

〈論 文〉

## 프로파일링을 한 원통형 로울러의 탄성유체윤활(Ⅱ)

박태조\* · 김경웅\*\*

(1991년 6월 24일 접수)

### Elastohydrodynamic Lubrication of a Profiled Cylindrical Roller (Ⅱ)

Tae Jo Park and Kyung Woong Kim

**Key Words:** Roller(로울러), Elastohydrodynamic Lubrication(탄성유체윤활), Profiling(프로파일링), Film Thickness(유막두께), Newton-Raphson Method(뉴우튼-랩슨방법)

#### Abstract

A new numerical solution of the elastohydrodynamic lubrication (EHL) problem of an axially profiled cylindrical roller is presented. A finite difference method and the Newton-Raphson method are used to solve the nonlinear system equations. A non-uniform grid system is adopted to reduce the number of grid points and to obtain accurate solution. For two different types of profiles which have similar elastostatic pressure distribution, the EHL results show large differences. Especially the difference in film shape is larger than in pressure distribution. Therefore, the magnitude of the minimum film thickness should be a major criteria to design the axial profile of the roller. Variations of the minimum film thickness with dimensionless parameters show considerably different behavior from those of infinite solution and show a good agreement with the experimental data in literatures. Present numerical scheme can be used generally in the analysis of three-dimensional EHL problem.

#### 기호설명

$d$	: 미소압력요소에 의한 탄성변형량	$M_j$	: 임의의 $Y$ 에서 레이놀즈 경계조건을 만족시키는 $X$ 방향의 절점의 수
$\bar{D}$	: 탄성변형량계산에 사용되는 영향계수	$p$	: 압력
$D_{ijkl}$	: 무차원 영향계수	$P$	: 무차원압력, $p/E$
$E$	: 유효탄성계수, $2/E = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2$	$R$	: 로울러의 반경
$G$	: 무차원 재료변수, $aE$	$R_c, R_d$	: Fig. 1참조
$h$	: 유막두께	$R_c^*, R_d^*$	: $R_c/R, R_d/R$
$H$	: 무차원유막두께, $h/R$	$u$	: 로울러와 케도면의 평균속도
$H_e$	: $y=0$ 에서의 국부적인 무차원 최소유막두께	$U$	: 무차원 속도변수, $\eta_0 u/RE$
$H_m$	: 무차원 최소유막두께	$x, y$	: 로울러의 구름방향 및 길이방향 좌표계
$L, M$	: $X, Y$ 방향 절점의 수	$X, Y$	: $x/R, y/R$
		$y_c, y_d$	: Fig. 1 참조
		$Y_c, Y_d$	: $y_c/R, y_d/R$
		$w$	: 하중
		$W$	: 무차원 하중변수, $w/R^2E$

\*정회원, 경상대학교 기계공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 생산공학과

$\alpha$	: 윤활유의 압력-점도 계수
$\eta_0, \bar{\eta}$	: 압력이 대기압 및 $p$ 일때의 윤활유의 점도
$\eta$	: $\bar{\eta}/\eta_0$
$\rho_0, \bar{\rho}$	: 압력이 대기압 및 $p$ 일때의 윤활유의 밀도
$\rho$	: $\bar{\rho}/\rho_0$

## 1. 서 론

탄성유체윤활(elastohydrodynamic lubrication: EHL)은 20세기의 트라이볼로지(tribology) 분야에서 가장 큰 발전을 이룩한 분야중의 하나로서 일반적인 유체윤활과는 달리 유막내의 발생압력에 의한 윤활면의 탄성변형과 윤활유의 점도변화를 고려하는 점이 특징적이다. 1959년, Dowson과 Higginson에 의하여 무한장 로울러에 대한 수치해가 처음으로 구해진 이후에 이에 대한 많은 연구가 수행되었다<sup>(1,2)</sup>. 그러나, 거의 대부분이 볼베어링의 경우와 같은 점접촉해석이거나 무한장으로 가정한 선접촉해석이고 실제의 로울러베어링의 경우와 같이 유한한 길이의 선접촉문제에 대한 연구는 극소수에 불과하다. 특히, 로울러베어링의 로울러는 유한한 길이로 인하여 로울러의 양단부 부근에서 발생하는 높은 응력집중을 완화시키기 위하여 양단부로 갈수록 직경을 적당히 작게(이를 프로파일링(profiling)이라고 함) 하여 사용하고 있기 때문에 해석이 매우 힘들다.

