

Surface Topography를 이용한 평행 스러스트 베어링의 혼합윤활 해석

이동길, 임윤철*

연세대학교 대학원 기계공학과

*연세대학교 기계전자공학부

An Analysis of Mixed Lubrication in Thrust Bearing by Surface Topography

Dong-Gil Lee and Yoon-Chul Rhim*

Graduate School Yonsei Univ.

*School of Electrical and Mechanical Eng. Yonsei Univ.

ABSTRACT—This paper describes the surface roughness effect in parallel thrust bearing. In mixed lubrication, some contacts will take place between asperities, and partial lubrication will occur. An average Reynolds Equation is utilized to determine effects of surface roughness on partially lubricated contacts. By using an autocorrelation function for the surface profile, surface model is generated numerically. Although the two surfaces are parallel in thrust bearing separated by thin film, the pressure peak is formed due to asperities. By means of surface profile parameters, it is shown that which surface is optimal for the parallel thrust bearing.

Key words surface roughness, autocorrelation Function, thrust bearing, surface parameters

1. 서론

베어링의 윤활해석에 있어서 상대운동 하는 두 개의 표면은 많은 경우 이론적으로 매끄럽다고 가정한다. 다시 말해 윤활문제의 해석에서 이상적으로 매끄러운 표면이라는 가정은 주로 hydrodynamic 윤활 조건에서 큰 무리 없이 행하여져 왔다. 그러나 현대에 와서 초고속, 초 정밀, 고 신뢰성 제품이 요구되고 고온, 고압, 진공과 같은 특수환경에서 윤활표면의 접촉조건은 더욱 더 악조건이 요구된다. 이러한 경우 표면특성에 대한 분석은 Tribology 문제와 함께

윤활해석에 있어서도 매우 중요하고 표면 거칠기의 영향을 고려하여 베어링을 해석할 때에는 지금까지와는 다른 윤활해석이 이루어져야 한다.

표면 거칠기를 고려한 베어링의 문제는 지금까지 꾸준히 연구되어 왔다. Patir and Cheng(1978,1979)이 Average Reynolds Eq 을 유도하여 최초로 표면 거칠기 영향을 고려한 베어링 윤활 문제를 해석했다.[5,6] 여기서 Patir와 Cheng은 여러 가지 방향성을 갖는 표면의 Flow Factor를 구하고 평균 압력분포를 구했다.

근래의 연구에서 Tripp는 Flow factor를 섭동법에 의하여 구했고[6] 두 유체가 균질하게 혼합(homogeneous mixture)된 조건에서 평균압력분포를 구한 연구도 있다.

지금까지의 연구에서 표면 거칠기의 정도를 나타내는 파라미터로써 Rq(자승평균거칠기)의 영향을 주로 보았다. 그러나 표면거칠기 파라미터는 그 외에도 여러 가지가 있으며 그러한 파라미터를 포함한 해석은 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 표면거칠기 파라미터 값에 따른 표면의 구조를 수치해석적으로 예측하고 평행 스톱베어링에서 표면 거칠기의 영향을 고려함으로써 거칠기 파라미터에 따른 베어링의 특성을 해석하여 최적의 스톱베어링의 표면 구조를 거칠기 파라미터로서 표현하고자 한다. 이러한 해석을 함으로써 간극이 매우 작아서 발생할 수 있는 두 표면의 부분적인 접촉상태에서의 윤활문제도 또한 해석이 가능해진다.

2. 이론해석

2.1 표면거칠기 파라미터

표면의 거칠기를 정량적으로 나타내는 파라미터에는 r.m.s(Rq)라고 하는 값이 많이 사용된다. 앞에서 언급한 표면거칠기를 고려한 베어링의 연구에서 가장 많이 사용한 파라미터이다. 하지만 거칠기 파라미터는 그 외에도 여러 가지가 있으면 Rq값 만으로써 거칠기를 나타내기에는 불충분하다. 따라서 가능한 많은 파라미터를 고려함으로써 표면의 구조를 더 정확히 나타낼수 있다. 해석에 앞서 아래에 표면거칠기 파라미터를 정리하면 Table 1.과 같다.

여기서 Z_i 는 중심선에서 거칠기 곡선까지의 높이이고 $\phi(z)$ 는 확률밀도함수(probability density function)이다. 그리고 $2L$ 은 기준길이가 된다. 본 논문에서는 파라미터를 2차원 거칠기 곡선에서 3차원 표

면으로 확장하여 계산했다. 즉 Z_{ij} 는 x방향에서 i번째 노드와 y방향의 j번째 노드에 해당되는 높이이다.

