

액정의 유희특성에 관한 연구

민 지홍* 임 윤철

* 연세대학교 대학원 기계공학과
연세대학교 기계공학과

A study on the lubrication characteristics of Liquid Crystals

Jee-Hong Min* Youn-Chul Rhim

* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Yonsei Univ.
Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

1. 서론

액정은 합성에 의해서 만들어지는 고분자 화합물로서 액체와 고체결정의 중간적인 특성을 갖는 물질이다. 따라서 액체와 같이 점도를 갖고 유동하며 고체와 같이 외부하중에 대하여는 탄성변형을 하므로 일반 윤활유보다 월등한 윤활특성이 기대된다.

액정은 분자배열에 따라 Smectics, Cholesterics, Nematics의 세종류로 나뉘어지며 Smectics는 다시 Smectic A, Smectic C등으로 분류되며 관심대상은 Smectic A이다. Smectic A의 분자배열은 막대모양의 고분자구조(Director라 하며 길이는 수십 nm이고 굵기는 길이의 10% 정도이다.)가 많은 층을 이루며 각층에 수직인 방향으로 정렬하고 있다.

액정의 유동해석에 관한 운동방정식은 De Gennes와 Pershan등에 의해서 정립되었으며[1-3] 연속체역학의 관점에서 다루어졌다. 근래에 들어 프랑스의 Orsay Group은 액정으로 채워진 평행판 사이에서의 squeeze film에 관한 유동해석이 이루어졌으며[4] Oswald, Kleman등은 경사진 두평판 사이에 채워진 액정의 유동에 관하여 기본적인 유희방정식을 유도하였다[5]. Tichy와 Rhim은 액정층 상호운동에 대한 수학적 모델을 세우고 섭동법을 사용하여 해석하였으며[6,7] 임 윤철과 민 지홍은 선형화한 모델에 대하여 유한요소법을 적용하여 수치해석하였다[8]. 그러나 심한 비선형성으로 인하여 적은 침투계수영역에서만 수렴된 해를 구할 수 있었다.

액정층은 전단력을 받으면 일반 유체와 같이 미끄러지며 이것은 점도에 대응된다. 층에 수직인 방향의 하중에 대해서는 탄성변형을 일으키며 임계하중 이상에서 다수의 액정층이 이웃층에 스며들어간다.(침투: Permeation) 한편 액정층은 고체면에 강하게 부착하려는(strong anchoring) 성질이 있고 경사진 두 고체면 사이에 형성되면 간극의 비평행성으로 인하여 불연속이 발생한다[8]. 이는 금속조직에서의 끝전위(Edge Dislocation)와 같으며 최소변형에너지원칙에 의해서 버거스 벡터(Burgers' vector)가 일정하다고 할 때 그 위치가 결정된다[8]. 또한, 액정층이 핵형형상이 되도록 외력을 가할 경우 액정층은 이에 저항하는데 그 정도를 벌어짐(Splay)계수를 도입하여 정한다[9].

본 연구에서는 평판 슬라이더 베어링의 간극에 액정층이 형성되어있을때 액정의 탄성계수, 침투계수 및 벌어짐계수가 베어링부하, 액정층의 유동현상등에 미치는 영향을 비선형 유한 요소법을 사용하여 해석하고 레이놀즈 이론해와 비교하였다.

2. 지배방정식

액정(Smectic A)이 등은, 비압축성 유체라고 생각하

고 자력장 및 중력장의 영향이 무시될 수 있는 좁은 간극을 갖는 경사진 평판사이에 채워져 있을 때 일반 유체 유희의 해석에서와 같이 관성의 영향을 무시한 연속방정식 및 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot V^* = 0 \quad (1)$$

$$0 = \nabla \cdot \sigma^* + g^* \quad (2)$$

여기서 V^* 는 속도벡터, σ^* 는 전응력텐서(Total Stress Tensor)이고 g^* 는 몸체력이다.

Fig. 1는 본 연구에서 사용한 슬라이더 베어링의 수학적 모델이다. 따라서 액정은 1차원 슬라이더 베어링 내에서 2차원 유동을 한다.

