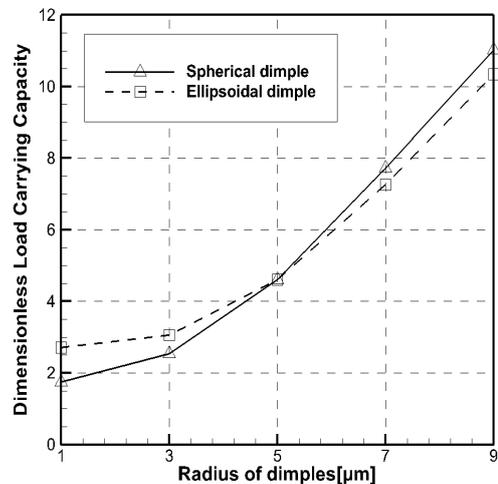


Fig. 4 Variations of Load Carrying Capacity with the increasing dimples radius

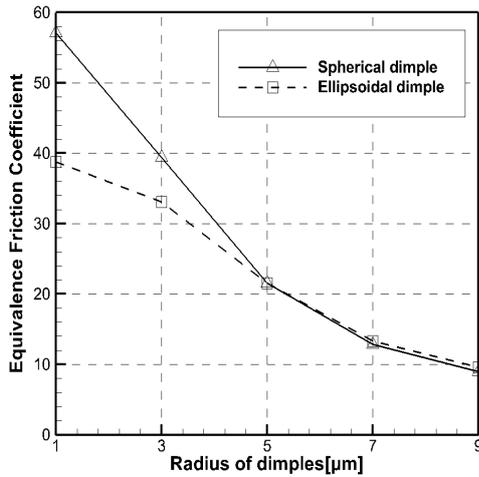


Fig. 5 Variations of Equivalence Friction Coefficient with the increasing dimples radius

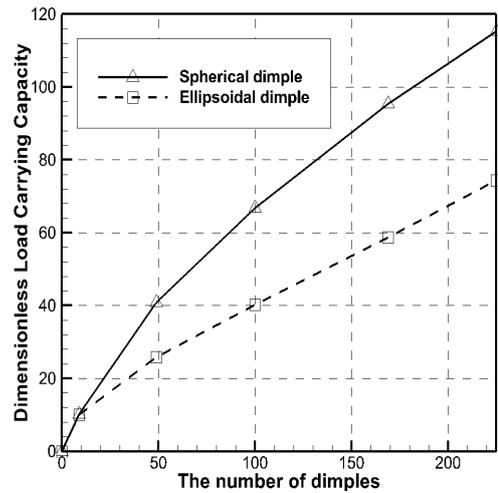


Fig. 6 Variations of Load Carrying Capacity with the increasing dimple number

크기를 고정 시킨 채 개수밀도를 증가시키며 변화시켰다. 이 때 기준이 되는 반구형 뎀플의 반지름은 5μm이고 반타원형 뎀플은 $R_x=1\mu m$, $R_y=5\mu m$, $R_z=5\mu m$ 이다. 그리고 유한차분법 격자의 개수는 15000-25000 사이에서 채널의 형상에 따라 유연하게 변화시키며 계산을 수행하였다.

또한 해석에 사용한 윤활유는 물의 물성치를 사용하였다. 이 때 점도는 0.013 Pa-s, 뎀플의 입구와 출구부에서 발생하는 공동 현상을 반영하기 위한 윤활유의 증기압은 50kPa, 채널 외부의 압력인 대기압은 100kPa로 정하고 해석을 수행하였다.