Wymer와 Cameron<sup>(3)</sup>은 테이퍼로울러에서의 유막의 크기를 측정한 결과, 최소유막은 항상 로울러의 양단부에서 발생하며 그 크기는 프로파일링에 따라 크게 달라짐을 보였다. Bahadoran과 Gohar<sup>(4)</sup>는 프로파일링을 하지 않은 원통형로울러 양단부에서의 근사 해석을, Kuroda와 Arai<sup>(5)</sup>는 길이가 아주 짧은 원통형로울러에 대한 수치해석을 각각 시도하였으나 이들의 결과를 실제 프로파일링을 한 로울러에는 적용할 수가 없다. 프로파일링을 한 원통형로울러에 대한 탄성유체윤활해석이 Mostofi와 Gohar<sup>(6)</sup>에 의해서 최초로 시도되었다. 그들은 반복법<sup>(2)</sup>을 사용하여 수렴해를 구하였으나, 수치해석 과정이 경험에 크게 의존하였으며 결과의 일부는 물리적으로 타당하지 않았다. 한편, 필자들은 동일한 문제의 해석에 유한차분법과 뉴우튼-랩슨 방법을 처음으로 적용하여 수렴해를 얻었으며<sup>(7)</sup>, 로울

러 길이방향으로 불균일한 격자계를 사용하여 프로파일링 시작점 부근에서의 보다 상세한 해석을 가능하게 하였다<sup>(8)</sup>. 이 방법은 수치해석과정이 체계적이고 수렴성도 우수하며 해석결과도 물리적으로 타당하다는 것이 타원점접촉문제의 해석에 적용되어 이미 밝혀졌다<sup>(9)</sup>. 다만, 격자계가 완전히 불균일하지 않기 때문에 프로파일링 시작점 부근에서의 상세한 해석을 위해서는 많은 수의 격자가 요구되었다.

한편, 지금까지의 로울러베어링의 로울러 프로파일(profile)을 결정하는 이론적인 방법의 기준은 탄성점접촉해석에 의해서 로울러 양단부에서의 접촉압력이 크게 되지 않도록 하는 것이다<sup>(10-12)</sup>. 그러나, 베어링은 탄성유체윤활상태로 운전되기 때문에 로울러와 케도면에서의 응력분포는 탄성점접촉상태인 경우와 크게 차이를 보인다<sup>(1)</sup>. 더구나, 베어링의 피로수명에 큰 영향을 미치는 최소유막<sup>(13-15)</sup>의 크기를 탄성점접촉해석으로는 추정할 수가 없기 때문에 최적의 프로파일을 구하기 위해서는 탄성유체윤활해석이 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 완전히 불균일한 격자계를 사용하여 프로파일링을 한 원통형로울러의 프로파일링 시작점 부근에서의 압력분포 및 유막형상과 함께 무차원변수의 변화에 따른 최소유막의 거동을 상세히 조사하고자 한다. 이 결과에서 실제 로울러베어링의 로울러 프로파일의 설계시에 적용할 수 있는 새로운 기준을 제시하고자 한다.

## 2. 이 론

본 연구에서 사용하는 윤활유는 뉴우튼유체로서 등온조건하에서 운전되며, 윤활면의 표면거칠기는 고려하지 않는다.

### 2.1 지배방정식

#### (1) 레이놀즈방정식

유체윤활의 기본방정식으로 알려져 있는 레이놀즈방정식은 유체의 운동방정식과 연속방정식으로부터 유도된다. 로울러의 구름방향이  $x$ 방향일때, 레이놀즈방정식은 다음식과 같다.

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

여기서,  $u$ 는 로울러와 케도면의  $x$  방향으로의 평균속도이다.

