

탄성 유체 윤활에서의 액정의 마찰 특성 및 유막두께

이 희 성[†]

한국철도기술연구원

Frictional Behavior and Film Thickness of Some Liquid Crystals in Elastohydrodynamic Lubrication

Hisung Lee[†]

Korea Railroad Research Institute

Abstract – The tribological properties of eight different liquid crystals were investigated in a concentrated point contact device and a ball-on-flat contact. For comparison, the same tests were also performed with commercial greases and the corresponding base oils. Under the fully flooded conditions studied, liquid crystals in a concentrated point contact showed lower friction than commercial greases and greater film thickness dependence on rolling speed than grease base oils or greases. Test results also showed that the film thickness and friction were little influenced by the composition of the examined liquid crystals.

Key words – liquid crystals, EHL, concentrated point contact device, ball-on-flat contact, DBSA.

1. 서 론

지난 몇 년동안 액정(liquid crystal)을 새로운 윤활제로 사용하고자 하는 관심이 점점증하고 있다[1-5]. 이에 따라 본 연구에서는 대표적인 액정의 트라이볼로지적 특성 및 윤활제로의 사용 가능성 여부를 조사하기 위해서, 탄성 유체 윤활 조건하에서 8종류 액정과 그리스(grease) 및 윤활기유(base oil)의 마찰특성을 윤활제가 충분한 상태(fully-flooded conditions)와 혼합윤활상태(mixed film conditions)에서 비교 검토하였다. 이때 윤활제가 충분한 상태에서 마찰계수를 측정하기 위해서는 점접촉 소형시험기를 이용하여 하중과 상대 미끄럼 속도비(slide-roll ratio)를 변화시켜 가면서 수행하였고, 혼합윤활상태에서 평균마찰계수를 측정하기 위해서는 ball-on-flat형 마찰시험기를 사용하여 하중과 미끄럼속도(sliding speed)를 변화시켜 가면서 수행하였다.

탄성 유체 윤활 조건하에서 상대운동(굴림과 미끄럼)을 하는 2개의 접촉면의 유막두께는 공간섭법에 의한 계측 장비를 사용하여 측정하였다. 윤활제가 충분한 상

태의 경우에 마찰력은 전적으로 윤활제의 리올로지(rheology)적 특성에 따라 결정되며, 또한 윤활제에 의해서 유막이 완전히 유지되지 않고 일부 상대 접촉이 발생하는 혼합윤활상태의 경우에 마찰력은 윤활제의 리올로지 특성과 상대 접촉면의 특성에 따라 결정된다. 따라서 본 연구에서는 8종류의 액정에 대한 마찰력 및 유막두께 특성을 비교하여 윤활제로서의 사용 가능성을 관찰하였다.

2. 시험방법

2-1. 시편

본 시험에 사용된 윤활제는 액정 재료로서 DBSA, TEA, Glycerol의 상대적인 함량을 변화시켜서 8종류의 비수용성 라이오토트로픽(lyotropic) 액정 윤활제를 제작하였으며, 시험에 사용된 시편의 구체적인 조성은 Table 1에 나타내었다.

2-2. 시험장치 및 방법

탄성 유체 윤활 조건하에서 Fig. 1에 제시된 점접촉 소형시험기(concentrated contact simulator)[6]를 사용하

[†]주저자 · 책임저자 : leehs@krii.re.kr

Table 1. Liquid crystal compositions, % (w/w)

I.D.	DBSA ^a	TEA ^b	Glycerol
LC 1	62.0	33.6	4.0
LC 2	59.85	35.15	5.0
LC 3	63.24	29.76	7.0
LC 4	58.5	31.5	10.0
LC 5	59.16	27.84	13.0
LC 6	61.0	39.0	-
LC 7	65.0	35.0	-
LC 8	68.0	32.0	-

a. DBSA : Dodecylbenzene Sulfonic Acid

b. TEA : Triethanol Amine

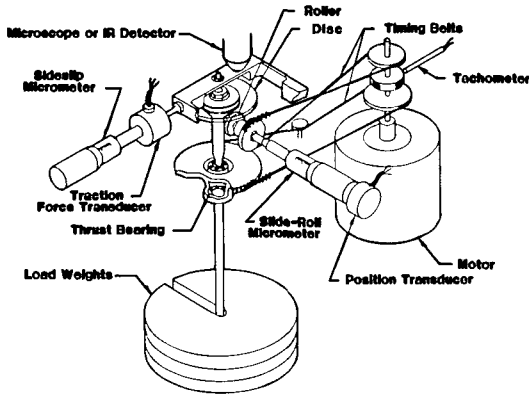


Fig. 1. Schematic diagram of concentrated contact simulator.

