

액정의 운활재 응용가능성 연구

과학기술원 기계운활연구실 안 영 재

* 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 Cp 이며 점도가 낮은 기계류 운활유에 해당한다. 이방성의 특징은 분자들의 긴 간격의 배열에 기인되며 광학적 birefringence 로 쉽게 나타나진다.

액정은 1888년 독일의 Reitzer 에 의해 발견되었다. Reitzer 는 용융된 cholesteryl acetate 또는 benzoate 가 냉각될때의 상변화에 따른 색변화를 관찰하여 고체와 액체사이의 또 다른 상의 존재를 확인하였다. 액정은 긴 역사에도 불구하고 대중에게 알려지지 않았다. 최근 전자산업의 발달과 함께 LCD (Liquid Crystal Display) 의 발명은 액정의 유용성을 인식시켰고 이의 응용확대를 가져왔다. 액정의 배열은 분자간의 미세한 힘의 균형에 기인한다. 약한 전기장과 같은 외부의 자극은 액정 분자를 재배열시키며 물성치의 변화를 준다. 이와같은 배열변화에 따른 광학적 성질의 변화가 LCD의 기본원리이다. [1, 2] 전기장에 의한 분자 재배열은 Fig.1 에 나와있다. 굴절률의 변화는 일반적으로 0.05 - 0.25 정도이며 absorption, reflection, scattering 특성 및 색깔이 변화를 수반한다.

액정은 세가지 형태로 나누어진다. Thermotropic 액정은 순수화합물이나 균질한 혼합물에서 관찰되는데 온도의 변화에 따라 상이 변화한다. 일반적으로 이 액정은 nematic, cholestric, 그리고 smectic 상으로 구분되며 Fig.2 에 나타나 있다. Lyotropic 액정은 비누와 같은 amphiphilic 분자들이 물과같은 적당한 용매에 용해할때 나타난다. 이 액정은 Thermotropic 액정과 달리 농도가 상을 결정하는 주요한 변수이다. Polymer 용액은 액정배열을 가지며 Polymeric 액정이라고 불린다. 지금까지 액정에 관해 알려진 지식은 thermotropic 액정에 관한 것이며 여기서는 이 액정에 관해서만 기술한다 [3].

Nematic 은 가장 단순한 상으로 한 방향의 분자 배열만을 가진다. nematic 은 그리스어로 실을 의미한다. 알려진 모든 nematic 은 한 대칭축 (director), n , 을 가지며 강한 광학적 이방성을 동시에 갖는다. 빛을 심하게 scattering 을 하기때문에 nematic 은 혼탁하게 보인다. 한 방향의 분자배열을 갖는 또 다른 thermotropic 상은 chiral 분자에 의해서 만들어 진다. 이는 cholestric 상으로 nematic 상과 동일하지만 director 가 가시광선의 파장에 상응하는 간격을 가지며 틀어져있다. 틀림에 의한 굴절률의 변화는 Bragg scattering 에 의하여 여러가지 색깔로 나타나며, cholestric 상이 가장 아름다운 액정상임을 보여준다. 온도에 따른 색깔 변화로의 응용이 가능한 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 만들어 진다. Chandrasekhar 와 그의 동료들은 [4,5] 디스크 모양의 분자들이 nematic 형의 배열을 갖는것을 발견하였다. 이들은 Discotic 액정이라 불리며 Fig.3 과 같이 기둥구조의 액정형태를 갖는다.

액정이 윤활분야에서 관심을 끄는 것은 세라믹 엔진과 같은 고온 디젤엔진의 개발에 따른 고온용 윤활제 개발에 따른다 [6]. 고온 디젤엔진의 작동온도는 1000° C 정도로 극한 윤활조건에 속한다. 기존의 유기 윤활제는 300° C 이상에서는 decompose 를 한다. 결국, 이 조건에 맞는 윤활제 개발이 세라믹 엔진의 성공여부를 좌우한다. 위에서 보인것과 같이, 액정은 특히 director 방향으로 고체이며 director 수직방향으로 유체인 smectic 상에서 윤활적으로 알맞는 구조를 갖는다. 만약 이 구조가 접촉부위에서 유지되면 액정은 하중 방향으로는 고체이고 전단방향으로는 유체인 완벽한 윤활제가 될 것이다. 더우기, 액정의 상은 온도로 유지된다. 만약 높은 상 천이온도를 갖는 액정을 합성하면 이 액정은 세라믹 엔진에 쓰일 수 있는 고온 윤활제가 될 수 있다. 이와같은 이유로 액정의 윤활상태하 즉, 하중과 전단을 동시에 받을때의 마찰력 및 유막두께를 측정하여 액정의 윤활제 응용 가능성을 연구하였다.

