

액정의 윤활제 응용가능성 연구

안 영 재

한국과학기술원 기계윤활연구실

A Study of Thermotropic Liquid Crystal as a Potential Lubricant

Young Jae Ahn

Division of Mech. Eng. KAIST, Seoul, Korea

ABSTRACT

Liquid crystals have some tribologically favorable lamellar structure. The Performance of thermotropic liquid crystal was investigated under elastohydrodynamic condition in terms of traction and film thickness. It exhibited low traction and very thin film thickness, which were almost constant over the entire speed range measured. It was also found to have sealing effect like grease.

This work has shown that there exists "potential" for using liquid crystals as lubricants.

1. 서 론

액정(liquid crystal)은 고체 결정과 등방성 액체의 사이에서 발견되는 중간형태의 물질상태이다. 액정은 일반 유체와 같이 흐를뿐만 아니라 고체가 갖는 이방성 특징을 동시에 갖는다. 액정의 점도는 일반적으로 10-100 cP이며 점도가 낮은 기계유 윤활유에 해당한다. 이방성의 특징은 분자들의 긴 간격의 배열에 기인되며 광학적 birefringence로 쉽게 나타나진다. [1]

액정은 액정을 구성하는 원인에 따라 Thermotropic, Lyotropic 그리고 Polymeric 액정으로 나누어진다. Thermotropic 액정은 순수화합물이나 균질한 혼합물에서 관찰되는데 온도의 변화에 따라 상이 변화한다. 일반적으로 이 액정은 nematic, cholesteric, 그리고 smectic 상으로 구분되며 Fig. 1에 나타나 있다. Lyotropic 액정은 비누와 같은 amphiphilic 분자들이 물과같은 적당

한 용매에 용해할때 나타난다. (Fig. 2) 이 액정은 Thermotropic 액정과 달리 농도가 상을 결정하는 주요한 변수이다. Polymer 용액은 액정 배열을 가지며 Polymeric 액정이라고 불린다.

Nematic은 가장 단순한 상으로 한 방향의 분자 배열만을 가진다. nematic은 그리스어로 실을 의미한다. [2] 알려진 모든 nematic은 한 대칭축(director), \vec{n} ,을 가지며 강한 광학적 이방성을 동시에 갖는다. 빛을 심하게 scattering을 하기 때문에 nematic은 혼탁하게 보인다. 한 방향의 분자배열을 갖는 또 다른 thermotropic 상은 chiral 분자에 의해서 만들어진다. 이는 cholesteric 상으로 nematic 상과 동일하지만 director가 가지 광선의 파장에 상응하는 간격을 가지며 틀어져 있다. 틀림에 의한 굴절률의 변화는 Bragg scattering에 의하여 여러가지 색깔로 나타나며, cholesteric상이 가장 아름다운 액정상임을 보여 준다. 온도에 따른 색깔 변화로의 응용이 가능한