여 액정재료의 마찰력 및 유막두께를 측정하였다. 위의 소형시험기에서 접촉면의 형상과 관련된 타원율(elliptic ratio), K 는 운동방향측 접촉길이에 대한 운동방향 직각측 접촉길이의 비이며, 로울러는 크라운 반경에 따라 0.3에서 4까지 변화한다. 본 시험에 사용된 모든 데이터는 $K=1$ 인 경우이다. 고정된 사파이어 디스크에 대해서 강제 로울러는 점접촉을 한 상태에서 단상 가변속 모터 작동에 의해서 타이밍 벨트로 구동된다. 이때 디스크와 로울러의 접촉점이 디스크 반경 방향으로 이동함에 따라, 디스크 표면속도가 변화하게 되고 결국 상대미끄럼속도비(slide-roll ratio)도 변화한다. 상대미끄럼속도비는 상대 접촉면의 미끄럼속도 차이를 평균속도로 나눈 값, $\Sigma = (u_2 - u_1) / \bar{u}$, $\bar{u} = 1/2(u_2 + u_1)$ 이다. 디스크와 로울러사이의 측면 미끄럼(side-slip)각, θ 는 로울러 축에 평행한 선과 디스크의 회전축과 접촉점을 연결한 선 사이의 각이며, 본 시험에서 사용된 모든 데이터는 $\theta=0$ 인 경우이다. 또한 접촉하중은 무

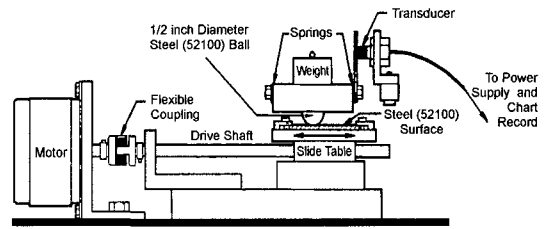


Fig. 2. Schematic diagram of sliding "mixed film" apparatus.

계추의 회전을 방지하는 트러스트 베어링을 통해서 가한다. 마찰력 측정은 1 GN/m의 강성, 10 kHz의 주파수 범위, 0.01 N의 해상도를 가진 압전형 하중센서(piezoelectric transducer)를 사용한다.

또한 소형 시뮬레이터의 한쪽면은 사파이어로 투명하므로 광간섭법(optical interferometry technique)으로 탄성유체윤활조건하에서 접촉점의 유막두께를 측정한다. 이 방법은 현미경을 통해 접촉면에 단색광(monochromatic light), $\lambda=605 \text{ nm}$ 을 투사하여, 띠무늬(Newton's rings)의 명암의 차이를 이용하여 탄성유체윤활의 유막두께를 측정하는 방법이다[7].

Ball-on-flat형 마찰시험기는 Fig. 2에 제시된다. 금속 평면이 구형 금속 볼 밑에서 왕복 미끄럼 운동으로 혼합윤활 조건을 모사하므로, 미끄럼 속도에 따른 혼합윤활상태에서의 마찰력을 측정한다.

3. 시험결과 및 고찰

3-1. 마찰력 측정시험

마찰력 측정 데이터의 일관성을 확보하고 결과에 대한 비교 기준을 설정하기 위해서 문헌[8]에 제시된 것과 같이 동일한 운동 및 하중 조건 하에서 그리스 및 윤활기유의 마찰계수를 점접촉시험기를 사용하여 측정하였다. Table 2에 제시된 것과 같이 2가지 다른 시험에서 측정된 마찰계수의 차이가 10% 미만으로 측정값의 재현성(repeatability)은 만족할 만하였다. 이에 따라 윤활기유, 글리세롤(glycerol) 및 8종류의 액정에 대해 상대미끄럼속도비 변화에 따른 마찰력을 측정하였다. 모든 측정은 상온(21°C)에서 행해졌으며, 대표적인 결과가 Fig. 3에 제시되었고, 그 결과들은 Table 2, 3에 제시되었다.