윗식을  $X=x/R$ ,  $Y=y/R$ ,  $H=h/R$ ,  $P=p/\rho$ ,  $\rho=\bar{\rho}/\rho_0$ ,  $\eta=\bar{\eta}/\eta_0$ ,  $U=\eta_0 u/ER$ 과 같은 무차원변수로서 무차원화하면 다음식과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\rho H^3}{\eta} \frac{\partial P}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\rho H^3}{\eta} \frac{\partial P}{\partial Y} \right) = 12U \frac{\partial}{\partial X} (\rho H) \quad (2)$$

(2) 윤활유의 상태방정식

압력에 의한 윤활유의 밀도변화<sup>(1)</sup>와 점도변화의 무차원화된 형태는 각각 다음식과 같다.

$$\rho = 1 + \frac{0.6EP}{1+1.7EP} \quad (3)$$

$$\eta = \exp(GP) \quad (4)$$

여기서  $G=aE$ 이며,  $E$ 의 단위는 Gpa이다.

(3) 유막두께식

탄성유체윤활상태에서의 유막두께는 다음식과 같이 정의할 수 있다.

$$h(x, y) = h_0 + h_g(x, y) + h_v(x, y) \quad (5)$$

여기서,  $h_0$ 는 상수이고  $h_g(x, y)$ 는 변형되지 않은 상태에서의 로울러형상에 따른 유막이며  $h_v(x, y)$ 는 발생압력에 의한 탄성변형량이다.

실제의 로울러베어링에서 많이 채용하고 있는 프로파일링 형태는 Fig. 1(a), (b)와 같이 Crown과 Dub-off이며, 이 경우의  $h_g(x, y)$ 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$h_g(x, y) = x^2/2R + (y^2 - y_c^2)/2R_c \quad (6)$$

$$h_g(x, y) = x^2/2R + (y - y_d)^2/2R_d \quad (7)$$

프로파일링을 하지 않은 위치에서는 식(6), (7)의 오른쪽 두번째 항은 각각 0이다.

한편, Fig. 2와 같이 크기가  $(a_1+a_2) \times (b_1+b_2)$ 인 사각형의 미소압력요소에 의한  $(\bar{x}, \bar{y})$  위치에서의 탄성변형량은 다음식과 같다.

$$d = \frac{2}{\pi E} \int_{-a_1}^{a_2} \int_{-b_1}^{b_2} \frac{p(x_1, y_1) dx_1 dy_1}{\sqrt{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{y} - y_1)^2}} \quad (8)$$

미소압력요소내의 압력을 일정하게 두면, 윗식은 다음과 같이 적분된 형태로 나타낼 수 있다<sup>(2,9)</sup>.

