

## 고하중과 고속 미끄럼 베어링 시스템의 경계윤활에 대한 연구

장 시 열

국민대학교 기계 자동차 공학부

### Study on Boundary Lubrication in the Sliding Bearing System under High Load and Speed

Siyoul Jang

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University*

**Abstract** – Many tribological components in automobile engine undergo high load and sliding speed with thin film thickness. The lubrication characteristics of the components are regarded as either hydrodynamic lubrication or boundary lubrication, whereas in a working cycle they actually have both characteristics. Many modern engine lubricants have various additives for better performance which make boundary film formation even under hydrodynamic lubrication regime. Conventional Reynolds equation with the viewpoints of continuum mechanics concerns only bulk viscosity of lubricant, which means that its simulation does not give insights on boundary lubrication characteristics. However, many additives of modern engine lubricant provide mixed modes of boundary lubrication characteristics and hydrodynamic lubrication. Especially, high molecular weight polymeric viscosity index improvers form boundary film on the solid surface and cause non-Newtonian fluid effect of shear thinning. This study has performed the investigation about journal bearing system with the mixed concepts of boundary lubrication and hydrodynamic lubrication which happen concurrently in many engine components under the condition of viscosity index improver added.

**Key words** – boundary lubrication, viscosity index improver, solid-like layer, bulk viscosity, non-Newtonian fluid.

#### 1. 서 론

최근까지의 엔진 윤활 현상에 대한 많은 연구는 유막 두께가 작을 경우 고체 표면의 거칠기 만을 고려한 유막 형성 또는 유체의 압력과 온도에 따른 점도 변화 특성을 고려한 완전 윤활 상태의 뉴턴 유체(Newtonian fluid model) 해석이 일반적이었다. 그러나 현실적으로는 고하중과 고온의 운전 상태에서 윤활유의 성능을 유지시키기 위한 여러 가지 첨가제들이 사용되고 있다. 이러한 첨가제들은 외부 하중과 운전 속도 등 운전 조건에 따라 유막의 거동을 비선형적인 형태로 변화시킨다. 특히 마찰열과 작동온도의 상승으로 인한 윤활유의 점도 저하를 막고 상온에서와 같은 점도를 유지하게 하기 위하여 점도 지

수 향상제(viscosity index improver)를 첨가하게 되는데 자동차용 엔진 등에는 주로 고분자량 폴리머계(high molecular weight polymer) 성분을 가진 Olefine 공중합체(OCP)가 많이 쓰인다. OCP는 점도 증가효과가 커서 첨가량이 적어도 윤활유의 점도 유지능력이 잘 보존되고 엔진 연소실에서의 퇴적물로서의 영향이 적다는 장점이 있다.

고분자량 폴리머계의 점도 지수 향상제가 윤활유상에 용해되어 유동할 때 나타나는 비선형적 유동 현상으로는 첫째로 급격한 외력을 받을 때 점탄성의 성질(viscoelastic effect), Paranjpe(1992)과 고속에서의 점도 감소 효과(shear thinning effect)이다. 그러나 최근의 실험적 연구 결과에 의하면, de Gennes(1981), Chan and Horn(1985), Israelachvili(1992), Matsuo and Kato

(1997) 유막 두께가 분자 크기 정도가 되면 고체면에 벌크(bulk) 상태의 유체와 다른 성질의 비유동성 고체화 층(immobile high viscosity solid-like layer)이 형성되어 틈새에서의 유동 현상에 영향을 준다고 밝히고 있다. 이것은 유체 분자와 고체면의 상호 작용으로 인하여 유체 분자가 고체 표면 위에 비유동 층(immobile layer)을 형성, Gungel(1997), Smeeth *et al.* (1996), Chen(1994), Gecim(1990)하기 때문이다.

엔진에서의 마찰 요소의(피스톤 링, 대단부 베어링, 캠과 타핏 등) 운전 상태는 고하중과 고속의 조건으로 인하여 유막 두께가 순간적으로 분자 크기 정도가 되는 경우가 많다. 그리고 윤활유 첨가제로 인한 유체의 비선형적 거동 현상으로 윤활유막이 틈새 설계의(clearance design) 예상값 보다 작게 되고 고체화 층으로 인하여 마찰 손실이 상대적으로 크게 나타난다, Sorab(1997). 지금까지의 고하중과 고속에서의 미끄럼 베어링에 대한 이론적 고찰은 뉴턴 유체(Newtonian fluid)의 레이놀즈 방정식에 의한 연속체 역학 범위에서의 고찰이 대부분이었다. 그러나 위에서 설명한 점도 지수 향상제의 첨가로 인한 유막의 비선형적 유동 현상과 연속체 역학(continuum mechanics)으로만 설명 되어질 수 없는 고체화 층의 생성에 대한 현상이 고려되어야 정확한 틈새 설계를 할 수 있고 결과적으로 고정밀 기계 요소의 설계 수준을 향상시킬 수 있게 된다.

본 연구는 연속체 역학 관점에서 경계 윤활 층의 대표적 물성치를 경계 윤활 층의 두께와 전단 저항력의 크기로 표현하였으며, 이러한 물리량을 연속체 역학에 의해 크게 지배 받는 비뉴턴 유체 층의 윤활 현상과 결합하는 이론 서술에 목적을 두고 있다. 따라서 점도 지수 향상제가 첨가된 윤활유막의 거동 특성을 유체 유동의 단면상에서 서로 다른 점도 특성을 가진 유막층(fluid film layer) 영역으로 나누어 해석한다. 고체 표면과 유체와의 상호 작용 및 고체 표면의 조건 등이 고려된 고체화 층에 대한 구성방정식과 유막 감소 효과를 고려한 구성 방정식을 경계면에서의 경계치 조건을 일치시켜 비뉴턴 유체의 유동을 해석할 수 있는 이론적 배경을 제시한다.