Table 1. Surface parameters

파라미터	정의
Ra (Arithmetic Average)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i $ $= 2 \int_{-\infty}^{\infty} z \bar{\phi} dz$
Rq (Root Mean Square)	$\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_i)^2 \right)^{1/2}$ $= \left(\int_{-\infty}^{\infty} z^2 \bar{\phi} dz \right)^{1/2}$
Ry (Maximum peak to valley height)	$\max(z) - \min(z)$
Rz (Ten point height of irregularities)	$\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (Z_{p_i}) + \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (Z_{v_i})$
\mathcal{J}_a (Arithmetic mean slope)	$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \tan^{-1} \left \frac{\Delta Z_i}{\Delta X_i} \right \right\}$
\mathcal{J}_q (Root Mean Square slope)	$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \tan^{-1} \left(\left \frac{\Delta Z_i}{\Delta X_i} \right \right)^2 \right\}^{1/2}$
λ_a (Average wavelength)	$360 \times \frac{Ra}{\Delta a}$
λ_q (Root Mean Square of wavelength)	$360 \times \frac{Rq}{\Delta a}$
Sk (Skewness)	$\frac{1}{Rq^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^3 =$ $\frac{1}{Rq^3} \int_{-\infty}^{\infty} z^3 \bar{\phi} dz$
Ku (Kurtosis)	$\frac{1}{Rq^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^4 =$ $\frac{1}{Rq^4} \int_{-\infty}^{\infty} z^4 \bar{\phi} dz$
HSC (Hot Spot Count)	Count peaks (0-50%) of the Ry

여기서 파라미터를 다시 분류하면 Ra, Rq, Rz, Rc, Ry는 Profile Parameters, HSC는 spacing parameter, $\Delta a, \Delta q, \lambda_a, \lambda_q$ 는 hybrid parameters 그리고 Sk, Ku,는 Probability parameters로 나누어 진다.

2.2 Surface modeling

표면의 거칠기를 지배방정식에 대입하기 위하여 먼저 표면에 대한 정보가 있어야 한다. 가장 많이 알려져 있는 표면조도 측정장치인 측정식 방법을 비롯한 대부분의 장비는 시편 전체의 면적에 비하여 일부분에 대한 정보만을 제공한다. 따라서 표면 전체에 대한 정보를 얻기 위해서 수학적으로 표면을 모델링 하여야 한다. 수학적으로 표면을 모델링하는 방법에는 A.C.F. (autocorrelation function)을 이용한 랜덤 프로세스이론을 이용한다.[1,2] 즉 임의의 거칠기를 가지는 표면의 만들기 위해 Rq(r.m.s)값을 비롯하여 표면의 방향성을 나타내주는 correlation length를 가정하여 표면을 모델링한다. 공간 변수에 대한 A.C.F.의 정의는 다음과 같다

$$R(\lambda_x, \lambda_y) = E[z(x, y)z(x + \lambda_x, y + \lambda_y)]$$

E : averaging operator, λ_x, λ_y : delay length

$$R(0, 0) = \sigma^2 \quad (1)$$

x, y 각각의 노드번호인 i, j로 다시 표현하면 아래와 같이 된다.

$$R_{p,q} = R(p\Delta x, q\Delta y) = E(z_{ij}, z_{i+p, j+q})$$

$$= \frac{1}{(N-p)(M-q)} \sum_{i=1}^{N-p} \sum_{j=1}^{M-q} z_{ij} z_{i+p, j+q}$$

$$= \sum_{k=1}^{n-p} \sum_{l=1}^{m-q} a_{kl} a_{k+p, l+q} \quad (2)$$

$p = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad q = 0, 1, 2, \dots, m-1$

여기서 Z_{ij} 는 다음과 같이 가정된다 [2]

$$z_{i,j} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m a_{kl} \eta_{i+k, j+l} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, M$$

$$[z_{i,j}] = [N \times M], [R_{p,q}] = [n \times m]$$

$R_{p,q}$ is zero, if $p \geq n, q \geq m$ (3)

위 식(3)과 같이 표현한 이유는 대부분의 공학적 표면의 거칠기 높이에 대한 확률 밀도함수의 분포는 가우시안(Gaussian) 분포에 가깝기 때문이다.[10] 여기서 η_{ij} 는 다음과 같다.[2]

$\eta_{ij} [(N+n) \times (M+m)]$: zero mean, unit standard deviation

$$E(\eta_{ij}, \eta_{kl}) = \begin{cases} 1, & \text{if } i=k, j=l \\ 0, & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

식(2)은 $a_{kl} [n \times m]$ 을 풀기위한 비선형 방정식으로서 Newton 반복법에 의해 결정된다. 그리고 최초로 $R_{p,q} = 0$ 이 될 때의 x, y 방향의 delay length를 각각 λ_x^*, λ_y^* 라고 하면 correlation length ratio γ 는 다음과 같이 정의된다.[2]

$$\lambda_x^* = n\Delta x, \lambda_y^* = m\Delta y, \gamma = \frac{\lambda_x^*}{\lambda_y^*} = \frac{n}{m} \quad (5)$$

Autocorrelation function은 표면 거칠기 높이의 주기성을 말해주는 함수로써 delay length가 증가함에 따라 점차 감소하여 '0'에 근접한다. 따라서 다음과 같이 지수적으로 감소하는 함수로 생각한다

$$R_{pq} = \exp \left[-2.3 \left\{ \left(\frac{p}{p^*} \right)^2 + \left(\frac{q}{q^*} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \quad (6)$$

식(6)을 식(2)에 대입하여 비선형 방정식의 해, a_{kl} (coefficients of transformation matrix)를 구함으로써 식(3)에 대입하여 Z_{ij} 를 구할 수 있다.