또한, ball-on-flat 형 마찰시험기를 사용하여 측정된 미끄럼마찰 조건에서의 마찰계수를 측정하였고 이는

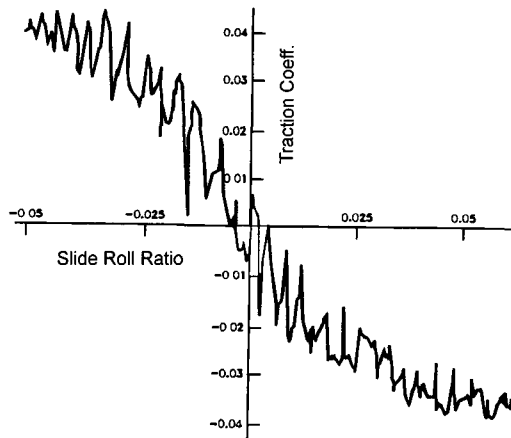


Fig. 3. Traction characteristics of LP7($K=1$, $V=1.8$ m/sec and $P_H=1$ GP_a).

Table 2. Comparison of measured versus published traction coefficients in typical base oils and greases in full film EHD contacts

Material	Velocity (m/sec)	Traction coefficients		
		$P_H=1$ GP _a	$P_H=1.2$ GP _a	$P_H=1.35$ GP _a
Polyurea Base Oil	0.6	0.062 (0.054)		0.072 (0.068)
	1.2	0.056 (0.047)		0.070 (0.062)
	1.8	0.053 (0.041)		0.067 (0.050)
Polyurea Grease	0.6	0.051 (0.042)		0.068 (0.062)
	1.2	0.040 (0.034)		0.062 (0.057)
	1.8	0.032 (0.030)		0.057 (0.052)
Calcium Complex Base Oil	0.6	0.065 (0.055)	0.070 (0.066)	0.071 (0.064)
	1.2	0.058 (0.046)	0.065 (0.059)	0.067 (0.065)
	1.8	0.049 (0.043)	0.061 (0.060)	0.061 (0.063)
Santotrac 50	1.0	0.115($P=1.07$ GP _a) (0.112)		

*Values in parenthesis are from Ref. [8] ($K=1$, $\Sigma=0.05$, $\theta=0.0$ rad)

Fig. 4 및 5에 제시되었다.

Table 2, 3에 따르면 액정의 마찰력은 그리스나 윤

Table 3. Traction coefficients of liquid crystals in full film EHD contacts ($K=1$, $\Sigma=0.05$, $\theta=0.0$ rad)

Material	Velocity (m/sec)	Traction Coefficients	
		$P_H=1$ GP _a	$P_H=1.2$ GP _a
LC 1	0.6	0.011	0.027
	1.2	0.009	0.021
	1.8	0.007	0.014
LC 2	0.6	0.012	0.027
	1.2	0.008	0.026
	1.8	0.007	0.026
LC 3	0.6	0.020	0.033
	1.2	0.012	0.029
	1.8	0.008	0.031
LC 4	0.6	0.014	0.023
	1.2	0.008	0.017
	1.8	0.006	0.024
LC 5	0.6	0.009	0.021
	1.2	0.008	0.018
	1.8	0.006	0.017
LC 6	0.6	0.019	0.020
	1.2	0.010	0.025
	1.8	0.005	0.024
LC 7	0.6	0.014	0.021
	1.2	0.012	0.023
	1.8	0.009	0.036
LC 8	0.6	0.020	0.016
	1.2	0.011	0.020
	1.8	0.010	0.035
Glycerol	0.6	0.005	0.008
	1.2	0.003	0.007
	1.8	0.002	0.006

활기유 보다도 매우 낮았다. 액정의 마찰계수는 굴림 속도가 0.6 m/sec에서 1.8 m/sec로 증가함에 따라 감소하였고, 헤르쯔(Hertz) 압력이 1.0 GP_a에서 1.2 GP_a로 증가함에 따라 증가하였다. 글리세롤의 유무에 따른 액정의 마찰특성의 차이는 크지 않았다.