액정층의 y방향 변위는 층을 이루는 액정층이 무한히 많다면 임의의 층의 변위는 그 층의 베어링 입구에서의 위치와 간극내에서의 좌표에 의해서 결정되는 연속함수 w^* 의 합으로 표시할 수 있다. 즉,

$$a^*(x^*) = a^*(0) + w^*[x^*, a^*(x^*)] \quad (3)$$

이며, 여기서 $a^*(0)$ 는 액정층의 베어링 간극 입구에서의 위치를 나타낸다.

탄성 및 벌어짐효과로 인한 몸체력은 De Gennes에 의해서 $\partial w^*/\partial x^*$ 가 충분히 작다고 가정하면 다음과 같이 정의된다[10].

$$g^* = E \frac{\partial^2 w^*}{\partial y^{*2}} - k \frac{\partial^4 w^*}{\partial x^{*4}} \quad (4)$$

E와 k는 액정의 탄성계수와 벌어짐계수이다. 식 (4)에서 표현된 몸체력은 현상학적 유동조건을 만족시키기 위해서 다음과 같은 방정식을 만족시켜야 한다.

$$g^* = \frac{1}{\lambda_p} \left[\frac{Dw^*}{Dt} - v^* \right] = \frac{1}{\lambda_p} \left[\frac{\partial w^*}{\partial t} + u^* \frac{\partial w^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial y^*} - v^* \right] \quad (5)$$

여기서 λ_p 는 침투계수이며 식 (4)와 (5)에서 표현된 몸체력은 서로 동가이어야 한다. 위의 지배방정식은 다음과 같은 변수로 무차원화 한다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{x^*}{B} & y &= \frac{y^*}{H} & h &= \frac{h^*}{H} & u &= \frac{u^*}{U} \\ v &= \frac{v^* B}{U H} & w &= \frac{w^*}{H} & P &= \frac{(P^* - P^*_a) H^2}{\mu U B} \end{aligned} \quad (6)$$

부호 *는 차원을 갖는 변수를 의미한다. 따라서 2차원

유동에서 무차원화된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial w}{\partial x} \left[M \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - K \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] = 0 \quad (8)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + N \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} - v \right] = 0 \quad (9)$$

$$N \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} - v \right] = M \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - K \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (10)$$

여기서 N, M, K는 각각 무차원화된 침투계수, 탄성계수 그리고 벌어짐계수이며 다음과 같이 정의된다.

$$N = \frac{H^4}{\mu \lambda_p B^2}, \quad M = \frac{E H^2}{\mu U B}, \quad K = \frac{k H^4}{\mu U B^5} \quad (11)$$

3. 경계조건

지배방정식에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$y = 0 : u = 1, v = 0, w = 0 \quad (12a)$$

$$y = h(x) : u = 0, v = 0, w = h(x) - 1 \quad (12b)$$

$$x = 0 : u = \phi_0(y), v = \psi_0(y),$$

$$w = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (12c)$$

$$x = 1 : u = \phi_1(y), v = \psi_1(y),$$

$$w = h_1 - 1 \text{ for } y \geq 0.5, \\ = 0 \text{ for } y < 0.5, \quad (12d)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$$

$$x = 1, y = 0 : P = 0 \quad (12e)$$

액정의 유속에 관한 경계조건으로서 양 평판에서 no slip 조건을 적용하였으며 입, 출구에서 주어진 ϕ 와 ψ 는 Reynolds 방정식에서 유도된 속도분포를 사용하였다. 입력에 관한 경계조건은 베어링 출구 하단부에서 주위압력으로 설정하였다.