2.3 지배 방정식

표면 거칠기를 고려한 레이놀즈 방정식은 Average Reynolds Eq으로써 Patir & Cheng은 다음과 같은 방법으로 유도했다.[5] 아래의 Fig.1과 같은 검사체적에서 면적 $dx dy$ 내에는 많은 요철(asperities)을 포함하고 있으며 전체 베어링 면적에 비하여 매우 작다고 본다. 이때 단위 길이당 x, y 방향의 평균유량 \bar{q}_x, \bar{q}_y 는 식 (7)과 같다. 슬라이딩 방향은 x 방향에 대한 것만 고려한다.

$$\begin{aligned} q_x &= -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} h \\ q_y &= -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (7)$$

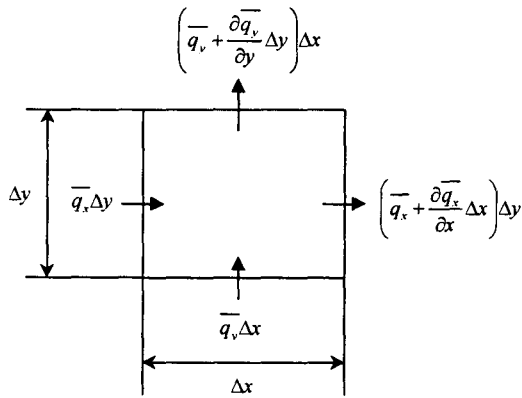


Fig. 1

여기서 \bar{q}_x, \bar{q}_y 는 정의에 의해 식(8)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \bar{q}_x &= \frac{1}{\Delta y} \int_{y'}^{y'+\Delta y} q_x dy = \frac{1}{\Delta y} \int_{y'}^{y'+\Delta y} \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} h \right) dy \\ &= -\phi_x \frac{h_o^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \bar{h} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \phi_s \right) \\ \bar{q}_y &= \frac{1}{\Delta x} \int_{x'}^{x'+\Delta x} q_y dx = \frac{1}{\Delta x} \int_{x'}^{x'+\Delta x} \left(-\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) dx \\ &= -\phi_y \frac{h_o^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 Patir & Cheng은 표면의 요철이 없는 표면에 대한 압력분포와 거칠기를 가

진 표면에 대한 압력분포를 비교하기 위해 pressure flow factor ϕ_x, ϕ_y 를 도입했다.[5] 그리고 ϕ_s 는 슬라이딩 하는 표면의 거칠기로 인한 추가적 유동(the additional flow)을 고려한 factor이다.[5] 대부분의 공학적 표면의 거칠기 값은 랜덤한 성질을 가지고 있으며 이러한 표면에서 얻어지는 국부적인 압력(local pressure) 또한 랜덤한 성질을 가지고 있다. 따라서 평균유량 \bar{q}_x, \bar{q}_y 을 이용하여 검사체적에 대한 질량보전법칙을 식(9)와 같이 적용하여 Average Reynolds Eq을 유도함으로써 거칠기가 고려된 표면에 대한 평균 압력분포를 구할수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \left(\bar{q}_x + \frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y - \bar{q}_x \Delta y + \left(\bar{q}_y + \frac{\partial \bar{q}_y}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x - \bar{q}_y \Delta x \\ = -\Delta x \Delta y \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 검사체적의 $dz=1$ 이다. (9)를 다시 쓰면 아래와 같다

$$\frac{\partial \bar{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}_y}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \quad (10)$$