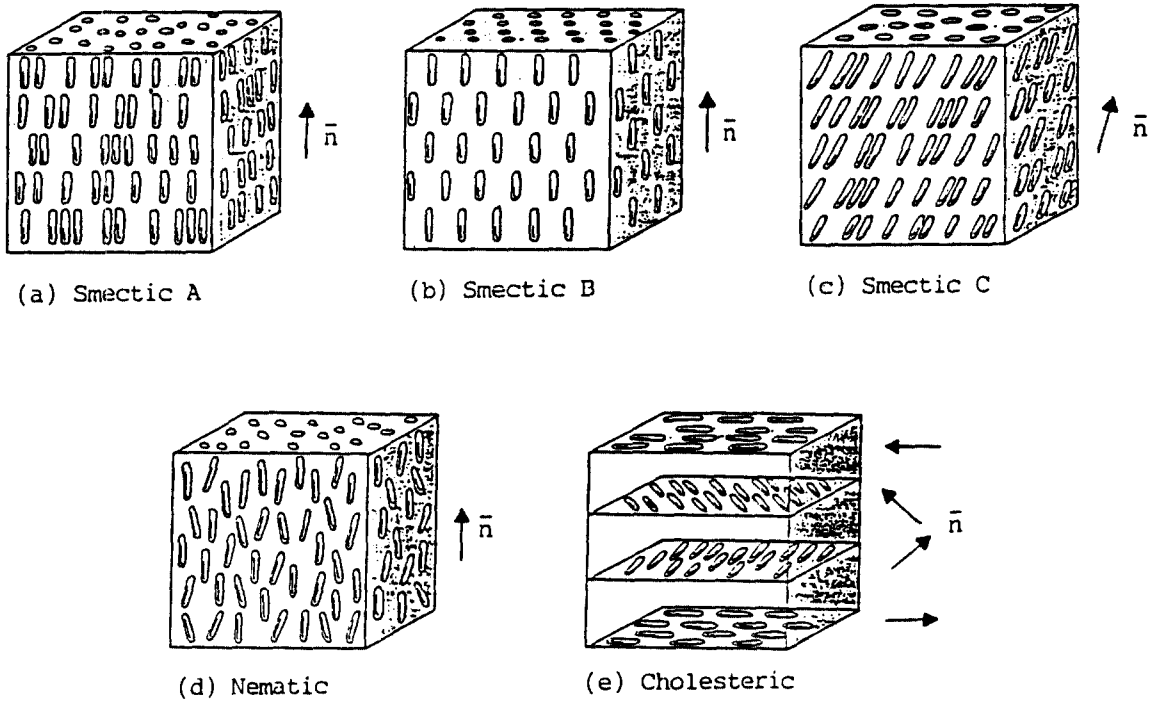


Fig. 1 Thermotropic Liquid Crystal Mesophases

액정이다. Smectic 은 그리스어로 비누인데, 비누와 유사한 기계적 특성을 갖는다. 가장 간단한 형태는 smectic A 이며 director 방향으로 고체이며 director 와 수직방향으로는 유체인 상의 시스템을 나타낸다. Smectic C 는 director 가 밀도 변화 방향과 어느정도 각도로 기울어진 상이다. 평면구조의 유체가 상호작용에 의해 특정한 방향으로 배열하면 Smectic A 나 Smectic C 형태의 3차원 액정이 만들어진다. Chandrasekhar 와 그의 동료들은 [3,4] 디스크 모양의 분자들이 nematic 형의 배열을 갖는것을 발견하였다. 이들은 Discotic 액정이라 불리며 Fig. 3과 같이 기둥구조의 액정형태를 갖는다.

층상 구조를 갖는 액정의 유탄제 사용 가능성은 많은 사람들에게 인정되어왔다. 예로, Oswald 와 Kleman [5]은 고전적 유탄제론을 액정의 smectic 에 적용하였다. 최근에 액정이 유탄분야에서 관심을 끄는 것은 세라믹 엔진과 같은 고온 디젤 엔진의 개발에 따른 고온용 유탄제 개발에 따른다. [6] 고온 디젤 엔진의 작동온도는 1000°C 정도로

극한 유탄제 조건에 속한다. 기존의 유기 유탄제는 300°C 이상에서는 decompose 를 한다. 결국, 이 조건에 맞는 유탄제 개발이 세라믹 엔진의 성공여부를 좌우한다. 위에서 보인것과 같이, 액정은 특히 director 방향으로 고체이며 director 수직방향으로 유체인 smectic 상에서 유탄적으로 알맞은 구조를 갖는다. 만약 이 구조가 접촉부위에서 유지되면 액정은 하중 방향으로 고체이고 전단방향으로는 유체인 완벽한 유탄제가 될 것이다. 더우기, 액정의 상온 온도로 유지된다. 만약 높은 상전이온도를 갖는 액정을 합성하면 이 액정은 세라믹 엔진에 쓰일 수 있는 고온 유탄제가 될 수 있다. 이와같은 이유로 액정의 유탄상태하중, 하중과 전단을 동시에 받을때의 마찰력 및 유막두께를 측정하여 액정의 유탄제 응용 가능성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