* 실험장치

측정은 Fig.4 와 같은 Cameron 형의 볼/평면 탄성유체 윤활실험장치를 이용하였다 [7]. 가변속 전기 모터에 의해 구동되는 직경 57.2mm 의 스테인레스 스틸볼과 평행으로 이동이 가능한 윗판에 끼워진 사파이어 윈도우가 탄성유체윤활 접촉면을 구성하며 윗판의 한쪽끝에 무게를 가하면서 하중을 걸어준다. 윤활제는 볼의 회전에 따라서 접촉면으로 삼입되며 윈도우와 윗판사이에 설치된 리프 스프링의 스트레인 게이지를 통하여 마찰력을 측정한다. 유막은 광학 간섭에 의해서 측정되며 콘트라스트를 주기 위해서 사파이어 윈도우의 윗면은 비반사, 밑면은 크롬 코오팅이 되었다. 유막두께는 뉴우톤 링의 중앙 간섭무늬의 밝기 변화가 $\lambda/4\mu$ 에 해당하는 길이변화로 연관되어 측정된다. 여기서 λ 는 입사광선의 파장이고 μ 는 윤활제의 굴절률이다. 입사광선으로 빨강(6328Å) 과 녹색(5893Å) 의 두 가지광선이 사용되었다.

본 실험에서는 K24 (Octylphenyl Cyanide) 액정이 사용되었는데 그 이유는 Nematic 과 등방성 액체상의 천이온도 40° C 로써 실온에서 온도유지 장치 없이 우리가 원하는 구조를 갖는 액정인 점이다. 또한, ISO VG68 그라이드의 비교적 낮은 점도를 갖는 광유를 동시에 같은 조건에서 측정하여 기존 윤활제와 액정을 비교하였다.

* 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 액정은 낮은 점도를 고려 비교적 낮은 하중을 적용하였는데 최대 Hertz 압력을 0.56 GPa로 제한하였다. 액체 윤활제의 탄성유체 윤활 상태하에서 마찰력은 Fig.5 와 같이 속도의 증가에 따라 감소하는 일반적 경향을 보인다. K24 액정의 같은 조건에서 마찰력은 이와달리 처음에 급격히 감소하고 그후 측정 속도 범위내에서 일정한 값을 갖는다 (Fig.6). 이 현상은 분명히 액정과 기존 액체 윤활제가 다른 특성을 갖고 있음을 의미한다.

마찰력 측정과 함께 탄성유체 윤활하의 유막두께 측정을 병행하였는데 액정의 유막두께는 정지부터 시작하여 측정 속도 범위내에서는 일정한 값을 갖는 것으로 측정되었다. 탄성 유체 윤활시 유막두께는 앞에서 언급한 바와같이 간섭무늬, 즉 Newton Ring 의 명암 변화를 관찰하여 측정하는데 액정의 경우 간섭무늬의 변화를 발견할 수 없었다. 액체 윤활제의 유막두께는 일반적으로 Fig.7 과 같이 속도와 함께 증가하며 하중의 증가에 감소한다.

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 8 을 근거로 하면 특별히 작은 마찰력은 액정이 아주 작은 유막두께를 갖는다고 결론지을 수 있다. 이와함께 작은 유막두께는 좋은 Fuel Economy 를 의미하므로 [8] K24 액정은 아주 우수한 Fuel Economy 를 갖는 윤활제임을 보였다.