## 2. 해 석

윤활유막이 윤활유 분자 크기의 15배 정도가 되면 걸보기 점도는 벌크 상태보다 수십배가 커진다. 걸

보기 점도라고 하는 이유는 이러한 유막 두께에는 유체가 단순히 점성 유동에 의해서 결정되지 않기 때문이다. 순수한 점성 유체라 하면 응력은 변형률 속도의 함수로 나타나고 점도 또한 변형률 속도의 이차 불변 함수로 나타내어진다. 걸보기 점도는 단순히 전단 응력과 전단 변형률 속도의 비로 나타내어지며 때때로 예상할 수 없을 때가 있다.

틈새 안에서의 유체 층에 관한 연구는 Guangteng *et al.*(1996), Smeeth *et al.*(1996)에 의하여 수행되었는데 걸보기 점도를 틈새의 크기 함수로 간주하여 미세 유막 두께의 탄성 유체 윤활 연구를 하였다. 비록 이 연구는 틈새의 크기가 30 nm 정도 보다 작아 지면 고체화 층의 점성이 비정상적으로 증가하는 영향을 고려하였지만 그보다 더 큰 유막 두께의 영역에서 유막 감소 효과를 해석하고 있지 않다. 본 연구에서는 점도 지수 향상제의 첨가로 인한 유막 형성의 물리적 현상을 두 고체 표면 위에 있는 고체화 층과 중간에 존재하는 비뉴턴 유체 영역의 형상으로 하여 해석하고자 한다.

운동 방향에 따른 폴리머 층의 점성 변화의 방향성을 고려할 수 있지만, 본 연구에서는 미끄럼 방향에 관계 없이 고체화 층의 물리적 특성은 일정하다고 간주한다. 두께 방향으로  $0 \leq z \leq \delta$ 의 영역과  $h - \delta \leq z \leq h$ 의 영역에서 표면에서의 폴리머 분자의 미세구조를 접촉 표면에 붙어 있는 다공질 층으로 모사한다 Jang and Tichy(1995). 이러한 물리적 현상을 설명하기 위하여 다음의 세가지 물질 매개 변수를 사용한다. 즉, (a) 점도  $\mu$  (b) 다공층의 두께  $\delta$  (c) 다공성  $\alpha$  이다. 이때 점성과 다공성은 폴리머 분자의 특징을 반영하고 압력과 전단 응력에는 영향을 받지 않는다고 가정한다. 만일 유막 두께  $h$ 가 고체화 층의 두께  $\delta$ 와 같을 때는 최소 유막 두께가 생긴다고 가정할 수 있으며 이때의 윤활 조건은 경계 윤활 상태(boundary lubrication)이다. 반면에 상대적으로 틈새가 두꺼운 영역에서는 폴리머 분자의 미세 구조층의 영향이 적기 때문에 동수압적 윤활 현상(hydrodynamic lubrication)이 두드러지게 나타난다. 이러한 근거로 본 연구에서 제안된 유체 유막에 대한 층 구조의 모델은 경계 윤활과 동수압적 윤활 현상이 함께 일어날 수 있는 많은 기계요소에 적용할 수 있다. 다공성 층의 두께는 두 고체 표면위에서 일정하게 붙어 있다고 고려한다. 다공성 층에서의 유체 유동은 Darcy의 법칙을 적용하는데 다공층에서의 국부적인 유동

속도는 압력 구배에 비례하고 점도에 역비례한다.  
 다공층에서의 압력 구배는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha^2}(V - V_{pored}) \quad (1)$$

영역 a ( $0 \leq z \leq \delta$ )에서의 압력 구배를 자세히 표현하면

$$\frac{\partial p(x,y)}{\partial x} = -\frac{\mu_a}{\alpha^2}(u_a - U_1) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial p(x,y)}{\partial y} = -\frac{\mu_a}{\alpha^2}(v_a - V_1) \quad (2b)$$

그리고 영역 b ( $h - \delta \leq z \leq h$ )에서는

$$\frac{\partial p(x,y)}{\partial x} = -\frac{\mu_b}{\alpha^2}(u_b - U_2) \quad (3a)$$

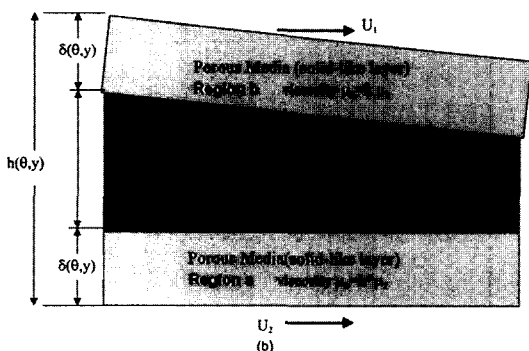
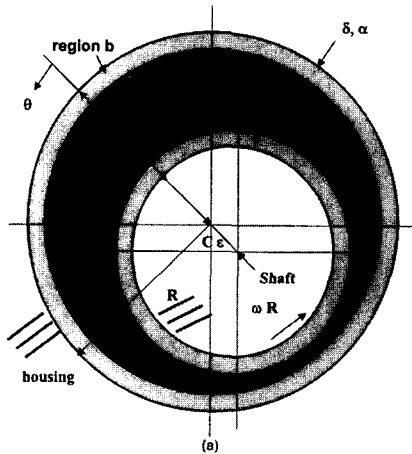


Fig. 1. Schematics of geometry in journal bearing contact (a) and fluid layer structure with porous layers and viscous fluid region (b).

$$\frac{\partial p(x,y)}{\partial y} = -\frac{\mu_b}{\alpha^2}(v_b - V_2) \quad (3b)$$

으로 표현된다.

다공성 층에서의 x와 y 방향으로의 속도 분포를 다시 정리하면 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$u_a = U_1 - \frac{\alpha^2 \partial p}{\mu_a \partial x} \quad (4a)$$

$$v_a = V_1 - \frac{\alpha^2 \partial p}{\mu_a \partial y} \quad (4b)$$

$$u_b = U_2 - \frac{\alpha^2 \partial p}{\mu_b \partial x} \quad (5a)$$

$$v_b = V_2 - \frac{\alpha^2 \partial p}{\mu_b \partial y} \quad (5b)$$

여기서  $\alpha$ 는 다공성을 나타내며  $\mu_a$ 와  $\mu_b$ 는 비유동성 고체화 층의 점성을 나타낸다.