$$d = P\bar{D} \quad (9)$$

여기서,

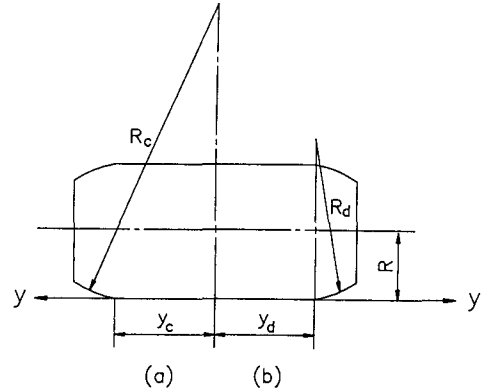


Fig. 1 Roller axial profile schematic (a) Crown, (b) Dub-off

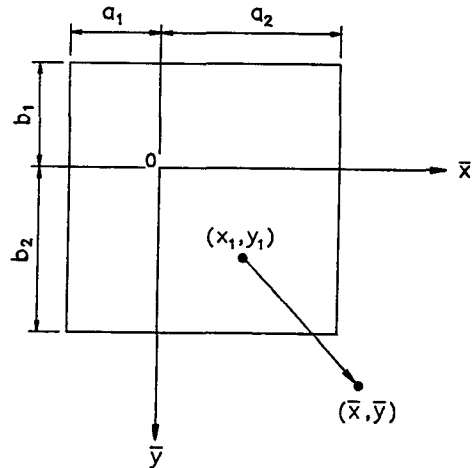


Fig. 2 Pressure element shape and local coordinates

$$\begin{aligned} \bar{D} = \frac{2}{\pi} & \left[ (\bar{y} + b_1) \ln \frac{\bar{x} + a_1 + \sqrt{(\bar{x} + a_1)^2 + (\bar{y} + b_1)^2}}{\bar{x} - a_2 + \sqrt{(\bar{x} - a_2)^2 + (\bar{y} + b_1)^2}} \right. \\ & + (\bar{y} - b_2) \ln \frac{\bar{x} - a_2 + \sqrt{(\bar{x} - a_2)^2 + (\bar{y} - b_2)^2}}{\bar{x} + a_1 + \sqrt{(\bar{x} + a_1)^2 + (\bar{y} - b_2)^2}} \\ & + (\bar{x} + a_1) \ln \frac{\bar{y} + b_1 + \sqrt{(\bar{x} + a_1)^2 + (\bar{y} + b_1)^2}}{\bar{y} - b_2 + \sqrt{(\bar{x} + a_1)^2 + (\bar{y} - b_2)^2}} \\ & \left. + (\bar{x} - a_2) \ln \frac{\bar{y} - b_2 + \sqrt{(\bar{x} - a_2)^2 + (\bar{y} - b_2)^2}}{\bar{y} + b_1 + \sqrt{(\bar{x} - a_2)^2 + (\bar{y} + b_1)^2}} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

따라서, 임의의 위치에서의 탄성변형량은 전윤활영역에 작용하는 압력의 영향을 중첩하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_v(x, y) = \sum \sum \bar{D}_{ijkl} p_{kl} \quad (11)$$

여기서  $\bar{D}_{ijkl}$ 은 단위압력이 작용하는 미소압력요소 내에 절점  $(k, l)$ 이 있을 때, 절점  $(i, j)$ 에서의 탄성변형량을 나타내는 영향계수이다.

식 (6), (7)과 식 (11)을 식(5)에 대입하여 무차원화하면 프로파일의 Crown 및 Dub-off인 경우의 유막은 각각 다음의 식(12), (13)과 같다.

$$H = H_o + X^2/2 + (Y^2 - Y_c^2)/2R_c^* + \sum \sum D_{ijkl} P_{kl} \quad (12)$$

$$H = H_o + X^2/2 + (Y - Y_d)^2/2R_d^* + \sum \sum D_{ijkl} P_{kl} \quad (13)$$

여기서,  $H = h/R$ ,  $H_o = h_o/R$ ,  $Y_c = y_c/R$ ,  $R_c^* = R_c/R$ ,  $Y_d = y_d/R$ ,  $R_d^* = R_d/R$ ,  $D_{ijkl} = \bar{D}_{ijkl}/R$ 이다.

### 2.2 하중조건식

하중은 유막내에서 발생하는 압력의 합과 같다.

$$w = \iint p dx dy \quad (14)$$

무차원 형태는 다음식과 같다.

$$W = w/ER^2 = \iint P dX dY \quad (15)$$

### 2.3 경계조건

(1) 계산영역의 경계에서는  $P=0$ 이다.

(2) 출구측에서는 레이놀즈의 경계조건( $P = \frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial P}{\partial Y} = 0$ )을 만족하도록 한다.

## 3. 수치해석

완전히 불균일한 격자계를 사용하는 경우, 식 (2)의 절점  $(i, j)$ 에 대한 유한차분형태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{i,j} = & \frac{\rho_{i+1/2,j}}{\Delta X_i} \frac{H_{i+1/2,j}^3}{\eta_{i+1/2,j}} (P_{i+1,j} - P_{i,j}) \\ & - \frac{\rho_{i+1/2,j}}{\Delta X_{i-1}} \frac{H_{i+1/2,j}^3}{\eta_{i+1/2,j}} (P_{i,j} - P_{i-1,j}) \\ & + \frac{\Delta X_{i-1} + \Delta X_i}{\Delta Y_{j-1} + \Delta Y_j} \left[ \frac{\rho_{i,j+1/2}}{\Delta Y_j} \frac{H_{i,j+1/2}^3}{\eta_{i,j+1/2}} (P_{i,j+1} - P_{i,j}) \right. \\ & \left. - \frac{\rho_{i,j-1/2}}{\Delta Y_{j-1}} \frac{H_{i,j-1/2}^3}{\eta_{i,j-1/2}} (P_{i,j} - P_{i,j-1}) \right] \\ & - 12U(\rho_{i+1/2,j} H_{i+1/2,j} - \rho_{i-1/2,j} H_{i-1/2,j}) \quad (16) \\ & (i=2, \dots, M_j, j=2, \dots, N-1) \end{aligned}$$