식(8)의 결과를 이용하여 식(10)에 대입하면 다음과 같은 Average Reynolds Eq이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_x \frac{h_o^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_y \frac{h_o^3}{12\mu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) \\ = \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{U_1 - U_2}{2} \sigma \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 h_o 는 nominal film thickness로써 각 표면의 mean line사이의 거리이며 일정하다. σ 는 표면1과 표면2에서의 r.m.s값을 각각 Rq_1, Rq_2 라고 했을 때 다음과 같다

$$\sigma = \sqrt{Rq_1^2 + Rq_2^2}$$

pressure flow factor, ϕ_x, ϕ_y 와 shear flow

factor, ϕ_s 는 표면의 거칠기 파라미터인 r.m.s값과 correlation length ratio 값에 의해서 다음과 같다.[6]

$$\begin{aligned} \phi_x &= 1 - C e^{-rH} \text{ for } \gamma \leq 1 \\ \phi_x &= 1 + C H^{-r} \text{ for } \gamma > 1 \\ \phi_s &= V_{r1} \Phi_{s1}(h/\sigma_1, \gamma_1) - V_{r2} \Phi_{s2}(h/\sigma_2, \gamma_2) \\ V_{r1} &= \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^2, V_{r2} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_2}\right)^2 = 1 - V_{r1} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $H = h_0/\sigma$, C 와 r 은 상수이며 γ 는 식(5)에 의해서 정의된 파라미터이다.

γ 는 surface pattern parameter로써 표면의 방향성을 말해준다. 즉 대부분의 공학적 표면은 가공조건에 따라 방향성을 가지며 γ 값에 따라 다음과 같이 나눈다.[5]

$\gamma = 1$: isotropic surface

$\gamma > 1$: longitudinal surface

$\gamma < 1$: transverse surface

여기서 이상적으로 거칠기가 없다고 가정하면 $H(h_0/\sigma) \rightarrow \infty$, 이므로 $\phi_x, \phi_y \rightarrow 1$,

$\phi_s \rightarrow 0$ 이다. 즉 거칠기를 고려할지 않는 다음과 같은 Reynolds Eq. 이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

또한 두 표면의 거칠기가 크게 차이가 나지 않으면 식(12)에 의해 ϕ_s 값은 매우 작은 값이다.[6]

2.4 수치해석

Fig.2과 같은 미소표면을 고려하여 두표면 사이의 상대적인 높이를 식(14)와 같이 정의하고 경계조건을 아래와 같이 준다.

(1) 경계조건

$P = PA$, at $x = 0$ for all y

$P = PB$ at $x = Lx$ for all y

$dP/dy = 0$ at $y = 0, y = Ly$ for all x

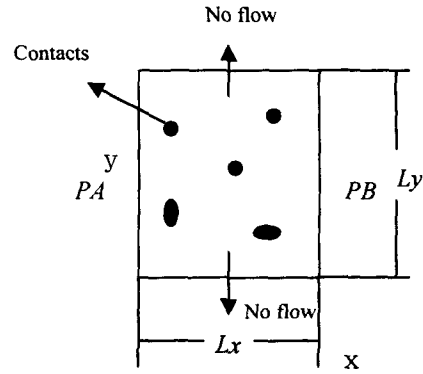


Fig. 2

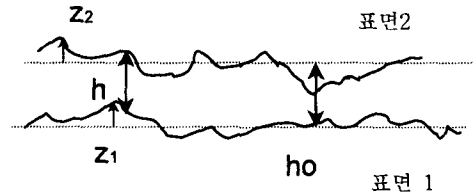


Fig. 3

$$h = h_0 - z_1 + z_2$$

(14)

여기서 표면1과 표면2의 슬라이딩 속도를 각각 $U_1(=0), U_2(=U)$ 이고 $\frac{\partial \phi_s}{\partial x}$ 가 다른 항에 비하여 매우 작다고 본다. (본 해석에서 표면1은 슬라이딩 속도를 가지고 있으며 표면2는 고정되어 있다고 가정한다.) 즉 ' ϕ_s 는 표면 전체에 대하여 일정한 값을 가진다.'라고 가정하면 (11)로 주어지는 Average Reynolds Eq.을 isothermal, incompressible flow에 대해서 식(15)를 이용하여 나타낸 뒤 아래와 같은 무차원 변수를 사용하여 표현하면 식(16)와 같이 된다.

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = -U_2 \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \quad (15)$$

무차원변수 :

$$X = \frac{x}{Lx}, Y = \frac{y}{Ly}, \bar{H} = \frac{\bar{h}}{h_0}, Z_1 = \frac{z_1}{h_0}, Z_2 = \frac{z_2}{h_0}$$

$$\bar{P} = \frac{(\bar{p} - p_a) h_0^2}{\mu U L}, \bar{W} = \frac{\bar{w} h_0^2}{\mu U L^3}, \bar{F} = \frac{\bar{F} h_0^2}{\mu U L^3}$$

$$\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial X^2} + \left(\frac{\phi_y}{\phi_x}\right) \left(\frac{L_y}{L_x}\right)^2 \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial Y^2} = \left(\frac{6L_x}{L\phi_x} \frac{\partial \bar{H}}{\partial X}\right) \quad (16)$$

식(16)을 x,y에 대하여 차분화하고 주어진 경계조건을 대입하여 무차원 mean hydrodynamic pressure, \bar{P} 분포를 구한다.