벌크 유체의 영역 c ( $\delta \leq z \leq h - \delta$ )에서는 유막 감소 효과가 지배적인데 점성의 변화는 전단 변형률 속도  $\dot{\gamma}_c(x, y, z)$ 에 따라 변한다. 전단 변형률 속도에 따른 점성의 변화, Gecim(1990)는 다음의 식으로 표현한다(Fig. 2).

$$\mu_c(x, y, z) = \mu_1 \frac{\kappa + \mu_2 \dot{\gamma}_c(x, y, z)}{\kappa + \mu_1 \dot{\gamma}_c(x, y, z)} \quad (6)$$

여기서  $\mu_1$ 은 일차 뉴턴 점성이고 전단 변형이 없을 때의 점성을 나타내고 있으며,  $\mu_2$ 은 이차 뉴턴 점성을 나타낸다. 기호  $\kappa$ 는 곡선 적합 변수이며 이 값이

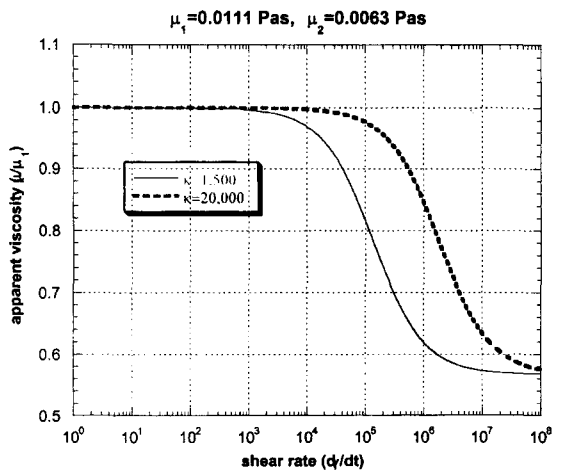


Fig. 2. Apparent viscosity variation according to shear rate increase for fluid region c.

클수록 일차 뉴턴 점성 계수에 크게 영향을 준다.

영역 c에서와 같이 순수한 비뉴턴 점성 유체의 유희에 관한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial p(x,y)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_c \frac{\partial u_c}{\partial z} \right) \quad (7a)$$

$$\frac{\partial p(x,y)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_c \frac{\partial v_c}{\partial z} \right) \quad (7b)$$

z 방향으로의 운동량 방정식에서 압력의 변화는 유막 두께 방향으로 매우 작기 때문에 각 영역 a, b, c에서 두께방향으로의 압력은 일정하다.

영역 c에서의 속도 분포는 유막 두께 방향으로 압력은 변하지 않는다는 조건을 이용하여 식 (7a)와 식 (7b)를 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_c = f_1 \frac{\partial p}{\partial x}(x,y) + f_2 C_{1a} + C_{1b} \quad (8)$$

$$v_c = f_1 \frac{\partial p}{\partial y}(x,y) + f_2 C_{2a} + C_{2b} \quad (9)$$

여기서

$$f_1(x,y,z) = \int_{\delta}^z \frac{1}{\mu_c} (z' - \delta) dz' \quad (10)$$

$$f_2(x,y,z) = \int_{\delta}^z \frac{1}{\mu_c} dz' \quad (11)$$

이다.

영역 c에서의 전단 변형률 속도의 크기는 점성과 압력구배의 함수로 표현되며 다음과 같다.

$$\dot{\gamma}_c^2 = \left( \frac{\partial u_c}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_c}{\partial z} \right)^2 \quad (12)$$

미세분자구조 층과 점성 유체 영역과의 경계면에서는 유동의 속도가 일치해야 한다는 경계 조건, 식 (13)을 이용하여 벌크 유체 영역에서의 유동 속도를 계산한다.

$$\begin{aligned} z = \delta : \quad u_c = u_a, v_c = v_a \\ z = h - \delta : \quad u_c = u_b, v_c = v_b \end{aligned} \quad (13)$$

벌크 영역에서의 속도 분포는 다음과 같이 계산된다.

$$u_c(x,y,z) = f_3 \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{u_b - u_a}{f_2(z=h-\delta)} f_2 + u_a \quad (14)$$

$$v_c(x,y,z) = f_3 \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v_b - v_a}{f_2(z=h-\delta)} f_2 + v_a \quad (15)$$

여기서

$$f_3(x,y,z) = f_1 - f_2 \frac{f_1(z=h-\delta)}{f_2(z=h-\delta)} \quad (16)$$

고체면의 운동 방향인 x와 y 방향으로의 유한 체적에 대한 연속 방정식(continuity equation)을 유막 두께 방향에 걸쳐서 적용시키면 다음과 같다:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

여기서

$$q_x = \int_0^h u dz = \int_0^{\delta} u_a dz + \int_{\delta}^{h-\delta} u_c dz + \int_{h-\delta}^h u_b dz \quad (18a)$$

$$q_y = \int_0^h v dz \quad (18b)$$

식 (18a)와 (18b)의 적분을 수행하고 식 (17)의 연속 방정식에 대입하면 다음의 무차원 매개변수와 변수들을 사용하여 다음의 수정된 레이놀즈 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x^*} \left[ h^{*3} f_{40} \frac{\partial p^*}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{R}{B} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[ h^{*3} f_{40} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right] \\ - \frac{\partial}{\partial x^*} \left[ h^* \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} (1-2\delta^*) \frac{\partial p^*}{\partial \theta} \right] - \left( \frac{R}{B} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[ h^* \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} (1-2\delta^*) \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right] \\ + \frac{\partial}{\partial x^*} \left[ h^{*3} \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} f_{50} \frac{\partial p^*}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{R}{B} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[ h^* \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} f_{50} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right] \\ - \frac{\partial}{\partial x^*} \left[ h^{*3} \frac{\alpha^{*2}}{\mu_b^*} f_{50} \frac{\partial p^*}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{R}{B} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y^*} \left[ h^* \frac{\alpha^{*2}}{\mu_b^*} f_{50} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right] \\ = \frac{\partial}{\partial x^*} [h^* f_{50}^*] - (1-2\delta^*) \frac{\partial h}{\partial x^*} \end{aligned} \quad (19)$$