액정의 유탄제 성능 실험은 기존의 액체 유탄제와 비교하기 위하여 탄성유체유탄(EHL) 영역하

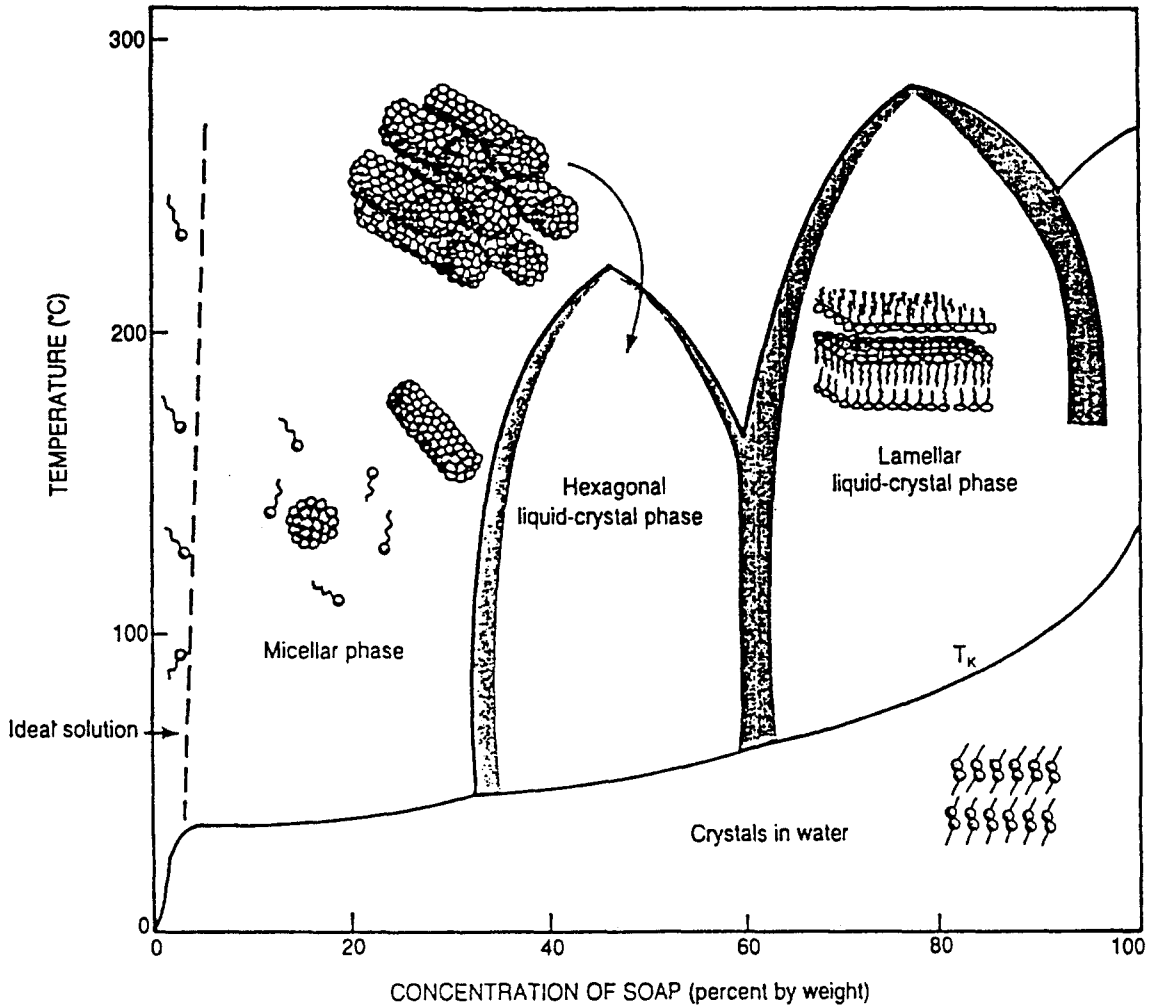


Fig. 2 Lyotropic Phase Diagram

에서 실험을 행하였다. 탄성유체실험은 Fig. 4에 나와있는것과 같이 Cameron이 만든 볼/평면의 점 접촉 장치를 이용하였으며 [7,8] 마찰력과 유막두께를 동시에 측정하였다. EHL 실험장치는 접촉 Simulation 장치, 구동 및 속도 조절 장치, 마찰력 측정 장치 및 공간섭무늬 측정장치들로 구성된다. EHL 접촉은 Fig. 4와 같이 직경 57.2mm의 스테인레스 스틸볼과 사파이어 윈도우가 구성하며 사파이어 윈도우는 평행이동이 가능한 윗판에 고정되어 있다. 스테인레스 스틸볼은 가변속 전기 모터에 의하여 구동되며 볼의 회전에 따라 윤활제가 EHL 접촉부위에 삽입되어 유막을 형성

한다. 윗판의 한쪽 끝에는 dead weight를 사용하여 접촉면에 하중을 가한다. 따라서, 속도와 하중에 따른 유막두께 및 마찰력 측정이 가능하다.