3-2. 유막두께 측정시험

유막두께 측정 데이터의 일관성 및 결과 비교에 대한 타당성을 확보하기 위해서 우선 그리스에 대한 유막두께를 점접촉 소형시험기를 사용하여 측정하였다. 그리스의 경우는 윤활기유와는 달리 유막두께 측정에 대한 재현성을 확보하는 것이 쉽지 않는데, 이는 그리스의 리올로지적 특성 때문이다. 또한, 점접촉 소형시험기의 경우에 접촉점이 반복적으로 동일 궤도를 통과하므로 윤활제가 접촉부위 밖으로 밀려나가게 된다. 이

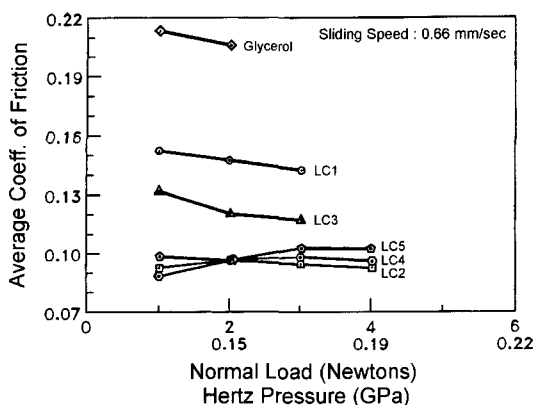


Fig. 4. Average coefficients of friction for the liquid crystals and glycerol in the sliding contact.

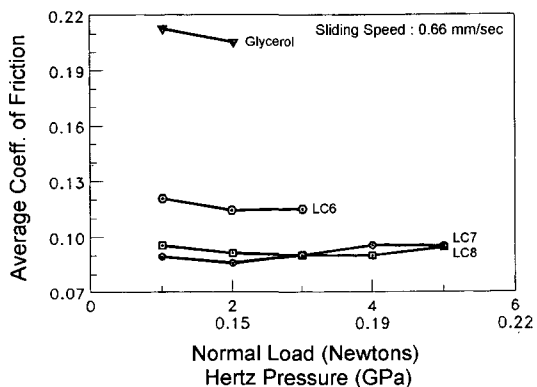


Fig. 5. Average coefficients of friction for the liquid crystals and glycerol in sliding contact.

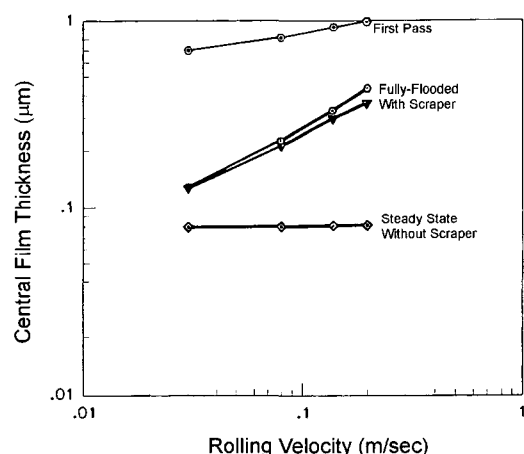


Fig. 6. Film thickness for polyurea grease, $P_H=1 \text{ GP}_a$, typical behavior of grease.

때 액상 윤활제의 경우 표면 장력 및 낮은 점성으로 인해 윤활유가 접촉궤도 안으로 재투입되어서 다음 번 통과 시 접촉부위에서 재차 윤활 작용을 하게 된다. 그러나 본 시험에 사용된 그리스 및 액정의 경우, 높은 점성과 항복응력으로 해서 윤활제가 재투입되는 것이 어려우며, 동일 구간을 반복 통과할 경우 접촉부위에 윤활제가 고갈(starvation)된다. 따라서 윤활제가 충분한 상태(fully-flooded conditions)를 유지시키기 위해서는 윤활제 공급 보조장치(scraper)를 사용하여 접촉 경로에 윤활제를 계속 공급하였다.

시험 중에 윤활제 유입부위의 초승달 모양(inlet meniscus)의 크기가 지속적으로 변하게 되는데, 이는

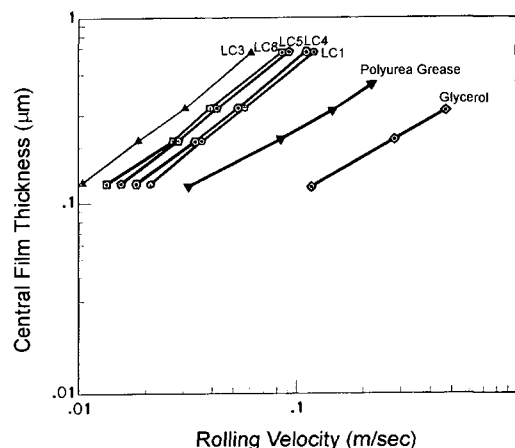


Fig. 7. Film thickness for LC 1, 3, 4, 5 and LC 8, $P_H=1 \text{ GP}_a$, continuous feed with scraper.