각각의 영역 a, b, c에서의 속도 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_a^*(x^*, y^*, z^*) = 1 - \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} h^{*2}(x^*) \frac{\partial p^*(x^*, y^*)}{\partial x^*} \quad (20)$$

$$v_a^*(x^*, y^*, z^*) = 1 - \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} h^{*2}(x^*) \frac{\partial p^*(x^*, y^*)}{\partial y^*} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} u_c^*(x^*, y^*, z^*) = 1 + h^{*2}(x^*) f_3 \frac{\partial p^*(x^*, y^*)}{\partial x^*} \\ - \left( 1 - \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\alpha^{*2}}{\mu_b^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) \left( \frac{f_2^*}{f_{20}^*} \right) - \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} v_c^*(x^*, y^*, z^*) = h^{*2}(x^*) f_3 \frac{\partial p^*(x^*, y^*)}{\partial y^*} \\ + \left( \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} - \frac{\alpha^{*2}}{\mu_b^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) \left( \frac{f_2^*}{f_{20}^*} \right) - \frac{\alpha^{*2}}{\mu_a^*} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\dot{\gamma}_c^*(x^*, y^*, z^*) = \frac{1}{h^*} \sqrt{\left(\frac{\partial u_c^*}{\partial z^*}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_c^*}{\partial z^*}\right)^2} \quad (24)$$

$$\frac{\partial u_c^*}{\partial z^*} = \frac{h^{*2} \partial p^*}{\mu_c^* \partial x^*} \left( z^* - \frac{f_{10}^*}{f_{20}^*} \right) - \frac{1}{\mu_c^* f_{20}^*} \left( 1 - \frac{\alpha^* \partial p^*}{\mu_a^* \partial x^*} + \frac{\alpha^* \partial p^*}{\mu_b^* \partial x^*} \right) \quad (25)$$

$$\frac{\partial v_c^*}{\partial z^*} = \frac{h^{*2} \partial p^*}{\mu_c^* \partial y^*} \left( z^* - \frac{f_{10}^*}{f_{20}^*} \right) - \frac{1}{\mu_c^* f_{20}^*} \left( \frac{\alpha^* \partial p^*}{\mu_a^* \partial z^*} - \frac{\alpha^* \partial p^*}{\mu_b^* \partial x^*} \right) \quad (26)$$

식 (19)에서 (26)까지 사용된 무차원 변수와 매개 변수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_c^*(x^*, y^*, z^*) &= \frac{\mu_c}{\mu_1} = \frac{\kappa^* + \mu_0^* \dot{\gamma}_c^*}{\kappa^* + \dot{\gamma}_c^*} \\ \mu_0^*(x^*, y^*, z^*) &= \frac{\mu_2}{\mu_1}, \quad \mu_{a,b}^*(x^*, y^*, z^*) = \frac{\mu_{a,b}}{\mu_1} \\ \kappa^* &= \frac{\kappa c}{\mu_1 \omega R^2}, \quad \dot{\gamma}_c^* = \frac{\dot{\gamma}_c}{\omega R}, \quad \alpha^* = \frac{\alpha}{c} \\ \delta^*(x^*, y^*) &= \frac{\delta}{h}, \quad z^* = \frac{z}{h}, \quad t^* = \omega t \\ f_1^*(x^*, y^*, z^*) &= \int_0^z \frac{\zeta}{\mu_c^*} d\zeta, \quad f_2^*(x^*, y^*, z^*) = \int_0^z \frac{\zeta}{\mu_c^*} d\zeta, \\ f_{10}^* &= f_1^*(x^*, y^*, 1 - \delta^*), \quad f_{20}^* = f_2^*(x^*, y^*, 1 - \delta^*), \\ f_3^*(x^*, y^*, z^*) &= f_1^* - f_2^* \frac{f_{10}^*}{f_{20}^*}, \\ f_{10}^* &= f_4^*(x^*, y^*, 1 - \delta^*) = \int_0^{1-\delta^*} f_3^* dz^* \\ f_{20}^* &= f_5^*(x^*, y^*, 1 - \delta^*) = \int_0^{1-\delta^*} f_2^* dz^* \end{aligned} \quad (27)$$

고체화 층에 대한 많은 고려 사항이 있을 수 있는데 첫째, 각각의 고체 면에서의 극성(polarity)과 흡착성(adsorption)에 따라 고체화 층에서의 걸보기 점도가 다르게 표현된다. 둘째, 고체화 층의 두께는 다르다. 셋째, 고체면의 미끄럼 운동에 따라 고체화층의 분자들이 방향성을 갖고 흡착되므로 이방성에 대해서 고려될 수 있다. 본 연구에서는 첫번째 현상만 고려하고 다른 두가지 물리적 가능성에 대해서는 고려하지 않는다. 이것들에 대한 고려는 단지 지배방정식 (19)에서 사용된 매개 변수들을 변화 시켜 달성될 수 있다.

고체화 층과 점성 유체 영역의 경계면에서의 전단 응력은 마찰력의 크기로 나타나는데 그 크기는 전단 응력을 베어링 전체 영역에 대하여 적분하여 계산하며 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{x,z}^* = \mu_c^* \frac{\partial u_c^*}{\partial z^*}$$

$$f_{friction} = \iint \tau_{x,z}^* dx^* dy^* \quad (28)$$

본 연구에서 유도한 수정된 레이놀즈 방정식을 보면 동일한 성격의 고체화 층 a와 b는 식 (19)에서 마지막 네개의 항을 제거시킨다. 따라서 이 네개의 항은 다른 성격의 고체화 층이 틈새 안에서 유체의 압력 형성과 유동 속도 분포의 영향을 고찰할 수 있는 근거를 제시한다. 그러나 일반적으로 저어널의 고체면은 베어링의 고체면과 다른 물질로 가공 되기 때문에 극성과 흡착성이 달라 각각의 고체면에서 다른 고체화 층을 형성시킨다. 다공성 변수  $\alpha$ 는 길이 단위이며 본 시뮬레이션에서는 최소 유막 두께의 0.1~0.3배 정도로 간주한다. 이렇게 함으로써 수정된 레이놀즈 방정식은 점성 유체층과 분자의 미세 구조층으로 이루어진 틈새 유막을 설명할 수 있으며 각 유체층의 경계면에서 특성이 연속인 성질을 갖게 된다.