마찰력은 평행이동이 가능한 윗판에 리프스프링 형태의 스트레인 게이지를 사용하여 측정하며 스트레인 게이지에서 나온 전기량을 정적 Calibration에 의하여 환산한다. 유막두께는 광간섭현상을 이용하여 측정하며 측정가능한 콘트라스트를 주기 위하여 사파이어 윈도우 윗면은 비반사 코팅, 밑면은 100 Å 정도 두께의 크로미움 코팅을 하였다. 유막두께는 간섭무늬, 즉 뉴우튼링의 중앙 간섭무늬의 명암변화를 관찰하여 측정하며 명암 변화는 $\lambda/4 \mu$ 에 해당되는 길이의 변화로 환산된다. 여기서 λ 는 입사광선의 파장이고, μ 는

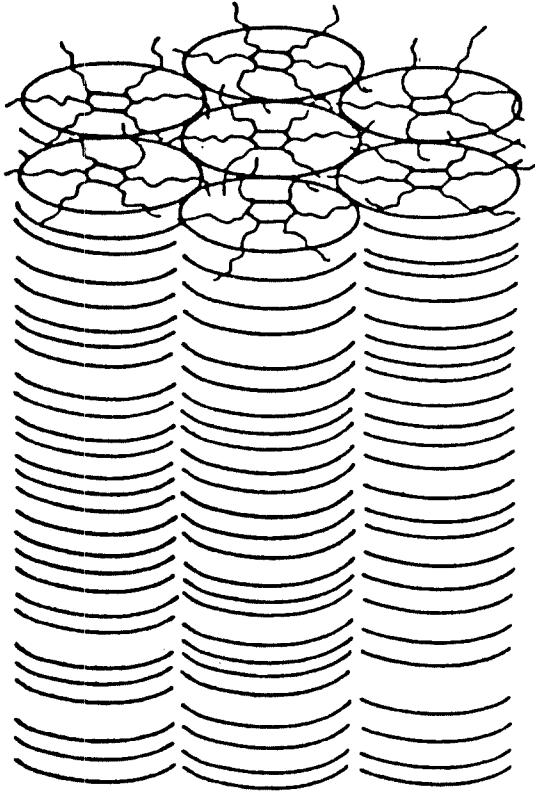


Fig. 3 Discotic Liquid Crystal

운활제의 굴절률이다. 입사광선으로는 할로겐 램프의 백색광을 사용하였고, 필터를 사용하여 빨강(6330 Å)과 녹색(5890 Å)의 단색광으로 만들어서 측정에 사용하였다.