액정층이 정지한 경우 물체력이 영이 되면 무한한 정지 액정층의 임의의 위치(x_0, y_0)에 존재하는 끝전위의 영향으로 인한 액정층의 변위는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다. [3]

$$w_1 = -\frac{\Delta a}{4} \frac{y - y_0}{|y - y_0|} \left[\operatorname{erf} \left\{ \frac{x - x_0}{\sqrt{4\lambda(y - y_0)}} \right\} + \operatorname{erf} \left\{ \frac{x_0}{\sqrt{4\lambda(y - y_0)}} \right\} \right] \quad (13)$$

여기서 Δa 는 액정층의 두께이고 erf는 error function 을 의미한다. λ 는 $(K/M)^{0.5}$ 이며 액정층의 변위는 끝전위부근에서 매우 급격히 변화한다. 패기형 간극에 채워진 액정층은 벽면에 강하게 부착하려는 성질로 인하여 벽면에 평행하므로 식 (13)에서 표현된 값을 보정하는 δw 가 필요하며 이 식은 다음과 같이 표현된다.

$$w(x, y) = w_1 + \delta w(x, y) \quad (14a)$$

액정층의 변위에 대한 보정값 δw 를 구함으로써 액정층의 변위 w 를 구할 수 있다. 한편 n 개의 끝전위가 존재하는 경우의 w_1 는 단순한 산술합으로 계산된다.

$$w(x, y) = \sum_{j=1}^n w_1(x, y; x_{0j}, y_{0j}) + \delta w(x, y) \quad (14b)$$

여기서 (x_{0j}, y_{0j})는 j 번째 끝전위가 존재하는 임의의 위치이며 w_1 에 대한 값은 식(17)에서 구하여지므로 식 (12a - 12d)에서 표현된 변위에대한 경계조건을 변위에 대한 보정값인 δw 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\delta w(x, 0) = -w_1(x, 0) \quad (15a)$$

$$\delta w(x, h(x)) = -(1-h(x)) - w_1(x, h(x)) \quad (15b)$$

$$\delta w(0, y) = 0, \quad \frac{\partial^2 \delta w(0, y)}{\partial x^2} = 0 \quad (15c)$$

$$\delta w(1, y) = h_1 - 1 - w_1(1, y) \text{ for } y \geq 0.5 \\ = -w_1(1, y) \text{ for } y < 0.5, \quad (15d)$$

$$\frac{\partial^2 \delta w(1, y)}{\partial x^2} = 0$$

이상과 같이 구하여진 경계조건을 이용하여 지배방정식을 해석한다.

4. 유한요소법의 적용

식 (7) - (10)은 비선형 연립방정식이므로 반복법에 의해 근사해가 구해진다. 따라서 엄밀하게 성립하지 않으며 잔류치가 r 이라면 다음과 같이 근사된다.

$$r_1 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (16a)$$

$$r_2 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial w}{\partial x} \left[M \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - K \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right] \quad (16b)$$

$$r_3 = -\frac{\partial P}{\partial y} + N \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} - v \right] \quad (16c)$$

$$r_4 = N \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} - v \right] - M \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + K \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (16d)$$

위의 지배방정식중 4차 미분항을 계산하기 위하여는 형상함수가 C¹연속조건을 만족시켜야 하는데 새로운 변수 Z를 도입한 보조방정식을 사용함으로써 C⁰연속조건을 만족하는 형상함수로써 해석이 가능하다.

$$r_5 = Z - (K)^{1/2} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial x^2} \quad (16e)$$

이때 사용되는 경계조건은 식(20c)와 (20d)에서 나타내는데 다시 정리하면 다음과 같다.

$$Z(0, y) = 0 \quad Z(1, y) = 0 \quad (17)$$

새로운 변수 Z를 도입함으로써 δw 에 대한 4차 미분항은 2개의 연립 2차 미분항으로 나뉘어지며 C⁰ 연속조건을 만족하는 형상함수를 사용하여 9개의 절점을 갖는 사각형요소를 사용할 경우 각 변수들은 부영역 (Ω_0) 내에서 다음과 같이 근사된다. 이때 유막압력 P

에 대한 형상함수는 사각형요소에서 모서리 4개의 절점만을 사용하여 1차함수의 형태로 근사된다.