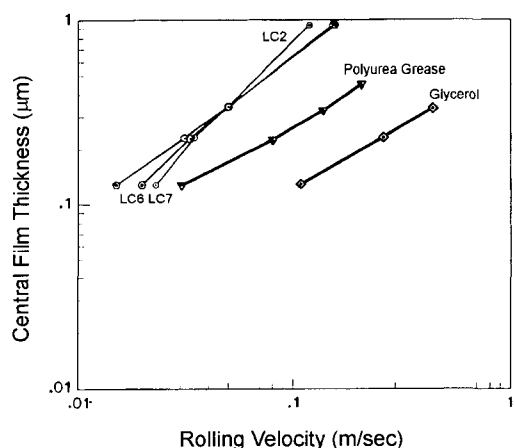


Fig. 8. Film thickness for LC2, 6 and LC7, $P_H=1 \text{ GP}_a$, continuous feed with scraper.

점접촉 소형시험기에 공급하는 윤활제의 양이 충분한 상태를 유지하는 지를 파악하는데 중요한 요소이다. Fig. 6, 7, 8은 그리스 및 액정을 윤활제로 사용하였을 경우 $P_H=1 \text{ GPa}$ 하에서 굴림속도 변화에 따른 유막두께의 변화를 나타내고 있다. 굴림속도에 따른 유막두께 변화는 오일 및 그리스에 비해서 액정에서 크게 나타났다.

4. 결 론

1. 본 시험에 사용된 액정은 특히, 굴림 접촉 면에서 그리스에 비해 상대적으로 마찰력이 적게 나타났다.
2. 굴림속도에 따른 유막두께 변화는 오일 및 그리스에 비해 액정이 더 크게 나타났다. 그러나 액정 및 그리스 모두가 접촉점에서 윤활제가 고갈(starvation) 되었다.
3. 액정의 화학적 조성 변화는 어떤 방식으로든 마찰력 및 유막두께에 크게 영향을 미치지 않았다.
4. 액정의 마찰특성 및 유막두께는 액정이 윤활제로 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다. 그러나 액정이 윤활제로 사용될 수 있기 위해서는 화학적 안정성 및 적합성에 대한 추가적인 특성이 조사되어야 한다.

참고문헌

1. S. Mori, and H. Iwata, "Relationship between Tribological Performance of Liquid crystals and their Molecular Structure," *Tribology International*, Vol. 29, pp. 35-39, 1996.
2. N. Nakano, "Active Control of Friction Coefficient and Liquid Crystals : Electrorheological and Electro-rheological Effects," *J. Jpn. Soc. Tribology*, Vol. 42, pp. 853-858, 1997.
3. H. Spikes, "Tribology Research in the Twenty-first Century," *Tribology International*, Vol. 34, pp. 789-799, 2001.
4. F. E. Lockwood, M. T. Benchaita, and S. E. Friberg, "Study of Lyotropic Liquid Crystals in Viscometric Flow and Elastohydrodynamic Contact," *ASLE Trans.*, Vol. 30, pp. 539-548, 1987.
5. T. E. Fischer, S. Bhattacharya, R. Salher, J. L. Lauer, and Y-J. Ahn, "Lubrication by a Sematic Liquid Crystal," *ASLE Trans.*, Vol. 31, pp. 442-448, 1988.
6. S. Bair, W. O. Winer, "Friction/Traction Measurements with Continuously Variable Slide-Roll Ratio and Side-Slip at Various Lambda Ratios," *Proceedings of the Leeds-Lyon Symposium on Tribology, IPC Science & Technology Press Ltd.* pp. 296-301, 1980.
7. D. M. Sanborn, W. O. Winer, "Fluid Rheological Effects in Sliding Elastohydrodynamic Point Contacts With Transient Loading : 1-Film Thickness," *Trans. ASME, Journal of Lubrication Technology*, pp. 263-265, 1971.
8. F. Rastegar, and W. O. Winer, "On the Traction and Film Thickness Behavior of Greases in Concentrated Contacts," *Journal of National Lubricating Grease Institute*, pp. 166-173, August 1986.