본 실험에서는 K 24 (Octyl Phenyl Cyanide)의 액정이 사용되었는데 그 이유는 K 24가 Nematic 상과 등방성 액체상의 천이온도가 40°C로써 실온에서 온도유지장치가 없이 Nematic 상을 유지하는 액정인 점이다. 또한, ISO VG 68 그레이드의 비교적 낮은 점도 (Kinematic Viscosity = 65 cS at 40°C, 8.5 at 100°C, VI = 107, Specific Gravity = 0.870)를 갖는 상업용 광유를 같은 조건에서 측정하여 기존운활제와 액정을 비교하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 액정의 낮은 점도를 고려하여 비

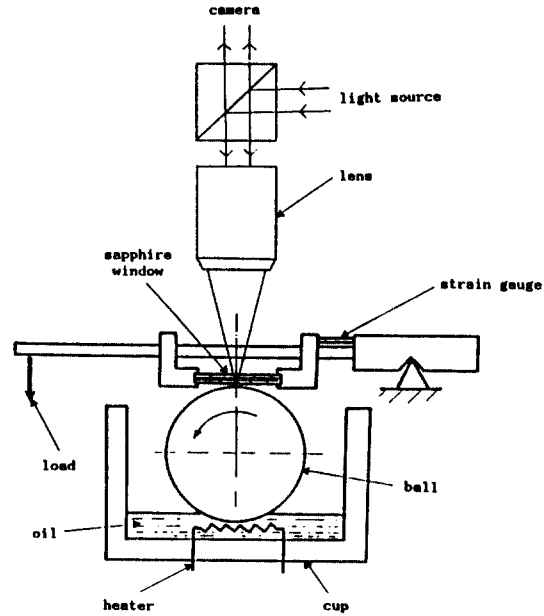


Fig. 4 EHD Ball / Plate Contact

교적 낮은 하중을 적용 최대 Hertz 압력을 0.56 GPa로 제한하였다. 액체 운활제의 탄성유체운활 상태하에서 마찰력은 Fig. 5와 같이 속도에 따라 감소하며 하중에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보였다. K 24 액정은 같은 조건에서 마찰력이 하중에 따라 증가는 하였지만 측정 속도 범위내에서 처음에는 급격히 감소하다가 곧 일정한 값을 가졌다. (Fig. 6) 이 현상은 분명히 액정과 기존 액체 운활제가 다른 특성을 갖고 있음을 나타낸다. 더우기 액정의 마찰력이 비교적 낮은 점도를 갖는 상업용 액체 운활제의 절반 정도로 측정되었다.

마찰력 측정과 함께 탄성유체 운활제의 유막두께 측정을 병행하였는데 액정의 유막두께는 정지부터 시작하여 측정 속도 범위내에서는 일정한 값을 갖는 것으로 측정되었다. 탄성 유체 운활시 유막두께는 앞에서 언급한 바와같이 간섭무늬, 즉 Newton Ring의 명암 변화를 관찰하여 측정하는데 액정의 경우 정지시의 간섭무늬가 속도의 증가에도 같은 모양을 유지하여 간섭무늬의 변화가 없었는데 이는 유막두께가 일정함을 나타낸다. 액체 운활제의 유막두께는 Fig. 7과 같이 일반적으로 속도 증가에 따라 두꺼워지고 하중의 증가에 따라