다시 \bar{P} 로부터 \bar{p} 를 계산한 뒤 전체 해석 면적에 대하여 적분하여 평균지지하중 (mean hydrodynamic load, \bar{w})을 식(17)에 의하여 구한다.

$$\bar{w} = \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} \bar{p} \, dx dy \quad (17)$$

혼합윤활상태 에서 두 표면은 서로 요철 (asperities) 때문에 부분적으로 접촉이 발생하고 접촉된 부분에서는 유량은 흐르지 않는 상태가 된다. 이러한 조건을 문제 해석에 포함시키기 위해 h 값이 '0'보다 작은 곳에서 유량이 없다. 따라서 식(7)로부터 경계조건을 아래와 같이 추가했다.

$$q_x = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} h = 0$$

$$q_y = -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

Patir 와 Cheng은 표면의 요철이 있으므로 서 다음과 같은 세가지 유형의 수평방향의 힘이 표면에서 발생된다고 했다. [6]

- (1) hydrodynamic shear stress에 의한 viscous friction
 - (2) asperities에 작용하는 local pressure에 의한 힘
 - (3) 베어링의 간극 변화에 따른 mean pressure에 의한 힘
- 세가지의 수평방향의 힘 중에서 (3)은 (1)과 (2)에 비하여 작다.[6] 따라서 전체 수평방향의 힘은 식(18)과 같이 나타난다.

$$F_{11} = - \iint_A \frac{\mu(U_1 - U_2)}{h} [(\phi_f - \phi_\beta) + 2\phi_\beta] dx dy$$

$$F_{12} = + \iint_A \frac{\mu(U_1 - U_2)}{h} [(\phi_f + \phi_\beta) - 2V_{r2}\phi_\beta] dx dy$$

여기서, $V_{r1} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma}\right)^2, V_{r1} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma}\right)^2 = 1 - V_{r1} \quad (18)$

$$\phi_f = hoE(1/h)$$

$$\phi_\beta = A_3 H^{\alpha_4} e^{-\alpha_5 H + \alpha_6 H^2}, \text{ for } 0.5 \leq H \leq 7.0$$

$$\phi_\beta = 0, H = h_o / \sigma$$

E : Expectancy operator로써 다음과 같이

$$\text{정의된다. [4]} \quad E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

$A_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$, 은 표면 거칠기에 따른 상수이다.[6]

2.5 해석결과

(1) 파라미터에 따른 표면 모델링

표면을 모델링 하기 위하여 가정한 파라미터는 r.m.s.(Rq)값과 x,y,방향의 correlation length, λ_x, λ_y 그리고 $\gamma = \lambda_x / \lambda_y$ 를 가정했다.

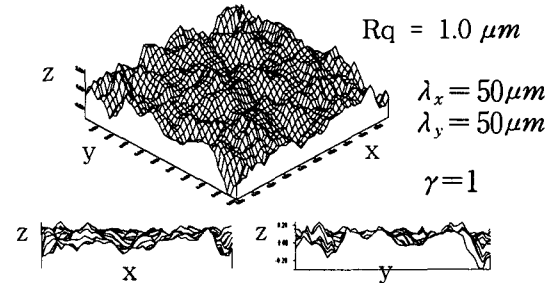


Fig. 4

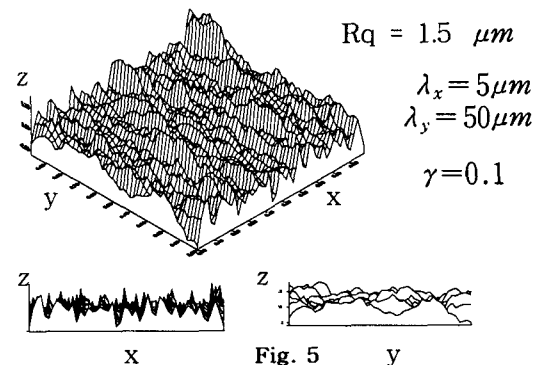


Fig. 5

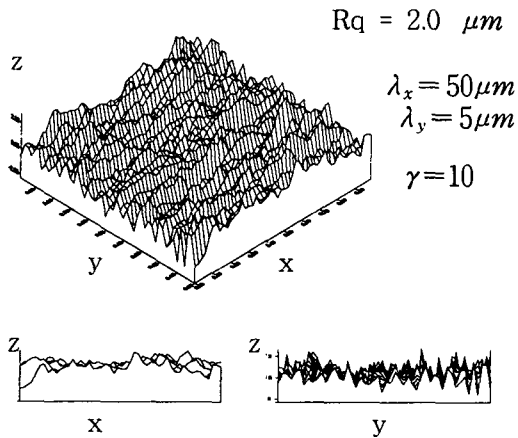
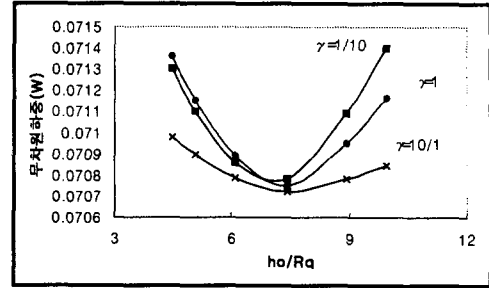