$$u(x, y) = \sum_{i=1, j=1}^{i=3, j=3} N_{ij}(\xi, \eta) u_{ij} \quad (18a)$$

$$v(x, y) = \sum_{i=1, j=1}^{i=3, j=3} N_{ij}(\xi, \eta) v_{ij} \quad (18b)$$

$$\delta w(x, y) = \sum_{i=1, j=1}^{i=3, j=3} N_{ij}(\xi, \eta) \delta w_{ij} \quad (18c)$$

$$Z(x, y) = \sum_{i=1, j=1}^{i=3, j=3} N_{ij}(\xi, \eta) Z_{ij} \quad (18d)$$

$$P(x, y) = \sum_{k=1}^4 G_k(\xi, \eta) P_k \quad (18e)$$

여기서 ξ 와 η 는 부영역 내에서의 무차원화된 좌표축으로서 각각 -1에서 +1까지의 값을 갖는다. 하첨자 i, j 는 요소내에서 ξ 와 η 방향으로 각각 -1, 0, +1의 위치를 뜻하며 k 는 모서리 4점의 번호를 의미한다.

이상의 근사표현들을 이용하여 식 (7) - (11)의 지배방정식에 Galerkin의 가중잔류법을 적용하면 다음과 같다.

$$R_1 = \int_{\Omega} N_{1m} r_2 d\Omega \quad (19a)$$

$$R_2 = \int_{\Omega} N_{1m} r_3 d\Omega \quad (19b)$$

$$R_3 = \int_{\Omega} N_{1m} r_4 d\Omega \quad (19c)$$

$$R_4 = \int_{\Omega} N_{1m} r_5 d\Omega \quad (19d)$$

$$R_5 = \int_{\Omega} G_{kk} r_1 d\Omega \quad (19e)$$

여기서

$$l=1, 2, 3, \quad m=1, 2, 3$$

$$kk=1, 2, 3, 4$$

이다.

5. 비선형 방정식의 해법

식 (19)에서 유도된 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 는 연립 비선형 방정식이므로 비선형 문제의 일반적 해법의 하나인 Newton-Raphson법을 사용하면 다음과 같이 정리된다.

$$[K_c]^n \{ \Delta U_{ij} \}^n = \{ -R \}^n \quad (20)$$

$$\{ U_{ij} \}^{n+1} = \{ U_{ij} \}^n + R_p \{ \Delta U_{ij} \}^n$$

$$\{ U_{ij} \} = \{ u_{ij}, v_{ij}, \delta w_{ij}, Z_{ij}, P_k \}$$

여기서 상첨자 n 은 반복계산을 나타내며 U_{ij} 는 각 절점에서의 변수를 의미한다. ΔU_{ij} 는 각변수의 증가분을 의미하며 U_{ij}^{n+1} 는 반복계산에 의해서 구해진 변수의 새로운 값이다. 요소강성행렬(element stiffness matrix) K_c 는 식 (21)과 같이 표현된다.

$$[K_c] = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_1}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial R_1}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial R_1}{\partial \delta w_{ij}} & \frac{\partial R_1}{\partial Z_{ij}} & \frac{\partial R_1}{\partial P_k} \\ \frac{\partial R_2}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial R_2}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial R_2}{\partial \delta w_{ij}} & \frac{\partial R_2}{\partial Z_{ij}} & \frac{\partial R_2}{\partial P_k} \\ \frac{\partial R_3}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial R_3}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial R_3}{\partial \delta w_{ij}} & \frac{\partial R_3}{\partial Z_{ij}} & \frac{\partial R_3}{\partial P_k} \\ \frac{\partial R_4}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial R_4}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial R_4}{\partial \delta w_{ij}} & \frac{\partial R_4}{\partial Z_{ij}} & \frac{\partial R_4}{\partial P_k} \\ \frac{\partial R_5}{\partial u_{ij}} & \frac{\partial R_5}{\partial v_{ij}} & \frac{\partial R_5}{\partial \delta w_{ij}} & \frac{\partial R_5}{\partial Z_{ij}} & \frac{\partial R_5}{\partial P_k} \end{bmatrix} \quad (21)$$

식 (20)에서의 잔류(residual) 성분 R 은 다음과 같이 나타낸다.

$$\{ R \}^T = \{ R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4 \ R_5 \} \quad (22)$$

식 (21)에서 표현된 강성행렬 K_c 는 비대칭적인 형태를 나타내고 있으므로 비대칭 Skyline 해법을 사용하였다. 이때 수렴된 값을 얻기 위하여 완화계수 R_p 를 사용하여 반복계산을 통하여 해를 구하였다.