### 3. 결 과

압력  $p^*$ 를 구하기 위하여 비선형 편미분 방정식 (9)  $x^*$ 와  $y^*$  방향으로 식 (24)~(26)를 전단 변형률 속도  $\dot{\gamma}_c^*$ 를 구하기 위하여  $z^*$  방향으로 이산화 하였다. 베어링의 기하학적 형상에 대한 정보는 다음과 같다. 편심률  $\varepsilon$ 은 0.9이며  $R/B=1$ 이다. 따라서 무차원 최소 유막 두께  $h_{min}^* = 1 - \varepsilon = h_{min}/c = 0.1$ 이다. 비선형 편미분 방정식을 풀기 위하여 초기단계에 선형인 편미분 방정식 즉, 뉴턴 유체의 레이놀즈 방정식의 해를 이용하여 초기치를 산정한다. 따라서 이때의 각각의 유체 층에서의 걸보기 점도값은  $\mu_c^* = 1$ 로 한다. 본 계산에서 고려된 고체화 층의 전단 저항성은 점도의 크기로 나타내었는데 그 크기를  $\mu_{a,b}^* = 10$ 으로 하였고 다공성은  $\alpha^* = 0.05 h_{min}^*$ 로 하였다. 고체화 층의 두께는 무차원 값으로 각 고체면에서 일정하게 분포되어 있다고 가정한다. 예를 들어  $\delta^* h^* = \delta/c = 0.1 h_{min}^*$ 로 한다. 모든 점성 함수값  $f_i^*$  값은 완전 함수 형태로 계산될 수 있으며 압력  $p^*$ 와 전단 변형률 속도  $\dot{\gamma}_c^*$ 도 이때 구해진 점성 함수값을 이용하여 각각의 격자점  $(x^*, y^*)$ 에서 계산된다. 새롭게 계산된 압력과 전단 변형률 속도값을 가지고 점성영역에서의 걸보기 점도  $\mu_c^*(\theta, y^*, z^*)$ 를 다시 계산한다. 이러한 일련의 과정을 거친 후에 점성 함수  $f_i^*$ 를 수렴할 때 까지 계산한

다. 이산화된 비선형 편미분 방정식은 반복 계산법에 의해 구해지는데 빠른 수렴효과를 위하여 압력과 전단 변형률 속도 모두 과도 이완법(Successive Over-Relaxation)에 의해 계산한다. 수렴의 판단은 압력에 관하여 격자점  $x^*$ 와  $y^*$ 에서 수행되며 전단 변형률 속도에 관해서는 추가로  $z^*$  방향도 함께 수행한다.

수렴의 조건은 압력과 전단 변형률 속도의 변화량이 0.1% 이내로 될 때 계산을 완료한다. 격자점의 갯수는  $z^*$  방향으로 100개  $x^*$ 와  $y^*$  방향으로  $31 \times 30$ 개로 하는데 본 시뮬레이션을 위해서는 충분한 정확도를 얻을 수 있는 크기이다.

유막 압력을 고체화 층의 두께가 변함에 따라 계산되었다. 고체화 층의 두께는  $\delta h^* = \delta/c$  최소 유막 두께  $h_{min}^*$ 의 일부분이라고 고려되었다. 고체화 층의 두께는 첨가제의 분자들의 특성에 따라 영향을 받는데 이것은 고체면과의 상호작용 특성과도 관련이 있다. 본연구에서 제안된 고체화 층과 고체와의 상호작용 특징은 다음의 세가지 매개 변수들로 표시하고 있다: 다공층의 두께  $\delta$ , 다공성  $\alpha^*$ 과 점성  $\mu_{a,b}^*$ 이다. 고체화 층의 비유동성은 점성 계수로 표시하는데 다공층이 전단 응력을 받을 때 전단 저항성을 나타낸다. 이들 점성의 크기는 뉴턴 유체의 점성의 2~100배 정도로 하여 계산하였다. 모든 계산 결과에서 저어닐의 편심률은  $\varepsilon = 0.9$ 로 하였다. 곡선 적합 점성 매개 변수  $\kappa^* = 0.65$ , 일차 뉴턴 점성과 이차 뉴턴 점성의 비는  $\mu_0^* = 0.57$ 로 하였다. Paranipe(1992).

뉴턴 유체의 경우, Fig. 3 고체화 층의 두께와 다공성은 모두 영이고 전단 변형률 속도는 점도 변화에 전혀 영향을 주지 않는다, 즉,  $\kappa^* = 0$ 이다. 뉴턴 유체의 압력 형성에 관한 계산 결과는 다른 계산 결과와 비교할 수 있는 기본을 제시한다. 저어닐의 편

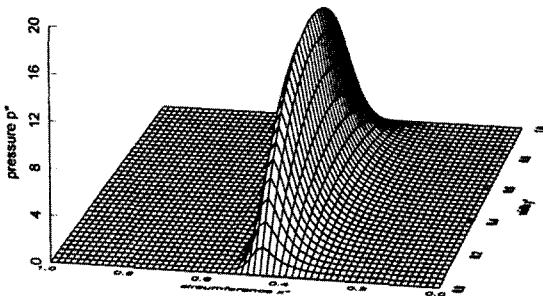


Fig. 3. Dimensionless film pressure for Newtonian fluid case,  $\delta^* h^* = 0.0 h_{min}^*$ ,  $\mu_c^* = 0.1$ ,  $\varepsilon = 0.9$ .