Fig. 6

각각의 그림에서 오른쪽에 있는 파라미터 값은 가정한 값이므로 수치해석적으로 계산된 값과는 상대오차 0.1~2(%)였다. Fig.4에서 $\gamma=1$ 이므로 isotropic한 표면에 가깝다. 그러나 Fig.5는 $\gamma=0.1$ 이므로 transverse 한 표면이어서 x-z단면에서 요철은 뚜렷이 보이거나 y-z단면의 요철은 x-z단면보다 뚜렷하지 못하다. Fig.6은 Fig.5의 결과와 반대의 경우로써 longitudinal 표면의 특성을 가지고 있다. 본 해석에서는 이러한 표면을 r.m.s(Rq)값에 따라 여러 가지 표면을 모델링했으며 또한 λ_x, λ_y 값과 그 비에 따라 서로 다른 구조의 표면을 얻을 수 있었다.

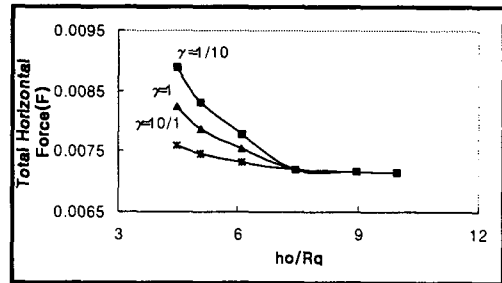
(2)파라미터와 하중 및 수평방향 힘과의 관계

Rq값의 변화와 그에 따른 다른 파라미터의 변화에 따라 베어링의 무차원하중 지지능력과 무차원 수평방향의 힘을 비교했다. 또한 상대적으로 두 표면의 거칠기 상태에 따라서 해석했으며 표면의 방향성에 따라 나타나는 특징을 살펴보았다. 따라서 평행스러스트 베어링에서 나타날 수 있는 압력과 하중지지능력 그리고 표면의 요철간의 접촉에 의해 발생하는 수평방향의 힘으로써 마찰력을 예상할수 있었다.



(표면2의 Rq=1 μm, ho = 10 μm)

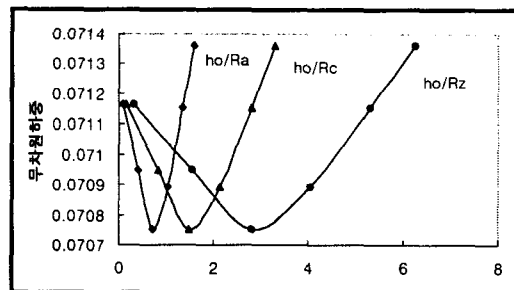
Fig.7



(표면2의 Rq=1 μm, ho = 10 μm)

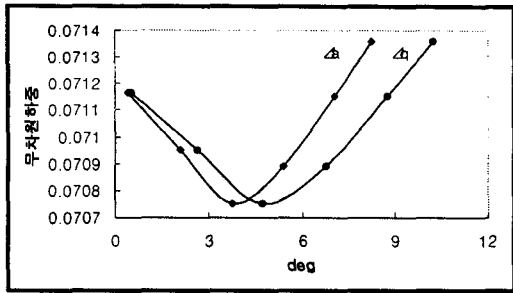
Fig.8

Fig.7과 Fig.8에서 두 표면의 γ 는 동일하다. 표면1의 Rq값의 변화에 따라 무차원 하중과 무차원 수평방향력을 구했다. 하중은 Rq값이 감소하면 같이 감소하다 다시 증가하는 구간이 나타났으며 반면 F는 Rq값이 감소할수록 전체구간에서 감소했다. Rq값이 감소하면 asperity에 의한 영향이 작아지므로 F도 감소한다고 볼 수 있다. 아래의 그림도 같은 경향을 보여준다.



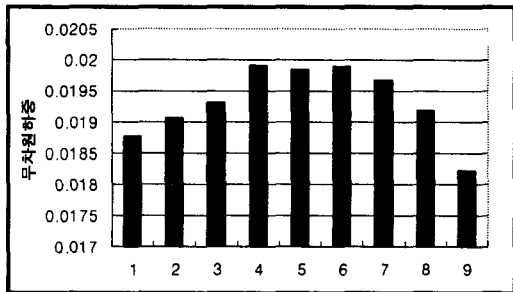
($\gamma = 1$, 표면2의 Rq=1.0 μm, ho=10 μm)