6. 결과 및 고찰

액정의 물리적 성질을 나타내는 변수들은 일반적으로 Table 1에 나타나 있는 범위의 값을 갖으며 식 (11)에서와 같은 무차원 변수로 변환시켜서 수치계산에 대입하였다. 베어링 출구에서의 무차원화된 간극 h_1 이 0.8과 0.9인 평판 슬라이더 베어링에 대해서 계산하였다. 베어링 하중은 수치계산에 의하여 구해진 압력분포를 적분하여 얻었고 베어링의 마찰력은 액정을 전단 방향에 대해서 뉴턴 유체로 가정하였으므로 유속의 y 방향 변화율 du/dy 를 베어링 길이에 대해서 적분함으로써 계산하였다. 수치계산은 Vax 6420과 IBM 320에 의해서 수행되었고 베어링 간극을 200개의 요소로 분할하여 계산하였다.

수렴정도를 판정하기 위하여 다음과 같이 정의되는 수렴지수 ϵ 의 값으로서 10^{-7} 을 택하였다.

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma (\Delta U_i)^2}{n}$$

여기서 n 은 전체 미지수의 수를 의미하며 반복계산횟수 80 ~ 200번에서 수렴된 결과값을 얻을 수 있었다.

Table 1. Material Properties of Smectic A

점도 μ	0.1 - 10	Pa·s	
침투계수 λ_p	$10^{-20} - 10^{-17}$	$m^4/N \cdot s$	$10^{-2} \leq N \leq 10^2$
탄성계수 E	10^7	Pa	$1 \leq M \leq 10$
벌어짐계수 k	10^{-11}	N	$K \leq 10^{-15}$

Fig. 4에서는 h_1 이 0.8인 베어링에서 액정층의 변위 w 의 변화를 보여주고 있으며 액정층에 $n_d=4$ 인 4개의 굽전위가 존재하여 액정층의 변위가 베어링 간극의 중심부를 따라서 4곳에서 급격히 변화하고 있는 것을 보여준다. 이때 액정층의 굽전위 부근에서의 변화량은

액정층의 두께 Δa 와 몇개의 층이 와해되는가를 나타내는 버거스 벡터(Burgers' vector)와의 곱으로 표현된다. 본 연구에서는 각 끝전위에서의 버거스 벡터의 크기가 같다고 가정하였고 계산에 사용할 수 있는 요소의 수가 제한되므로 비교적 큰 값의 버거스 벡터를 사용하였다. 많은 수의 끝전위를 사용하였을 경우 Fig. 4에서 나타나고 있는 끝전위에서의 급격한 층의 변화 폭은 상당히 완화될 수 있다. Fig. 5은 $na=8$ 일 때의 액정층의 변위를 나타내고 있으며 액정층의 변화의 폭이 Fig. 4에서 보다는 작게 나타나고 있다.

Fig. 6에서는 침투계수의 변화에 대한 베어링 하중의 변화를 보여주고 있다. 베어링 출구간극이 0.8과 0.9 일때 액정층에 끝전위가 4.8, 41개 나타날 때 액정이 받을 수 있는 베어링 하중의 변화를 보여주고 있다. 베어링 하중은 침투계수의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타나고 있다. 여기서는 0.4까지의 침투계수에서의 베어링 하중이 계산되었으며 0.4이상의 값에서는 수렴된 해를 얻을 수 없었다. 침투계수 변화에 따른 마찰력이 Fig. 7에 나타나 있다. 마찰력은 침투계수가 0.1이하의 영역에서는 거의 변화가 없으나 그 이상의 영역에서 침투계수의 증가에 따라 증가한다.