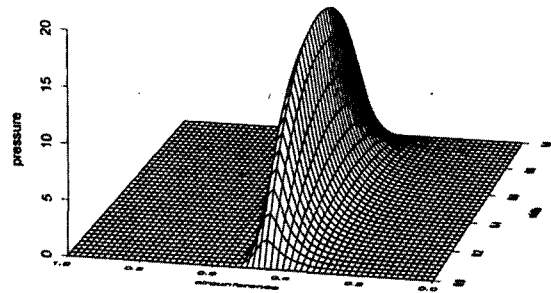


Fig. 4. Dimensionless film pressure for very thin layer case,  $\delta^* h^* = 0.1 h_{min}^*$ ,  $\mu_{a,b}^* = 10.0$ ,  $\varepsilon = 0.9$ , layer porosity  $\alpha^* = 0.1 h_{min}^*$ , shear thinning modulus  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ .

심이 비교적 크므로 압력의 형성은 원주 방향으로  $0.25 \leq x^* \leq 0.7$ 인 부분에 집중적으로 크게 나타난다.

Fig. 4은 매우 얇은 고체화 층의 경우를 계산한 것이다. 이때  $\delta h^* = 0.1 h_{min}^*$ 이고 다른 물질 매개 변수  $\mu_{a,b}^* = 10$ ,  $\alpha^* = 0.1 h_{min}^*$ 이다. 만일 이 상태에서 고체화

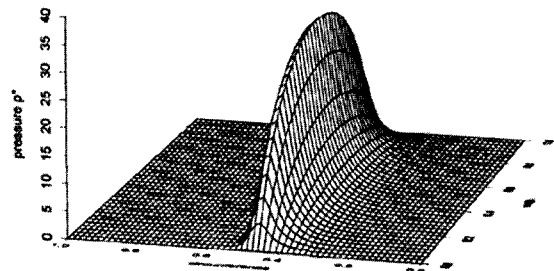


Fig. 5. Dimensionless film pressure for very thin layer case,  $\delta^* h^* = 0.2 h_{min}^*$ ,  $\mu_{a,b}^* = 10.0$ ,  $\varepsilon = 0.9$ , layer porosity  $\alpha^* = 0.1 h_{min}^*$ , shear thinning modulus  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ .

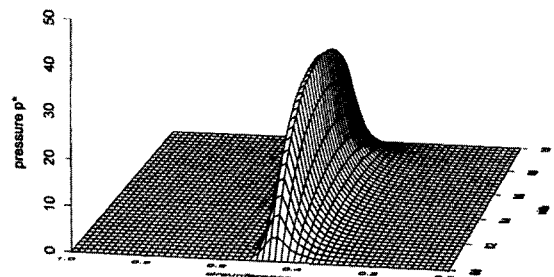


Fig. 6. Dimensionless film pressure for very thin layer case,  $\delta^* h^* = 0.3 h_{min}^*$ ,  $\mu_{a,b}^* = 10.0$ ,  $\varepsilon = 0.9$ , layer porosity  $\alpha^* = 0.1 h_{min}^*$ , shear thinning modulus  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ .

층의 두께가  $\delta^* h^* = 0.1 h_{\min}^*$ 에서  $0.3 h_{\min}^*$ 로 증가하게 되면(Fig. 4a, b, c) 유막 압력의 크기는 급격하게 증가 하게 된다. 이는 경계 윤활 영역에서의 경계 윤활막의 두께 증가가 하중 지지력에 미치는 영향과 일치한다.

Fig. 5와 6은 중간 두께의 고체화 층의 경우  $\delta^* h^* = 0.2 h_{\min}^*$  또는  $\delta^* h^* = 0.3 h_{\min}^*$  인데 이때 각각의 고체화 면에서의 고체화 층의 전단 저항 ( $\mu_{a,b}^* = 10$ )과 다공성( $\alpha^* = 0.1 h_{\min}^*$ )을 일정하게 하여 시뮬레이션한 경우

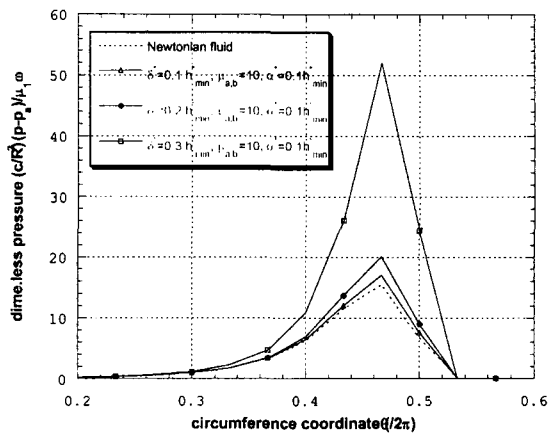


Fig. 7. Centerline pressure  $p^*$ , effect of layer thickness: porosity  $\alpha^* = 0.1 h_{\min}^*$ , eccentricity  $\varepsilon = 0.9$ , layer viscosity  $\mu_{a,b}^* = 10.0$ , shear thinning modulus  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ , layer thickness,  $\delta^* h^* = 0.1 h_{\min}^*$ .

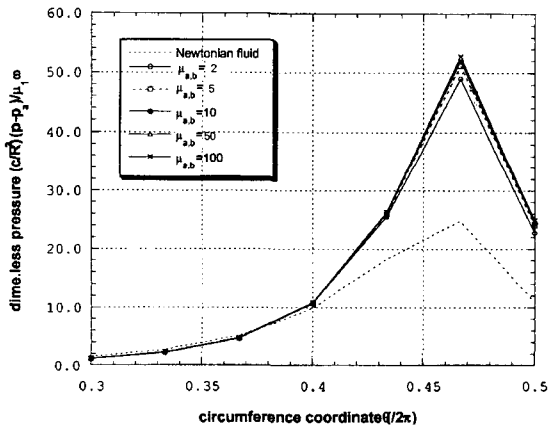


Fig. 8. Centerline pressure  $p^*$ , effect of layer viscosity: porosity  $\alpha^* = 0.1 h_{\min}^*$ , eccentricity  $\varepsilon = 0.9$ , shear thinning modulus  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ , layer thickness,  $\delta^* h^* = 0.1 h_{\min}^*$ .