끝으로 한가지 부언할 것은 액정과 액체 윤활제의 접촉부위의 윤활제 공급의 차이이다. 액체 윤활제는 oil bath 에 1/3 정도 잠겨있는 볼의 회전 에 따라서 윤활제의 점도에 의하여 접촉부위에 끌려 들어간다. 이와달리 액정의 경우는 액정이 볼표면에서 미끄러지지 않도록 surfactant 가 먼저 칠해진 후 소량의 액정이 접촉부위에 가해진다. 이후에는 더이상의 액정의 공급이 없고 볼 표면에 액정이 부착되어 윤활제 역할을 한다. 탄성 유체 윤활의 접촉면은 높은 압력을 받을뿐 아니라 마찰열에 의한 온도 상승 효과를 받는데 이때의 액정은 어떤 상에 있는지 알려져 있지는 않으나 작은 마찰력은 액정의 윤활제로서 가능성을 의미한다. 더우기 접촉부위의 주위의 액정은 Smectic 상을 유지하여 접촉부위내의 액정 윤활제를 Sealing 하는 효과를 갖는 것이 관찰되었다. 다시말해서 액정은 윤활제의 역할뿐만 아니라 Sealing 효과를 병행하여 특수한 목적의 경우 Grease 를 대신할 수 있다고 사료된다.

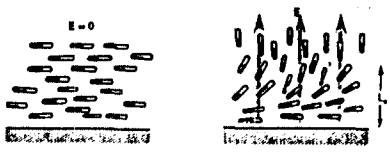
* 결 론

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

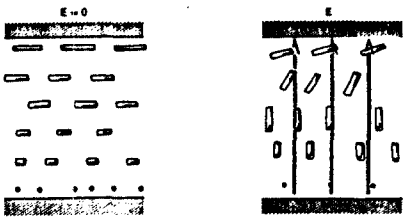
1. 비교적 작은 하중에서 액정의 마찰력은 기존의 윤활제보다 무척 감소하였고 측정 속도내에서는 속도와 상관없이 일정하였다.
2. 액정은 전단력을 받지 않는 경우 액정상을 유지하여 접촉부위 윤활제를 sealing 하는 효과를 갖았다.
3. 탄성 유체윤활 영역과 같이 집중하중을 받을시 매우 작은 액정의 유막두께는 접촉표면의 조도가 클 경우에는 마모의 증가가 예상되며 이 연구결과에서 보면 액정은 Journal Bearing 즉 purely hydrodynamic 영역의 윤활상태에서 쓰여지는 것이 바람직하다고 사료된다.
4. 실제 액정의 Smectic 이나 Nematic 상 구조의 전단력, 온도 및 압력에 관한 더 많은 연구가 필요하지만 본 연구에서는 액정이 '가능성' 을 가지고 있음을 밝혔다.

[References]

1. F.J. Kahn, "The Molecular Physics of Liquid Crystal Devices," *Phys. Today*, 35, 5, pp66-74 (1982)
2. J.W. Goodby, "Optical Activity and Ferroelectricity in Liquid Crystals," *Science*, Vol.231 pp350-355 (1986)
3. J.D. Lister and R.J. Birgeneau, "Phases and Phase Transitions," *Phys. Today*, 35, 5, pp26-33 (1982)
4. 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)
5. S. Chandrasekhar, "Liquid Crystals of Discrete-like Molecules," *Advances in Liquid Crystals*, 5, pp47-78 (1982)
6. S. Jahanmir, "Future Directions in Tribology Research," *Trans. ASME, J. of Tribology*, Vol.109, pp207-214 (1987)
7. 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, pp329-336 (1982)
8. J.L. Lauer and Y.J. Ahn, "Lubricants and Lubricant Additives under shear studied under Operating Conditions by Optical and Infrared Spectroscopic Methods," *Trans. ASLE*, Preprint No.87-AM-3D-2 (1984)



Orientation of liquid-crystal molecules by an electric field. In the absence of a field the molecules align along the substrate; in a field applied normal to the substrate, the bulk of the molecules align with the field, but the molecules at the boundary retain their alignment. The thickness of the boundary layer, L_b , depends on the field strength.



Response of a tilted nematic liquid crystal to an applied field. At zero field the molecules are aligned parallel to the boundary planes, but with a twist imposed by the orientation of the planes (a). In the presence of an electric field (colored arrows), the molecules in the interior line up along the field (b); there is a finite threshold voltage, below which the correlation length L_c (Figure 2) is larger than the thickness. The normal state (a) is optically active, retaining the optical polarization 90°; the aligned state (b) is not optically active.