Fig. 9



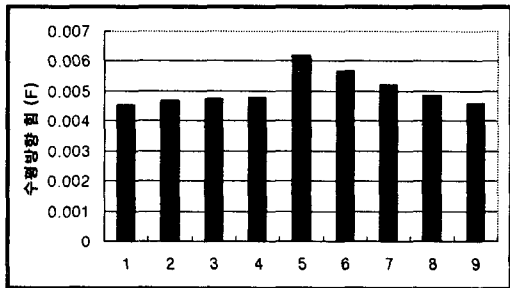
($\gamma = 1$, 표면2의 $Rq=1.0 \mu m, ho=10 \mu m$)

Fig. 10



($\gamma = 1$, 표면2의 $Rq=1 \mu m, ho = 10 \mu m$,)

Fig. 11



($\gamma = 1$, 표면2의 $Rq=1 \mu m, ho = 10 \mu m$,)

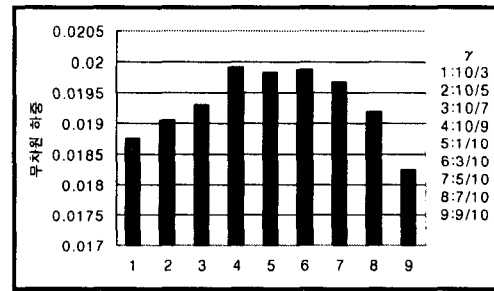
Fig. 12

Table 2.

	1	2	3	4	5
Sk	-0.0009	-0.154	-0.1495	-0.0784	0.1006
Ku	2.88582	3.10573	2.85865	2.95188	2.99933
	6	7	8	9	
Sk	-0.1423	-0.1545	-0.1677	-0.2038	
Ku	3.09445	2.9094	2.85279	2.8089	

Fig. 9에서 보는 바와 같이 Ra,Rc,Rz와의 하중과의 관계는 Rq와 하중과의 관계와 경

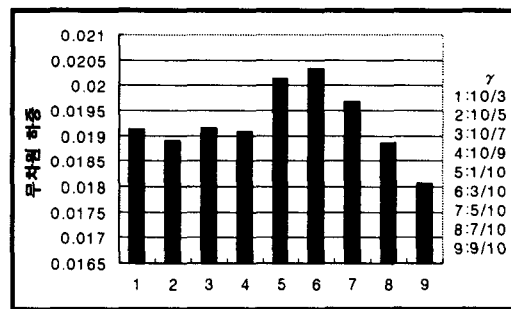
향이 같았다. 이상의 그림에서 베어링의 하중은 표면의 거칠기 정도에 따라 최소가 되는 점이 나타났다. 그래서 이러한 파라미터를 가지는 표면은 평행스리스트 베어링의 표면으로는 부적합한 것으로 생각된다. Fig.11과 Fig.12에서는 Sk(skewness),와 Ku(kurtosis)값에 대한 비교결과이다. Table2 에서 각 번호는 슬라이딩 표면을 나타내며 각 표면에서 Sk와 Ku값을 나타낸 표이다. 하중이 크게 나타나는 표면은 4,6,5번 순이며 수평방향의 힘은 표면 5가 가장 크게 나왔다. 아래의 3개 그림은 상대적인 두표면간의 거칠기 변화가 어떻게 베어링의 특성에 영향을 주는가를 보여준다.



(표면1.2의 $Rq=1.0 \mu m, ho=5 \mu m$,

γ :표면1의 값, 표면2의 $\gamma=1$ 로 일정)

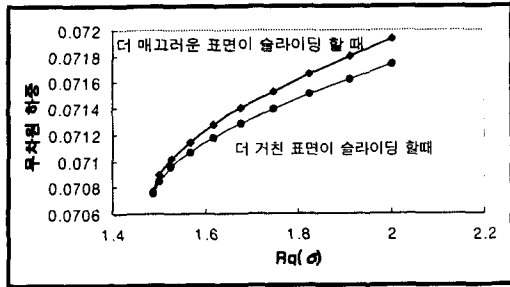
Fig. 13



(표면1.2의 $Rq=1.0 \mu m, ho=5 \mu m$,

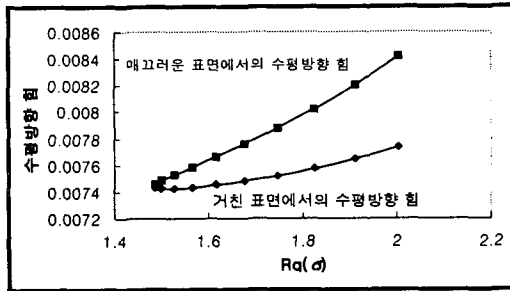
γ :표면2의 값, 표면1의 $\gamma=1$ 로 일정)

Fig.14



(표면1,2의 $\gamma=1$, Rq값은 각각 0.1-2.0까지 0.1씩 변화시켰다)