이다.  $\delta^* h^* = 0.3 h_{\min}^*$ 의 경우 유막 압력 변화에 고체화 층이 두께는 압력 형성에 크게 영향을 미친다는 결과를 보여준다.

고체화 층의 두께 변화가 압력 형성에 미치는 영향을 저어널 베어링의 중간영역에서 크기 변화를 종합적으로 비교하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

고체화 층의 전단 저항성이 하중 지지력에 미치는 영향은 점도의 크기 변화에 크게 영향을 받지 않고 그 크기도 고체화 층의 두께의 영향보다 작다는 것을 보여준다(Fig. 8).

Fig. 9는 점도 지수 향상제가 첨가된 유막 틈새 안에서의 유동 현상을 뉴턴 유체의 유동 현상과 비교하여 나타낸 것이다.  $\delta^* h^* = 0.1 h_{\min}^*$  일 때 뉴턴 유체

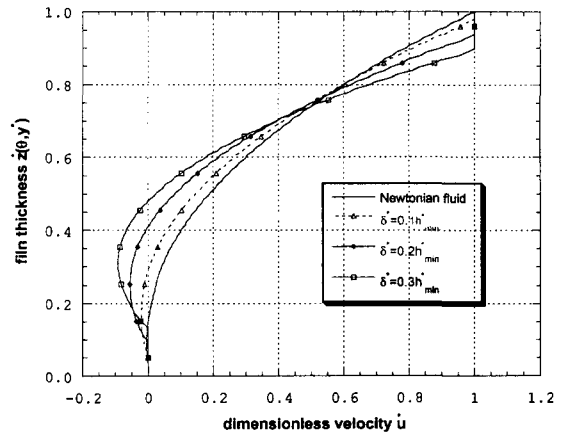


Fig. 9. Typical pressure profile  $u^*$ , at negative pressure gradient location, effect of layer thickness:  $\alpha^* = 0.1 h_{\min}^*$ , eccentricity  $\varepsilon = 0.9$ , shear thinning  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ .

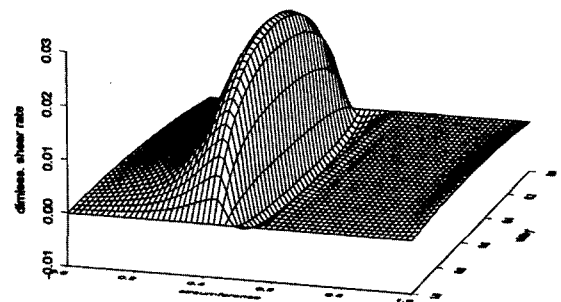


Fig. 10. Shear stress distribution at the upper boundary between solid-like layer and fluid region: porosity  $\alpha^* = 0.1 h_{\min}^*$ , eccentricity  $\varepsilon = 0.9$ , shear thinning  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_0^* = 0.57$ .

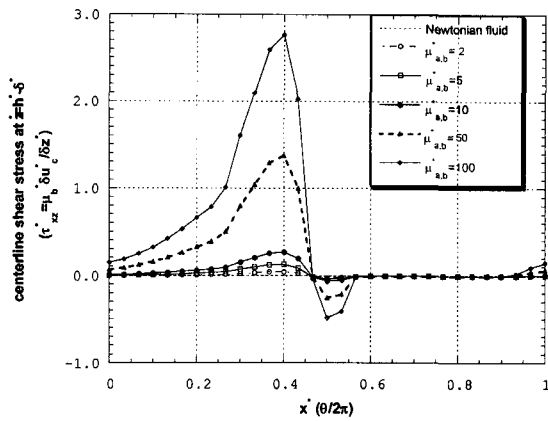


Fig. 11. Centerline shear stress distribution, effect of layer thickness:  $\alpha^* = 0.1 h_{min}^*$ , eccentricity  $\epsilon = 0.9$ , shear thinning  $\kappa^* = 0.65$ , ratio of low to high shear viscosity  $\mu_{0}^* = 0.57$ .

의 경우와 달리 완전한 음의 속도 구배를 나타낸다. 고체화 층과 점성 유체 영역의 경계면에서 전단 응력을 구하였는데(Fig. 10), 이것은 점도 지수 항상제가 마찰력에 미치는 영향을 나타내며 저어닐 베어링의 중간 영역에서 전단 응력의 크기는 고체화 층의 비유동성이 클수록 커진다는 것을 알 수 있다(Fig. 11).

#### 4. 결 론

본 연구의 배경은 비연속체 역학이 지배하는 경계 윤활 층의 대표적 물성치인 경계 유막 층의 두께와 전단 저항성을 연속체 역학으로 설명되어지는 동수압적 윤활 현상(비뉴턴 유체)에 접목시키는 해석 모델에 대한 연구이다.

본 연구에서 제안된 두 고체 면사이의 유체 거동에 대한 모델은 유막의 두께가 유체 분자의 크기에 해당하는 경우와 윤활제의 첨가에 의해서 벌크 상태의 유체의 점성이 변하는 경우에 모두 동시에 적용할 수 있다. 점성 유체의 영역은 최소 유막 두께 지점  $\theta = \pi$  에서  $(1-2\delta) h_{min}^*$  이다. 예를 들어 극단적인 경우 기계 부품의 초기 시동시에 저어닐의 편심률은 0.99 일 경우는 많다. 이때의 상황은 분명히 경계 윤활 상태일 것이다. 25 mm 직경을 가진 베어링 시스템의 경우 틈새  $c = 10 \mu m$  라고 하면 다음과 같은 상황이 일어나며 본 연구에서 제안된 유막 층에 관한 해석이 적용될 수 있다. 즉, 이때의 최소 유막 두께는  $h_{min} = 100 \text{ nm}$  이고 고체화 층의 두께가  $\delta = 30 \text{ nm}$

이면 점성 유체 층의 두께는 40 nm 이다. 시뮬레이션 결과는 고체화 층의 존재 때문에 뉴턴 유체의 경우 보다 크게 증가된 압력 분포를 보여준다. 그러나 이러한 경우에 있어서 동수압적 윤활 상태에서는 보다 극단적인 압력 분포 형태를 보여주는데 이론상 압력은  $(1-\epsilon)^2$ 에 비례하게 된다.