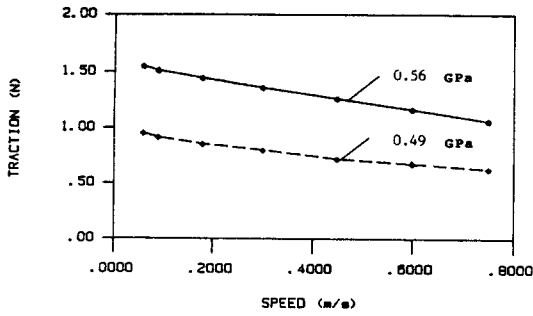


Fig. 5 EHD Traction of ISO VG 68 Lubricant at Various Max. Hertzian Pressures

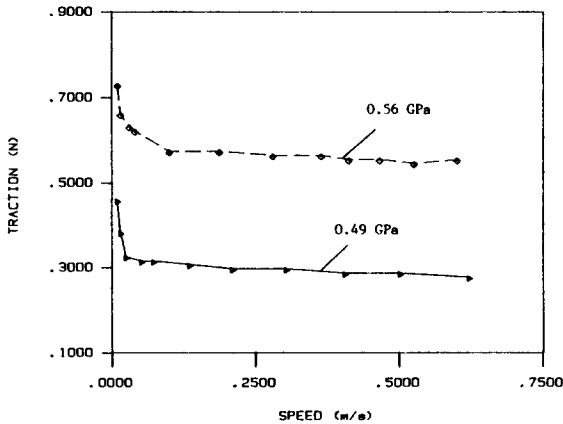


Fig. 6 EHD Traction of K24 Liquid Crystal at Various Max. Hertzian Pressures

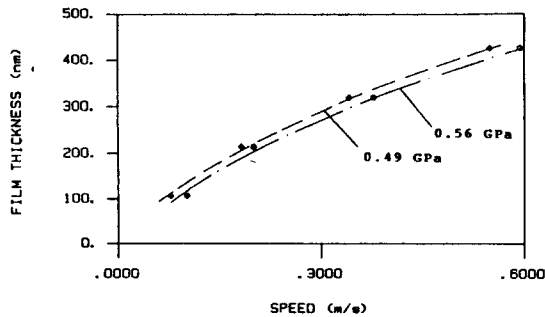


Fig. 7 EHD Film Thickness of ISO VG 68 Lubricant at Various Max. Hertz Pressures

않아진다.

여기서 고려해야 할 사항은 액정과 액체 윤활제의 접촉부위로의 윤활제 공급의 차이이다. 액체 윤활제는 oil bath에 1/3정도 잠겨있는 볼의 회전에 따라서 윤활제의 점도에 의하여 접촉부위에 끌려 들어간다. 이와달리 액정의 경우는 액정이 볼 표면에서 미끄러지지 않도록 surfactant가 먼저 칠해진후 소량의 액정이 접촉부위에 가해진다. 이후에는 더 이상의 액정의 공급이 없고 볼 표면에 액정이 부착되어 윤활제 역할을 한다. 액정은 소량의 윤활제 공급에 의한 윤활제 유입 영역에서의 starved 조건에도 불구하고 액체 윤활제와는 달리 [9] 작은 마찰력을 나타냈다.

액정의 일정한 유막두께는 일정한 마찰력 현상과 관계있는 것으로 사료된다. 또한 액정의 마찰력은 비교적 낮은 점도를 갖는 상업용 액체 윤활제의 절반인 것으로 측정되었다. 작은 마찰력은 얇은 유막두께를 나타낸다는 실험 [10]을 근거로 하면 특별히 작은 마찰력은 액정이 아주 작은 유막두께를 갖는다고 결론지을 수 있다. 이와함께 작은 유막두께는 좋은 Fuel Economy를 의미하므로 [10] K24 액정은 아주 우수한 Fuel Economy를 갖는 윤활제임을 보였다.

사실, 액정은 윤활 측면에서 긍정적 및 부정적 측면을 모두 가지고 있다. [11] 긍정적인 면은 액정이 층간에 약한 전단력을 갖는 층상구조를 가지며 층들과 수직되는 방향으로 고체가 갖는 탄성 및 하중지지능력을 가지고 있는 점이다. 또 액정의 물성치는 전자기장, 압력, 온도에 따라서 바뀌어질수있고 액정구조에 따른 진류막을 형성할 수 있다. 본 연구에서도 볼 표면에 막을 형성한 액정은 마찰력 감소를 통한 윤활작용을 나타내고 있다. 반대로 부정적인 면은 액정구조가 제한된 온도 영역에서 유지가 되며 유동시 불안정하다는 점이다. 전단력을 받을 때 액정이 층상구조를 유지하는지는 앞으로의 연구과제이다. 탄성유체윤활의 접촉면은 높은 압력을 받을 뿐 아니라 마찰열에 의한 온도 상승 효과를 갖는다. 또 매우 심한 전단력을 갖는데 이때의 액정은 어떠한 상(phase)으로 존재하는지 알려져 있지 않지만 비교적 적은 하중 하에서는 작은 마찰력을 갖는 윤활제로서의 가능성을 나타낸다. 더우기 접촉면 주위의 액정은 액체 윤활제와는 달리 흘러내리지 않고 감싸고 있