Fig. 8는 탄성계수가 베어링 하중에 미치는 영향을 보여주고 있다. 탄성계수가 0.1에서 10까지의 범위에서 증가함에 따라 베어링 하중이 증가한다. Fig. 9은 탄성계수의 변화에 대한 마찰력의 계산결과이다. 탄성계수의 변화영역내에서는 마찰력의 변화는 거의 없으며 슬라이더 기술기에 의해서 마찰력이 결정된다.

벌어짐계수는 보통 10^{-15} 이하의 값을 갖고 있다. Fig. 10에서 보이는 것과 같이 벌어짐계수는 10^{-8} 영역 이상의 범위에서부터 베어링 하중이 약간 증가하는 것으로 나타나고 있으나 벌어짐계수가 일반적으로 적용되는 범위 이상이며 마찰력의 경우도 베어링 하중과 같이 10^{-9} 영역 이하에서는 마찰력이 일정한 것으로 Fig. 11에서 보여지고 있다.

Table 2. Bearing load and friction force based on the hydrodynamic lubrication theory

h_l	Bearing load W	Friction force F
0.8	0.160	1.1295
0.9	0.0672	1.0565

Table 2에서는 일반 윤활유계를 사용할 때 적용되는 레이놀드 이론에 의해서 구하여진 베어링 하중과 마찰력을 보여주고 있다. 여기서 보여지는 값은 Fig. 6 - 11에서 표시되어 있는 윤활이론 값들을 의미한다. Table 2 및 Fig. 6 - 11에서의 베어링 하중과 마찰력은 다음과 같이 무차원화 된 것이다.

$$W = \frac{\mu U}{H^2} W^* \quad F = \frac{H}{\mu B U} F^*$$

베어링 간극내의 윤활특성에 관한 실험은 액정의 고분자구조가 수십nm 정도의 크기로 매우 작으므로 실험용 베어링의 가공상의 문제점을 비롯하여 수 많은 문제점이 있어서 아직 발표된 실험논문은 찾아보기 힘든 실정이다. 또 본 논문에서는 비교적 작은 값의 침투계수에 대해서 수렴값을 얻을 수 있었는데 대류항에 대한 계산 방법 또는 그밖의 수치해석 방법의 개선으로 더 큰 침투계수에 대한 수렴된 계산 결과를 얻을 수 있을 것이다.

7. 결론

Smectic A 액정을 평판 슬라이더 베어링의 윤활제로 사용하였을 경우의 윤활 현상을 수식화하고 유한요소법과 Newton-Raphson 법을 사용하여 비선형 연립미분방정식을 해석하는 프로그램용 개발하고 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 베어링 부하는 Reynolds 윤활이론치보다 큰값을 얻을 수 있으며 이같은 액정의 물성치인 침투계수가 증가함에 따라 급격히 증가하나 탄성계수나 벌어짐계수에는 거의 변화가 없다.

(2) 마찰력은 침투계수가 증가함에 따라 서서히 증가하고 탄성계수 및 벌어짐계수에는 무관하다.

이상의 결론으로부터 큰 침투계수를 얻을 수 있는 조건에서 액정을 윤활제로 사용할 경우 비교적 적은 마찰력에 대해 큰 부하를 얻을 수 있으므로 새로운 윤활 방법으로 개발이 기대된다.

REFERENCE

- De Gennes, P.G., "Viscous Flow in Smectic A Liquid Crystals," *Physics of fluids*, Vol. 17, No. 9, pp. 1645-1654, 1974.
- De Gennes, P.G., *The Physics of Liquid Crystals*, Oxford Press, 1974.
- Pershan, P.S., "Dislocation Effects in Smectic A Liquid Crystals," *Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 4, pp. 1590-1604, 1974.
- Orsay Group on Liquid Crystals, "On Some Flow Properties of Smectics A," *Journal de Physique*, C1, pp. 305-313, 1975.
- Oswald, P. and M. Kleman, "Théorie de la lubrification appliquée aux smectiques A," *C. R. Acad. Sc. Paris*, t294, s. II, pp. 1057-1060, 1982.
- Thicy, J.A., and Rhim, Y., "A Theory for the Lubrication of Layered Liquid Crystals," *ASME J. of Tribology*, Vol. 111, No. 1, pp. 169-174, 1989.
- Rhim, Y., and Tichy, J.A., "The Flow of Layered Liquid Crystals in a Thin Wedge with Dislocations," *ASME J. of Tribology*, Vol. 113, No. 3, pp. 492-498, 1991.
- 민지홍, 임윤철, "액정의 윤활제로서의 응용에 관한 연구," 연세대학교 산업기술연구소, 제23집, 제1권, pp. 61-68, 1991.
- Nallet, F. and Prost, J., "Edge dislocation Arrays in Swollen Lamellar Phases," *Europhysics Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 307-313, 1987.