본 연구에서 제안된 고체화 층에 대한 다공질 층으로의 해석 의도는 경계 윤활 상태에서의 유막 상태의 물리적 현상을 수학적으로 어떻게 이상화할 것인가에 대해 한가지 모델을 실험적 결과를 근거를 두어 설명하고자 하였다. 뉴턴 유체와의 압력 분포를 비교하면 고체면 위에 있는 유체의 분자의 미세 구조가 압력 분포를 크게 증가 시키는 역할을 한다고 결론 지을 수 있다. 두 고체 면의 상대 미끄럼 속도가 작을 때 동수압적 윤활 이론만을 고려하면 하중 지지력이 형성되지 않는다. 그러나 경계 윤활 이론에 의하면 이러한 상황에서도 경계 윤활 막은 고체 면 위에 존재하여 하중을 지지한다는 사실에 비추어 보면 본 연구에서의 제안된 유막층에 대한 해석 결과는 이론적으로 합치된 결과를 보여주고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME-97-E-03)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사를 표합니다.

#### 기호설명

- $f_1, f_3$  :auxiliary viscosity function ( $m^4/Ns$ )
- $f_2$  :auxiliary viscosity function ( $m^3/Ns$ )
- $f_i^*$  :auxiliary dimensionless viscosity function
- $h$  :bearing clearance (m)
- $u_a, u_b, u_c$  :fluid velocity in the x direction in region a, b and c (m/s)
- $v_a, v_b, v_c$  :fluid velocity in the y direction in region a, b and c (m/s)
- $U_i$  :surface sliding velocity in x direction (m/s)
- $V_i$  :surface sliding velocity in y direction (m/s)
- $\alpha$  :porosity (m)
- $\delta$  :porous layer thickness (m)



$\epsilon$	:eccentricity ratio
$\kappa$	:viscosity parameter ( $\text{N/m}^2$ )
$\mu_a, \mu_b, \mu_c$	:viscosity of region a, b, and c ( $\text{Ns/m}^2$ )
$\mu_1, \mu_2$	:low shear and high shear viscosity of region c ( $\text{Ns/m}^2$ )
$\omega$	:bearing rotational speed (1/s)
superscript	
*	:dimensionless variable

### 참고문헌

1. Chan, D. Y. C. and Horn, R. G., "The Drainage of Thin Film Liquid Between Solid Surfaces," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 83, No. 10, pp. 5311-5324, 1985.
2. Chynoweth, S., Coy, R. C. and Michipoulos, Y. "Simulated Non-Newtonian Lubricant Behavior Under Extreme Conditions," *Proc. Instn. Mech. Engrs, Ser. J*, Vol. 209, pp. 243-254, 1995.
3. Guangteng, G. and Smeeth, M., Cann, P. M. and Spikes, H. A., "Measurement and Modeling of Boundary Film Properties of Polymeric Lubricant Additives," *Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol. 210, pp. 1-15, 1996.
4. Gecim, B. A., "Non-Newtonian Effects of Multi-grade Oils on Journal Bearing Performance," *STLE*, Vol. 33, pp. 384-394, 1990.
5. Jang, S. and Tichy, J. A., "Rheological Models for Thin Film Microconats," *Journal of Tribology*, Vol. 117, 1995.
6. Paranjpe, R. S. and Han, T., "A transient Thermodynamic Analysis Including mass Conserving Cavitation for Dynamically Loaded Journal Bearings," *Journal of Tribology*, Vol. 117, pp. 369-378, 1995.
7. Paranjpe, R. S., "Analysis of Non-Newtonian Effects in Dynamically Loaded Finite Journal Bearing Including Mass Conserving Cavitation," *Journal of tribology*, Vol. 114, pp. 736-746, 1992.
8. Taylor, C. M., *Engine tribology*, Tribology Series, Vol. 26, Elsevier, London, 1993.
9. Tichy, J. A., "A Surface Layer Model for ThinFilm Lubrication," *Tribology Transaction*, Vol. 38, pp. 577-582, 1995.
10. Israelachvili, J. N., *Intermolecular and Surface Forces*, 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, 1992.
11. Georges, J., "Some Surfaces Science Aspects of Tribology," *New Directions in Tribology*, Mechanical Engineering Publications, 1997.
12. Gonsel, S., Smeeth, M. and Spikes, H., "Friction and Wear Reduction by Boundary Film Forming Viscosity Index Improvers," *SAE SP-1209*, pp. 85-110.
13. Sorab, J. and Korcek, S., "Friction Reduction Potential of Advanced Engine Oils in Bearings," *World Tribology Congress*, London, pp. 894, 1997.
14. Smeeth, M., Spikes, H. and Gonsel, S., "The Formation of Viscous Surface Films by Polymer Soutions: Boundary or Elasto-hydrodynamic Lubrication," *Tribology Transactions*, Vol. 39, pp. 72-725, 1996.
15. Chen, C. I., Duda, L., Wu, J. and Klaus, E., "Predicting Viscosity-Shear Relationships of VI Improved Lubricants," *SAE 942025*.
16. Fredrickson, G. and Pincus, P., "Drainage of Compressed Polymer Layers: Dynamics of a Squeezed Sponge," *Langmir(American Chemical Society)*, Vol. 7, pp. 796-795, 1991.
17. de Gennes, P. G., "Polymer Solutions near Interface," *American Chemical Society*, Vol. 14, pp. 1637-1644, 1981.
18. Hector, J., Fransco, Cruz, R. *et al.*, "Oil Activity Surface Concept on the Study of ZDDP-Basestock Type Binary Systems," *SAE 941979*.
19. Anleitner, M., "Reconciling Empirical and Theoretical Views of Lubrication in Wet Friction Devices," *SAE 941102*.