어 sealing 효과를 갖는 것이 관찰되었다. 이는 액정이 윤활제의 역할뿐만 아니라 sealing 효과를 병행하여 특수한 목적의 Grease를 대신할 수 있는 가능성이 있는 윤활제로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰력과 유막두께를 측정하여 액정의 윤활제 응용가능성에 대해서 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 비교적 작은 하중에서 액정의 마찰력은 기존의 윤활제보다 무척 감소하였고, 측정 속도내에서는 속도와 상관없이 일정하였다.

2. 액정은 전단력을 받지 않는 경우 액정상을 유지하며 접촉 부위 주위를 감싸고 있어 접촉부위 윤활제를 sealing 하는 효과를 가졌다.

3. 탄성 유체윤활 영역과 같이 집중하중을 받을 시 매우 작은 액정의 유막두께는 접촉표면의 조도가 클 경우에는 마모의 증가가 예상되며 이 연구결과에서 보면 액정은 Journal Bearing 즉 purely hydrodynamic 영역의 윤활상태에서 쓰여지는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 실제 액정의 Smectic이나 Nematic 상 구조의 전단력, 온도 및 압력에 관한 더 많은 연구가 필요하지만 본 연구에서는 액정이 '가능성'을 가지고 있음을 밝혔다.

참 고 문 헌

- 1) W. H. De Jeu, Physical Properties of Liquid Crystalline Materials, Gordon and Beach Science Publishers, New York (1979)
- 2) J. D. Lister and R. J. Birgeneau, "Phases and Phase Transitions," Phys. Today, 35, 5, pp 26-33 (1982)
- 3) S. Chandrasekhar, B. K. Sadashiva, K. A. Suresh, N. V. Madhusudana, S. Kumar, R. Shashidher and G. Venkatas, J. Phys. (Paris), 40, C3-120 (1979)
- 4) S. Chandrasekhar, "Liquid Crystals of Discrete-like Molecules," Advances in Liquid Crystals, 5. pp. 47-78 (1982)
- 5) P. Oswald and M. Kleman, "physics of Fluids-Lubrication Theory of Smectic A Phases," C. R. Acad. Sc., Paris, t. 294, pp. 1057-1060 (10 May, 1982)
- 6) S. Jahanmir, "Future Directions in Tribology Research," Trans. ASME, J. of Tribology, Vol. 109, pp. 207-214 (1987)
- 7) R. Gohar and A. Cameron, "The Mapping of Elastohydrodynamic Contacts," ASLE Trans., 10, pp. 215-225 (1967)
- 8) J. L. Lauer, L. E. Keller, F. H. Choi and V. W. King, "Alignment of Fluid Molecules in an EHD Contact," Trans. ASLE, 25, 3, pp. 329-336 (1982)
- 9) L. D. Wedeven, "Traction and Film Thickness Measurements Under Starved Elastohydrodynamic Conditions," ASME Trans., J. of Lub. Tech., 97, pp. 321-329 (1975)
- 10) J. L. Lauer and Y. J. Ahn, "Lubricants and Lubricant Additives under shear studies under Operating Conditions by Optical and Infrared Spectroscopic Methods," Trans. ASLE, Preprint No. 87-AM-3D-2 (1984)
- 11) F. E. Lockwood and M. T. Benchaita, "Study of Lyotropic Liquid Crystals in Contact," ASLE Trans. Vol. 30, 4, pp. 539-548 (1987)