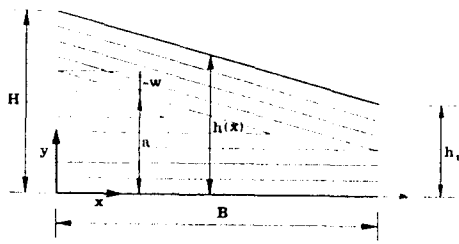


Fig. 1. Schematic of plane slider bearing with layered Smectic A liquid crystals

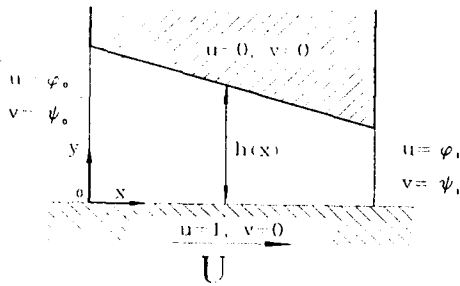


Fig. 2. Boundary conditions on plane slider bearing

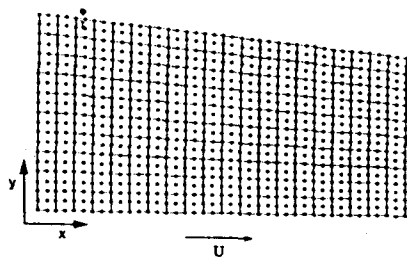


Fig. 3. Finite element mesh generation in analysis

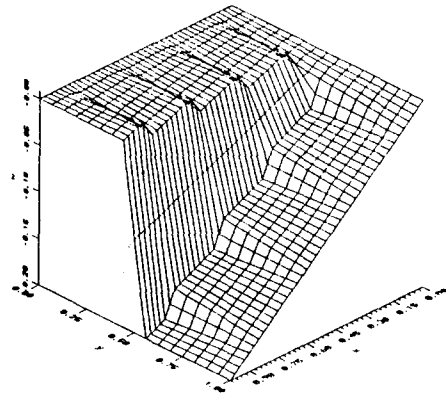


Fig. 4. Layer displacement of smectic liquid crystals with edge dislocations : $nd=4$, $h_1=0.8$

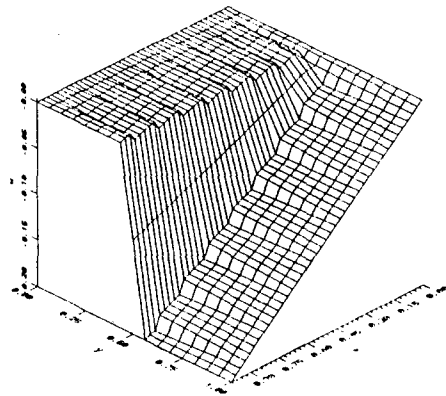


Fig. 5. Layer displacement of smectic liquid crystals with edge dislocations : $nd=8$, $h_1=0.8$

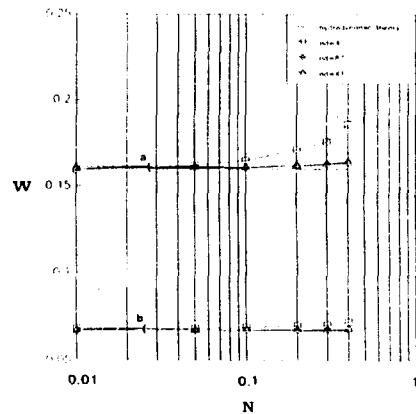


Fig. 6. Variation of bearing load with respect to the permeation modulus N , (a) $h_1=0.8$, (b) $h_1=0.9$ ($M=1.0, K=6.25 \times 10^{-19}$)