여기서,  $H_{i+1/2,j} = 0.5(H_{i+1,j} + H_{i,j})$

$$\rho_{i+1/2,j} = 0.5(\rho_{i+1,j} + \rho_{i,j})$$

$$\eta_{i+1/2,j} = \exp\{0.5G(P_{i,j} + P_{i+1,j})\} \quad (17)$$

$$\Delta X_i = X_{i+1} - X_i, \quad \Delta Y_j = Y_{j+1} - Y_j, \dots,$$

$M_j$ 는 각  $Y$ 에서 레이놀즈의 경계조건을 만족시키는  $X$ 방향의 절점의 수이다<sup>(8-9)</sup>. 한편, 식(15)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = 0.25 \sum \sum P_{ij} (\Delta X_i + \Delta X_{i-1}) (\Delta Y_j + \Delta Y_{j-1}) \quad (18)$$

이상에서, 미지수는  $P_{ij} (i=2, \dots, M_j, j=2, \dots, N-1)$ 와  $H_o$ 로서 식(16), (18)의 식의 수와 동일하므로 쉽게 구할 수 있다.

식 (16)에 뉴우튼-랩슨방법을 적용하면,

$$\begin{aligned} \sum_k \sum_l \left( \frac{\partial f_{i,j}}{\partial P_{k,l}} \right)^n (P_{k,l}^{n+1} - P_{k,l}^n) \\ + \left( \frac{\partial f_{i,j}}{\partial H_o} \right)^n (H_o^{n+1} - H_o^n) = -f_{i,j}^n \quad (19) \end{aligned}$$

$$(i, k=2, \dots, M_j, j, l=2, \dots, N-1)$$

여기서  $n$ 은 반복계산횟수이다.

식(19)의 편미분계수는 참고문헌<sup>(8)</sup>의 부록과 같은 방법으로 구할 수가 있으며, 유막에 대한 일부 미분은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H_{i+1/2,j}}{\partial P_{k,l}} = 0.5(D_{ijkl} + D_{mjkl}), \quad m=i+1 \quad (20)$$

따라서, 식(18), (19)를 연립시켜 풀면  $(n+1)$ 번째의  $P_{ij}$ 와  $H_o$ 를 구할 수 있다.

탄성접촉부<sup>(12)</sup>의 반폭과 길이를 각각  $a, b$ 라고 하면, 계산영역의 입구부와 출구부경계는 각각  $-4a$ 와  $1.5a$ 에, 길이방향경계는 프로파일링에 따라서  $1.01b \sim 1.04b$ 에 두었다<sup>(8)</sup>. 구름방향으로 압력 spike가 발생하는 영역과 길이방향으로 프로파일 시작점부근에는 격자의 간격을 조밀하게, 구름방향으로의 입구부와 길이방향으로의 중앙부에는 넓게 두었다. 전체적인 수치해석과정과 수렴판정조건은 참고문헌<sup>(7-9)</sup>과 동일하다.

## 4. 결과 및 고찰

본 해석에 사용된 원통형로울러의 프로파일링 시 작위치는  $|Y|=0.7$ 로 프로파일의 형태에 관계없이 일정하게 두었으며, 로울러의 재질은 steel로서  $E=220\text{Gpa}$ 이다.