3.1.1 반구형 뎀플과 반타원형 뎀플의 크기 변화에 따른 베어링 성능지수의 변화

Fig. 4와 Fig. 5는 반구형 뎀플과 반타원형 뎀플의 반지름 변화에 따른 부하지지능력과 등가마찰계수에 대한 해석 결과이다. 반타원형 뎀플의 경우 R_y, R_z 의 반지름은 5μm로 유지된 채로 R_x 의 길이만 변화시켰기 때문에 반지름이 5μm이하일 경우에는 반구형 뎀플보다 부하지지능력의 값이 더 커지게 된다. 그러나 반지름이 5μm보다 커지면 반구형 뎀플의 경우가 반타원형 뎀플보다 부하지지능력이 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 연구에서 다룬 해석영역 내에서는 x축의 반지름이 커질수록 압력변화가 커지게 되고 부하지지능력의 값이 전체적으로 증가하게 된다. 그러나 상대적으로 x축의 압력변화가 y축의 압력변화보다 크기 때문에, y축의 반지름 차이로 인한

압력 차이는 거의 무시되고 이로 인해 반지름이 증가하여도 반타원형 뎀플과 반구형 뎀플의 부하지지능력의 차이는 거의 변화하지 않는다.

한편, 반지름이 1μm일 경우 등가마찰계수의 값은 반타원형 뎀플의 값이 반구형 뎀플의 경우보다 약 32% 감소한 값을 가지게 된다. 또한 반지름이 증가할수록 이러한 차이는 점점 감소

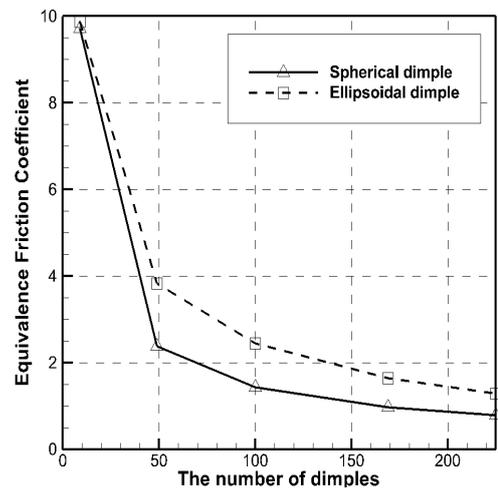


Fig. 7 Variations of Equivalence Friction Coefficient with the increasing dimple number

하게 되고 5μm를 지나면 반구형 뎀플의 등가마찰계수가 반타원형 뎀플의 값보다 작아지게 된다. 그러나 두 경우의 등가마찰계수의 차이는 3~6% 정도로 상대적으로 미미하게 나타났다. 등가마찰계수는 뎀플이 가공되어있는 평면에 작용하는 전단력과 윤활막에서 발생하는 압력으로 인한 부하지지능력의 비로 나타낼 수 있다. 전단력 또한 압력에 의존하는 값이기 때문에 반구형 뎀플과 반타원형 뎀플의 반지름이 증가할수록 전단력은 비슷한 값을 나타낸다. 이 때문에 Fig. 5의 경향과 같이 두 경우의 등가마찰계수가 거의 차이가 없게 된다.