Figure 1 Orientation of Molecules

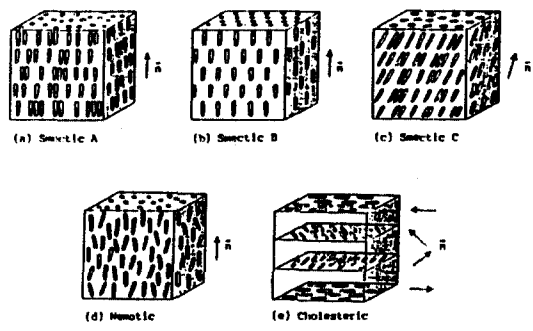


Figure 2 Thermotropic Liquid Crystal Mesophases

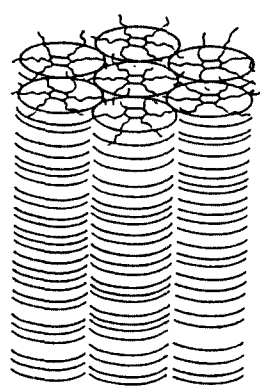


Figure 3 Discotic Liquid Crystal

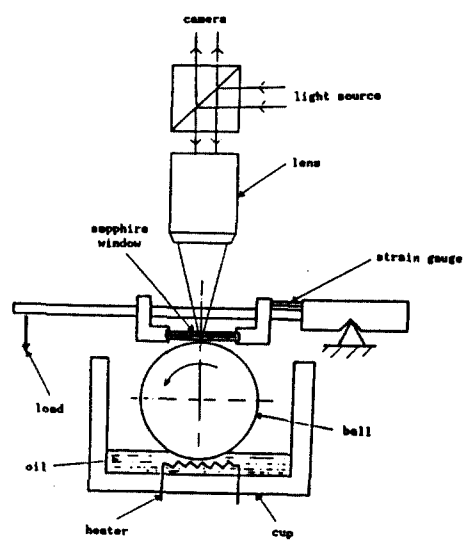


Figure 4 EHD Ball/Plate Contact

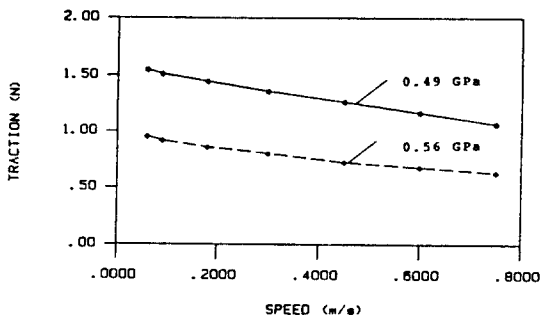


Figure 5 EHD Traction of ISO VG 68 Lubricant at Various Max. Hertzian Pressures

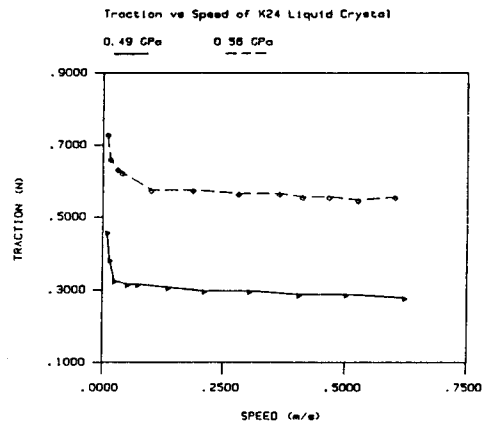


Figure 6 EHD Traction of K24 Liquid Crystal at Various Max. Hertzian Pressures

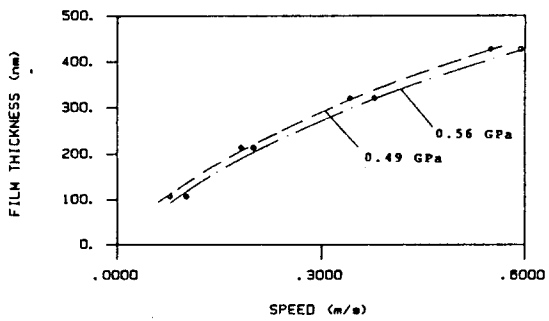


Figure 7 EHD Film Thickness of ISO VG 68 Lubricant at Various Max. Hertz Pressures