Fig.3과 Fig.4는 각각 주어진 하중조건하에서의 탄성접촉압력분포<sup>(12)</sup>가 전접촉길이에 걸쳐서 서로 거의 동일한  $R_c^*=100$ 인 Crown과  $R_d^*=0.3$ 인 Dub-off의 서로 다른 두 가지의 프로파일 형태에 대한 프로파일링 시작점 부근에서의 압력분포와 유막형상을 서로 비교한 것이다. 여기서, 이들 그림에서의 +표시는 프로파일링 시작위치로서  $X=0$ ,  $Y=Y_c=Y_d$ 인 점을 나타낸다. 특히, Fig.4의 유막형상은 Wymer와 Cameron<sup>(3)</sup>의 Optical Interferometry를 사용하여 측정한 유막형상(참고문헌[3]의 Fig. 7~8)과 정성적으로 거의 유사함을 알 수 있다. 프로파일링 시작위치에서 길이방향 중앙부쪽으로 조금 떨어진 영역에서는 프로파일의 차이에도 불구하고 압력과 유막이 거의 동일한 반면에 프로파일링부에서는 상당한 차이를 보이고 있으며, 압력분포에 비하여 유막형상의 차이가 더욱 큰 것이 특징적이다. 특히, 최소유막의 크기가 Crown인 경우  $H_m=1.344 \times 10^{-5}$ 인 반면에 Dub-off인 경우에는  $H_m=1.035 \times 10^{-5}$ 로 중앙부에 비하여 그 차이가 아주 크다. 한편, 최대압력과 최소유막은 로울러의 길이방향 중앙부가 아니라 프로파일의 모양에는 상관없이 모두 프로파일링 시작점 부근에서 발생하고 있다. 로울러 길이방향의 압력분포와 유막형상은 중앙부에서는 거의 일정한 반면에 양단부쪽으로 압력이 최대로 되는 영역부근에서부터 유막이 급격히 작아지기 시작하여 국부적으로 최소유막에 도달한 후, 프로파일링으로 인하여 급격하게 증가한다. 프로파일링 시작점 부근에서 로울러 길이방향으로의 이와같은 유막수축(fluid film constriction)은 구름방향으로의 압력 spike와 유막수축의 거동과 동일한 경향으로서 주로 입구부에서의 윤활유의 측면유출(side leakage)에 기인하는 것으로 추정되며 참고문헌<sup>(3)</sup>의 실험결과와도 일치하는 결과이다. 또한, 이것은 타원접촉의 EHL문제에서의 Side-lobe<sup>(2)</sup>와 같은 역할을 하게 되어 결론적으로 로울러 중앙부에서의 압력발생에 기여하는 것으로 생각된다. 따라서, 원통형 로울러베어링에서의 최소유막은 항상 로울러 양단부 부근의 프로파일링부에서 발생하는 것으로 쉽게 추정할 수 있다.

구름베어링, 기어 및 캠(cam)기구 등과 같은 기계요소가가 장시간 성공적으로 운전하기 위해서는 적절한 크기의 최소유막이 필수적으로 유지되어야 한다<sup>(13-15)</sup>. 한편, 앞의 결과에서 사용한 조건보다 더욱 가혹한 조건에 대한 결과를 구하기 위해서는 격

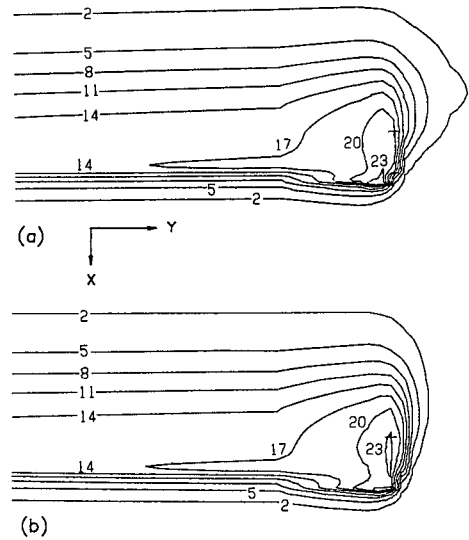


Fig. 3 Contour plots of dimensionless pressure ( $P \times 10^4$ )  $U=2 \times 10^{-11}$ ,  $G=2700$ ,  $W=1.85 \times 10^{-5}$   
 (a) Crown,  $|Y_c|=0.7$ ,  $R_c^*=100$  (b) Dub-off,  $|Y_d|=0.7$ ,  $R_d^*=0.3$

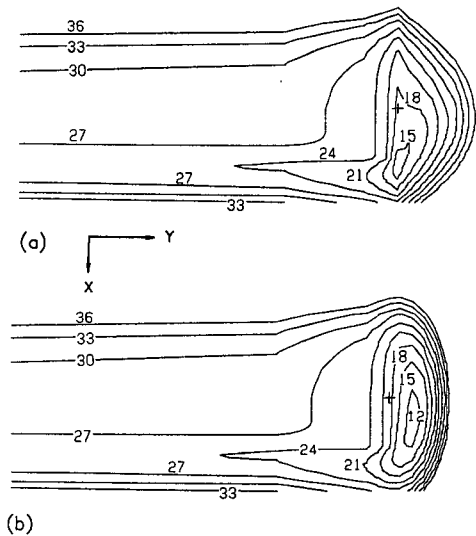


Fig. 4 Contour plots of dimensionless film thickness ( $H \times 10^6$ )  $U=2 \times 10^{-11}$ ,  $G=2700$ ,  $W=1.85 \times 10^{-5}$   
 (a) Crown,  $|Y_c|=0.7$ ,  $R_c^*=100$  (b) Dub-off,  $|Y_d|=0.7$ ,  $R_d^*=0.3$