3.1.2 반구형 뎀플과 반타원형 뎀플의 개수밀도 변화에 따른 베어링 성능지수의 변화

Fig. 6와 Fig. 7은 각각 뎀플의 개수밀도가 증가할 경우의 부

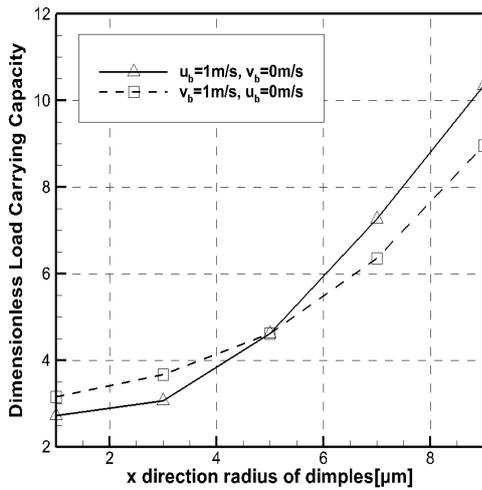


Fig. 8 Variations of Load Carrying Capacity with the increasing R_x of dimples

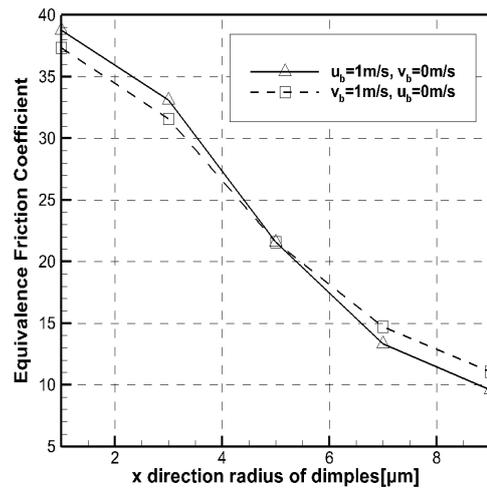


Fig. 9 Variations of Equivalence Friction Coefficient with the increasing R_x of dimples

하지지능력과 등가마찰계수의 값에 대한 그래프들이다. 이 경우 뎀플은 x, y축으로 동일하게 그 개수를 증가시켰다.

우선 부하지지능력은 반구형 뎀플의 경우가 반타원형의 경우보다 전체적으로 높은 값을 나타낸다. 뎀플의 개수밀도가 낮을 경우 두 값의 차이는 약 1% 정도로 거의 차이가 없으나 개수밀도가 증가할수록 이러한 차이는 점점 커지게 된다. 이는 두 뎀플의 형상에 따른 압력 변화 값의 차이라고 판단되는데, 그 이유는 반타원형 뎀플의 경우 뎀플의 개수밀도가 증가하더라도 R_x 의 값은 $1\mu\text{m}$ 이기 때문에 반구형 뎀플에 비해 상대적으로 작은 압력변화가 발생하기 때문이다. 또한 부하지지능력은 주로 압력 변화에 의존하는 값이므로 일반적으로 반구형 뎀플의 경우가 반타원형 뎀플보다 더 높은 값을 가지게 된다.

한편, 등가마찰계수의 값은 두 경우 모두 비슷한 경향을 보인다. 뎀플의 개수밀도가 증가 할수록 두 경우 모두 값이 작아지고 그 격차가 점점 줄어들게 된다. 뎀플의 개수밀도가 낮을 경우에는 둘의 차이가 거의 없지만 개수밀도가 증가할수록 그 둘의 차이가 커지게 된다.

3.2 반타원형 뎀플의 크기 변화에 따른 베어링 성능지수의 변화

Fig. 8과 Fig. 9은 반타원형 뎀플의 이방성 효과를 알아보기 위해 뎀플의 개수는 25개로 고정하고 의 값을 변화시키며 case (a): $u_a = v_a = v_b = 0, u_b = 1\text{m/s}$ 와 case (b): $u_a = u_b = v_a = 0, v_b = 1\text{m/s}$ 을 인가했을 때의 부하지지능력과 등가마찰계수의 결과이다. 이 때 R_y 와 R_z 의 값은 $5\mu\text{m}$ 로 동일하게 설정 하였다.

우선 부하지지능력의 경우는 전 절의 경우와 마찬가지로 반지름이 증가 할수록 이 값이 증가하게 되지만 R_x 의 값이 $5\mu\text{m}$ 가 되기 전까지는 case (b)의 경우가 case (a)의 경우보다 더

높은 값을 가지게 되는 것을 알 수 있다. R_x 의 값이 R_y 보다 작은 경우에는 case (b)의 압력 변화가 case (a)의 경우보다 더 크게 나타나기 때문이다. 그러나 R_x 가 점점 증가하게 되면 압력 변화의 정도가 case (a) 일 경우가 case (b)의 경우보다 더 크게 되므로 부하지지능력은 증가하게 된다. R_x 가 $1\mu\text{m}$ 에서 $9\mu\text{m}$ 로 변하는 동안 부하지지능력은 case (a)일 때 74%, case (b)일 때 63% 변하게 된다.