Fig. 15



(표면1,2의 $\gamma=1$, Rq값은 각각 0.1-2.0까지 0.1씩 변화시켰다)

Fig.16

Fig.13에서는 고정된 표면이 isotropic일 때를 나타내는 경우이고 Fig.14는 슬라이딩 표면이 isotropic($\gamma=1$)표면으로 일정한 경우이다. 두 경우 모두 상대명의 방향성이 isotropic인 경우가지지 하중이 크게 나타났다. 그리고 Fig.13과 Fig.14의 최대값만을 비교했을 때 슬라이딩 표면이 isotropic일 때가 더 하중이 크게 나왔다. Fig.15와 Fig.16은 두 표면이 서로 다른 거칠기를 가질 때에 대하여 비교했다. 하중은 상대적으로 매끄러운 표면이 슬라이딩 할 경우가 거친 표면이 슬라이딩 할 때 보다 크게 나왔으며 매끄러운 표면에서의 수평방향의 힘(마찰력)이 상대적으로 더 거친 표면에서의 힘보다 더 크게 나왔다.

4. 결론

(1) 임의의 표면의 r.m.s 값과 correlation length 값을 알고 있다면 그 파라미터의 값을 가지는 표면을 모델링 할수 있으며 또 다른 파라미터를 근사적으로 예상할 수 있다.

(2) 본 논문에서 모델링 한 표면중에서 최대 하중이 발생하는 표면은 슬라이딩 표면이 isotropic 일 경우에 파라미터는 다음과 같다.

Ra	Rq	Ry	Rz	Rc	Δa
1.5969	2.0	13.001	6.2371	3.3005	8.2327
Δq	λa	λq	Sk	Ku	
10.228	69.831	70.023	-0.208	2.8605	

transverse 한 표면에 대해서는 .

Ra	Rq	Ry	Rz	Rc	Δa
0.0826	0.1	0.79	0.3606	0.1918	1.3541
Δq	λa	λq	Sk	Ku	
1.693	21.969	22.012	0.1006	2.9993	

이며 longitudinal 표면에 대해서는

Ra	Rq	Ry	Rz	Rc	Δa
1.633	2.0	15.755	6.8477	3.3559	8.0388
Δq	λa	λq	Sk	Ku	
9.981	73.129	73.74	0.0528	2.9802	

단위는 모두 μm 이며 $\Delta a, \Delta q$ 는 [deg]이다.

(3) Fig.13과 Fig.14을 Fig.7과 비교했을 때 두 표면의 γ 는 서로 같은 경우가 서로 다른 경우보다 무차원지하중이 더 크게 나왔다.

(4) 상대적으로 두 표면중 더 매끄러운표면이 슬라이딩하는 경우가 하중이 더크게 나왔으며 매끄러운 표면에서의 수평방향의 힘(마찰력)이 상대적으로 더 거친 표면에서의 힘보다 더 크게 나왔다.

후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기
기연구센터의 지원(과제번호 : 1999G0303)
을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분
께 감사드립니다.

5. 참고문헌

1. P.R. Nayak, "Random Process Model of Rough Surface", J. Lubr. Technology, Trans. of ASME F93, 398-407, 1971
2. Nadir Patir, "A Numerical Procedure for Random Generation of Rough Surface", Wear, 47, 263-277, 1978
3. Gu Xinjian and Huang Yiyun, "The Modeling and Simulation of Rough Surface", Wear, 137, 275-285, 1990
4. H.Christensen and K.Tonder, "The Hydrodynamic Lubrication of Rough Bearing of Finite Width", Trans.ASME, J.Lubr.Tech., vol 93, 324-330, 1971
5. Pair N. and Cheng H.S., "An Average Flow model for Determining Effect of three dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication," ASME, J.Lubri.Tech. vol 100, 12-17, 1978,
6. Pair N. and Cheng H.S., "Application of Average Flow model to Lubrication Between Rough Sliding Surface", ASME, J. Lubri. Tech. vol 101, 220-230, 1979
- Method", ASME, J. of Lubr. Tech.vol 105, 458-465, 1983
7. Bharat Bhushan, "Contact mechanics of Rough Surface in Tribology: multiple asperity, Tribology letter 4, 1-35,1998
8. J. L.Teal, and A.O.Lebeck, "An Evaluation of the Average Flow Model for Surface roughness Effect in Lubrication," ASME, J. of Lubr.Tech. vol 102, 360-367, 1980
9. Hu Yuanzhong and Zheng Lingqing, "Some Aspects of Determining the Flow Factors", ASME, J. of Tribology, vol 111, 525-531, 1989
10. Bernald J. Hamrock, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", Mc-GrawHill,
11. D.J.Whitehouse, "Handbook of Surface Metrology", Inst. of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia,
12. J.H.Tripp, "Surface Roughness Effect on Hydrodynamic Lubrication: The Flow Factor