자의 수를 많이 하면 되지만 이는 수치계산에 있어서 경제적이지 못하기 때문에 무차원변수의 변화에 따른 유막의 크기변화를 구하는 것이 보다 유리하

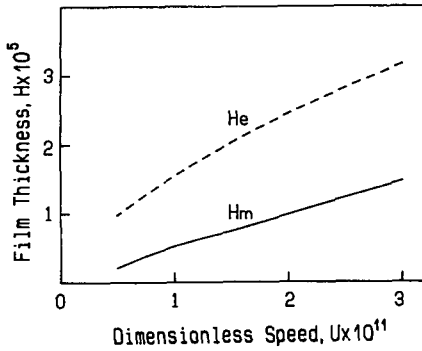


Fig. 5 Variation of minimum film thickness with dimensionless speed parameter  $|Y_d|=0.7$ ,  $R_d^*=0.3$ ,  $Q=2500$ ,  $G=1.85 \times 10^{-5}$

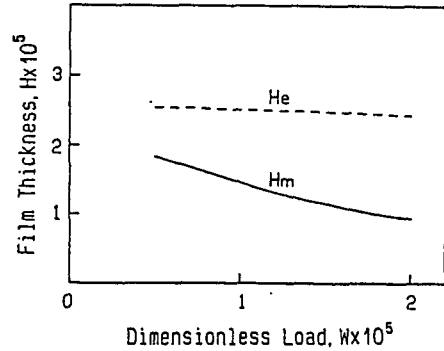


Fig. 7 Variation of minimum film thickness with dimensionless load parameter  $|Y_d|=0.7$ ,  $R_d^*=0.3$ ,  $U=2 \times 10^{-11}$ ,  $G=2500$

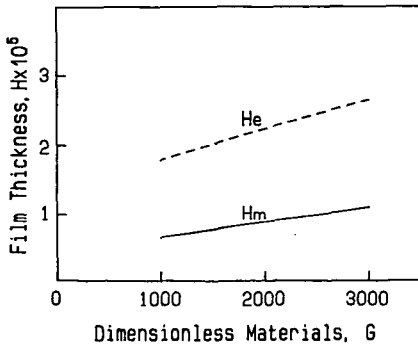


Fig. 6 Variation of minimum film thickness with dimensionless materials parameter  $|Y_d|=0.7$ ,  $R_d^*=0.3$ ,  $U=2 \times 10^{-11}$ ,  $W=1.85 \times 10^{-5}$

다. Figs.5~7은  $R_d^*=0.3$ 인 Dub-off 프로파일에서 무차원변수  $U$ ,  $G$  및  $W$ 의 변화에 대한  $H_m$ 과  $H_e$ 의 변화를 각각 나타낸 것이다. 무한장결과<sup>(1)</sup>와 같이  $H_e$ 의 크기에 미치는 영향은 무차원속도 변수,  $U$ 가 가장 크고 무차원하중변수,  $W$ 가 가장 작다.  $H_m$ 에도  $U$ 에 의한 영향이 가장 크지만  $H_e$ 에 비하여 그 크기 뿐만아니라  $U$ 의 변화에 대한 변화율도 상대적으로 작다. 한편, 무한장인 경우와는 달리 프로파일링을 한 로울러에서 가장 특징적인 결과는  $W$ 에 의한 영향이다. 즉,  $H_e$ 에 대해서는  $W$ 의 영향이 아주 작으나  $H_m$ 에 대해서는  $W$ 의 영향이 상대적으로 아주 크며, 이는 참고문헌<sup>(3)</sup>의 실험결과와 동일한 경향이다.