한편, 등가마찰계수도 부하지지능력과 마찬가지로 R_x 의 값이 $5\mu\text{m}$ 가 되기 전에는 case (b)의 경우가 case (a)의 경우에 비해 더 낮은 값을 가지게 되지만 그 이후부터는 case (a)의 경우가 더 낮은 값을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 반도체 및 평판 디스플레이 패널의 이송 시 사용하는 평면 베어링의 윤활면에 텍스처링을 가공하는 경우 베어링의 성능지수들(부하지지능력과 등가마찰계수)에 대한 표면의 미세패턴의 영향을 고찰하기 위한 연구를 수행하였다.

이를 위해 반구형 뎀플과 반타원형 뎀플의 형태가 표면에 텍스처링 된 경우에 대해 반해석적인 방법으로 연구를 수행하였으며 이 때 반구형 뎀플과 반타원형 뎀플의 크기와 개수밀도를 변화시킨 경우와 반타원형 뎀플의 크기를 변화시킨 경우에 대한 해석을 수행하였다.

해석 결과, 모든 경우에서 부하지지능력은 뎀플의 크기가 증가할수록 또는 뎀플의 개수밀도가 증가할수록 증가하게 되고 등가마찰계수는 감소하게 되는 경향을 고찰하였다. 또한 뎀플에 의한 압력 변화가 클수록 부하지지능력이 증가하게 되며 압력 변화는 뎀플의 크기와 개수밀도에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(과제번호: 10039982).

References

- (1) Sun, Y., and Rogers, J. A., 2004, "Fabrication Semiconductor Nano/Micowires and Transfer Printing Ordered Arrays of Them onto Plastic Substrates," *Nano Letters*, Vol. 4, No. 10, pp. 1953~1959.
- (2) Nam, H. W., 2008, "Six Sigma Robust Design of Composite Hand for LCD Glass Transfer Robot," *Advanced Materials Research*, Vol. 33-37, pp. 1451~1456.
- (3) Tala-Ighil, N., Fillon, M., and Maspeyrot, P., 2011, "Effect of Textured Area on the Performances of a Hydrodynamic Journal Bearing," *Tribology International*, Vol. 44, No. 3, pp. 211~219.
- (4) Kim, K. H., Park, J. K., and Lee, J. H., 2012, "Laser Surface Texturing to Improve Osteoblast Cell Biocompatibility of Orthopedic Implant," *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 2012*, pp. 283.
- (5) Etsion, I., 2004, "Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing," *Tribology Letters*, Vol. 17, No. 4, pp. 733~737.
- (6) Borghi, A., Gualtieri, E., Marchetto, D., Moretti, L., and Valeri, S., 2008, "Tribological Effects of Surface Texturing on Nitriding Steel for High-performance Engine Applications," *Wear*, Vol. 265, No. 7-8, pp. 1046~1051.
- (7) Ronen, A., Etsion, I., and Kligerman, Y., 2001, "Friction-reducing Surface-texturing in Reciprocation Automotive Components," *Tribology Transactions*, Vol. 44, Issue. 3, pp. 359~366.
- (8) Kim, J. H., Ko, T. J., Kim, H. C., and Park, J. K., 2011, "A Study on Dressing of Grinding Wheel for Surface Texturing," *Proceeding of the KSMTE Spring Conference 2011*, pp. 224.
- (9) Brizmer, V., Kligerman, Y., and Etsion, I., 2004, "A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing," *Tribology Transactions*, Vol. 46, No. 3, pp. 397~403.
- (10) Ausas, R. F., Jai, M., and Buscaglia, G. C., 2009, "A Mass-conserving Algorithm for Dynamical Lubrication Problems with Cavitation," *Journal of Tribology*, Vol. 131, Issue3, pp. 1~7.
- (11) Ausas, R., Ragot, P., Leiva, J., Jai, M., Bayada, G., and Buscaglia, G. C., 2007, "The Impact of the Cavitation Model in the Analysis of Microtextured Lubricated Journal Bearings," *Journal of Tribology*, Vol. 129, No. 4, pp. 868~875.
- (12) Dobrica, M. B., and Fillon, M., 2009, "About the Validity of Reynolds Equation and Inertia Effects in Textured Sliders of Infinite Width," *Journal of Engineering Tribology*, Vol. 223, No. 1, pp. 69~78.