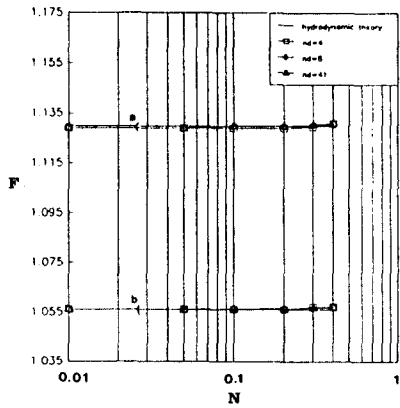


Fig. 7. Variation of friction force with respect to the permeation modulus N , (a) $h_1=0.8$, (b) $h_1=0.9$ ($M=1.0, K=6.25 \times 10^{-18}$)

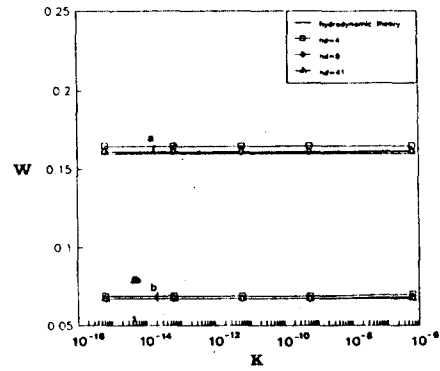


Fig. 10. Variation of bearing load with respect to the splay modulus K , (a) $h_1=0.8$, (b) $h_1=0.9$ ($N=0.1, M=1.0$)

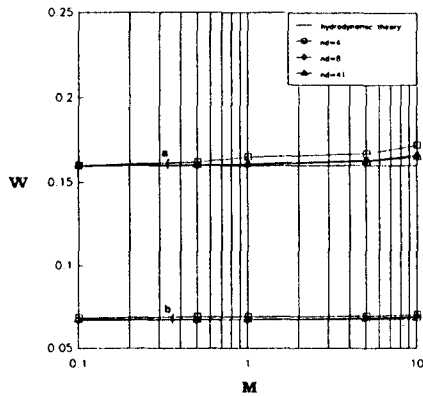


Fig. 8. Variation of bearing load with respect to the elastic modulus M , (a) $h_1=0.8$, (b) $h_1=0.9$ ($N=0.1, K=6.25 \times 10^{-18}$)

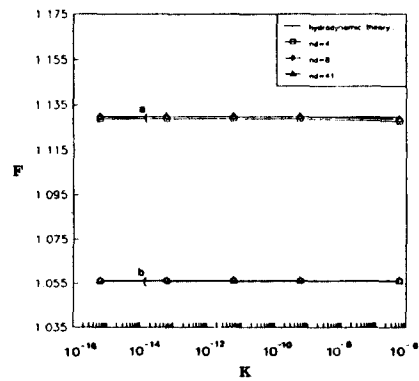


Fig. 11. Variation of friction force with respect to the splay modulus K , (a) $h_1=0.8$, (b) $h_1=0.9$ ($N=0.1, M=1.0$)

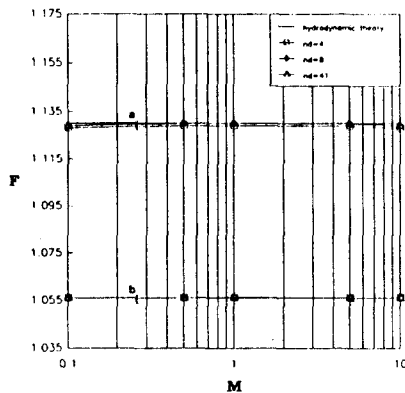


Fig. 9. Variation of friction force with respect to the elastic modulus M , (a) $h_1=0.8$, (b) $h_1=0.9$ ($N=0.1, K=6.25 \times 10^{-18}$)