이상의 결과에 나타난 바와 같이 본 논문에서는 지금까지 완전한 수치해석을 이루지 못한 프로파일

링을 한 원통형로울러에 대한 상세한 EHL해석을 처음으로 이룩하였다. 그 결과, 상세한 압력분포 및 유막형상과 함께 최소유막의 크기를 정량적으로 구하는 것이 가능하게 되었을 뿐만아니라, 운전조건에 따른 최소유막의 거동을 구할 수가 있게 되어 로울러의 프로파일 설계에 아주 유용하게 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 본 논문에서 사용한 수치해석방법은 일반적 3차원 탄성유체유희문제의 해석에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 프로파일링을 한 원통형로울러에 대한 탄성유체유희문제에 완전히 불균일한 격자제를 채용한 뉴우튼-람슨방법을 적용함으로써 처음으로 상세한 수치해석을 이룩하였다. 그 결과 전유희영역에 대한 상세한 압력분포 및 유막형상과 함께 무차원변수에 따른 최소유막의 크기를 정량적으로 구할 수가 있게 되었으며, 이들 결과들은 Wymer와 Cameron의 실험결과와 잘 일치하였다. 특히, 탄성접촉압력분포는 서로 일치할지라도 프로파일에 따라서 최소유막의 크기는 크게 달라지기 때문에 최소유막의 크기도 로울러의 프로파일을 결정하는 하나의 조건으로 사용되어야 함을 알 수 있다. 또한, 무한장해석결과와 달리 최소유막에 대한 하중의 영향은 상당히 크게 나타났다. 본 논문에서 사용한 수치해석방법은 일반적인 3차원 탄성유체유희문제의 해석에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- (1) Dowson, D. and Higginson, G.R., 1977, "Elastohydrodynamic Lubrication," SI ed., Pergamon Press.
- (2) Hamrock, B.J. and Dowson, D., 1981, "Ball Bearing Lubrication: The Elasto-hydrodynamics of Elliptical Contacts", John Wiley & Sons.
- (3) Wymer, D.G. and Cameron, A., 1973~74, "Elastohydrodynamic Lubrication of a Line Contact, Part 1: Optical Analysis of a Roller Bearing," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.188, pp.221~231.
- (4) Bahadoran, H. and Gohar, R., 1974, "End Closure in Elasto-hydrodynamic Line Contact," J. of Mech. Eng. Sci., Vol.16, pp.276~278.
- (5) Kuroda, S. and Arai, K., 1985, "Elastohydrodynamic Lubrication between Two Rollers (Finite Width Analysis)," Bull. of JSME, Vol.28, No.241, pp.1367~1372.
- (6) Mostofi, A. and Gohar, R., 1983, "Elastohydrodynamic Lubrication of Finite Line Contacts," Trans. ASME, J. of Lub. Tech., Vol.105, pp.598~604.
- (7) 박태조, 김경웅, 1987, "유한한 선접촉 탄성유체윤활문제의 수치해석", 대한기계학회논문집, 제11권, 제4호, pp.579~585.
- (8) 박태조, 김경웅, 1988, "프로파일링을 한 원통형 로울러의 탄성유체윤활(Ⅰ)", 대한기계학회논문집, 제12권, 제2호, pp.262~270.
- (9) Park, T.J. and Kim, K.W., 1990, "A Numerical Analysis of the Elasto-hydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts," WEAR, Vol.136, pp.299~312.
- (10) Oh, K.P. and Trachman, E.G., 1976, "A Numerical Procedure for Designing Profiled Rolling Elements," Trans. ASME, J. of Lub. Tech., Vol.98, pp.547~552.
- (11) Hartnett, M.J., 1979, "The Analysis of Contact Stresses in Rolling Element Bearings," Trans. ASME, J. of Lub. Tech., Vol.101, pp.105~109.
- (12) Heydari, M. and Gohar, R., 1979, "The Influence of Axial Profile on Pressure Distribution in Radially Loaded Rollers," J. of Mech. Eng. Sci., Vol.21, No.6, pp.381~388.
- (13) Skurka, J.C., 1970, "Elastohydrodynamic Lubrication of Roller Bearings," Trans. ASME, J. of Lub. Tech., Vol.92, pp.281~291.
- (14) Danner, C.H., 1970, "Fatigue Life of Tapered Roller Bearings under Minimal Lubricant Films," ASLE Trans., Vol.13, pp.241~251.
- (15) Tallian, T.E., 1981, "Rolling Bearing Life Modifying Factors for Film Thickness, Surface Roughness and Friction," Trans. ASME, J. of Lub. Tech., Vol. 103, pp.509~520.