

트라이볼로지 특성에 미치는 윤활제의 영향

김 중 현[†]

경기공업대학 자동화시스템과

The Effect of Lubricants on the Tribological Characteristics

J.H. Kim[†]

Automation Faculty, Kyonggi Institute of Technology

Abstract – This paper presents an experiment of the characteristics of lubricating oils for refrigerating and air conditioning. We investigate influences of lubricating oils and additives on friction and wear by reciprocating type and pendulum type friction testers. The result shows that polyolesters have excellent friction characteristics and poor effect of additives. In contrast, polyvinylethers gave higher coefficient of friction, low wear amount and good effect of additives. We can see good relationship between the coefficients of friction in reciprocating type and pendulum type friction testers.

Key words – tribology, friction, wear, lubricant, additive.

1. 서 론

냉동공조기기에 사용되는 윤활유는 일반적으로 압축기와 같은 고온 및 고압력 분위기하에서 운동하는 운동 부품의 신뢰성을 보장하기 위해 우수한 윤활 특성을 필요로 한다. 또한 재료적합성 즉 냉동공조시스템내에 사용되는 여러 부품재료와의 사이에 화학적 안정성도 요구된다. 또한 윤활유와 냉매가 혼합된 상태로 전체 시스템내를 순환할 때 캐필러리같은 관의 직경이 작은 곳에서 윤활유로 인한 막힘 현상[1]이 발생하지않기 위하여는 냉매와의 상용성(miscibility)도 확보되어야 한다. 한편 냉동공조기기의 냉매로 종전에는 CFC계의 냉매가 사용되어져 왔으나 오존층 파괴 및 지구온난화 문제등으로 인해 냉매가 CFC계에서 CI성분을 포함하지 않는 HFC계로 대체되어 가고 있는 추세이다. 이러한 냉동공조기기에 사용되는 윤활유로 종래 CFC계 냉매에서는 광유(mineral oil)가 주로 사용되어져 왔으나 대체되고 있는 HFC계 냉매에서는 상기 상용성의 문제로 기존의 광유 대신 PAG(PolyAlkylene glycols), POE(Polyolesters), PVE(Polyvinyl ethers)[2] 같은 합성유가 주로

사용되고 있다. 종래의 CFC 냉매에서는 냉매자체에 포함되어 있는 염소 성분에 의한 금속재료 표면상의 보호막 형성으로 운동부품의 마찰마모성능에 많은 기여를 하였으나 HFC계 냉매에서는 염소성분이 존재하지 않기 때문에 이러한 효과를 기대할 수 없어 윤활조건은 종래 CFC계 냉매 사용시 보다 악화된 상황이다. 따라서 향후 냉동공조시스템이 HFC계 냉매, 합성유계 윤활유로 점차 대체되어 갈 때 마찰운동 부품 및 시스템의 신뢰성을 확보하는 것은 매우 중요한 문제로 대두되어 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 HFC계 냉매 분위기하에서 냉동공조시스템에 적용되고 있는 각종 윤활유에 대해 실험을 통해 마찰 및 마모특성 그리고 첨가체에 따른 영향등을 비교 평가하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 2종의 마찰시험기를 이용하여 실험을 수행하였다.

먼저 왕복동식 마찰시험기의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 크랭크 메커니즘의 원리를 이용해 상부시험편인 강구를 직선 왕복운동시키면서 윤활유중에서 하부의 평

[†]주저자 · 책임저자 : tribo@kinst.ac.kr

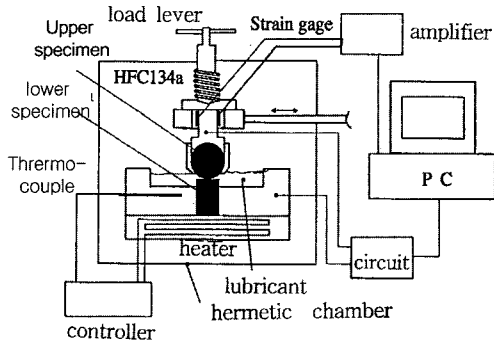
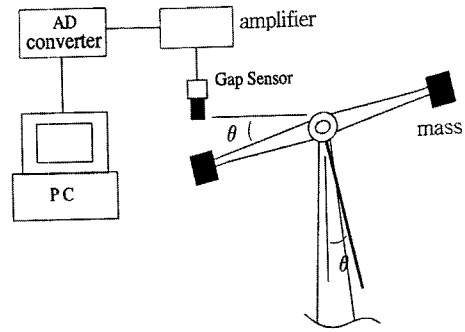


Fig. 1. 왕복동 마찰시험장치.

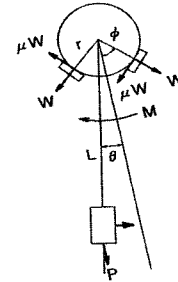
판시험편과 마찰운동을 하도록 하였다. 점도에 큰 영향을 미치는 온도를 일정하게 유지하기 위해 하부시험편 주위에 온도센서를 장착하여 윤활유의 온도를 측정 한 후 윤활유 가열 히터를 제어하여 윤활유 온도가 일정한 설정온도로 유지되도록 하였다. 상부시험편(SUJ2, 직경 19.05 mm, 경도 Hv760) 홀더에는 스트레인게이지를 부착하여 왕복마찰운동시 상부시험편에 작용하는 하중을 측정하여 마찰계수로 구하였다. 또한 레버를 통해 상부시험편에 수직하중을 변화시켜 가면서 실험을 실시하였다. 이와같은 왕복동 마찰시험은 실제 냉동공조기에서 냉매가 윤활유에 용해되어 윤활유점도에 영향을 미치는 영향을 고려하여 밀폐된 냉매(HFC 134a) 분위기하에서 수행하였다. 하중 100 N, 왕복운동의 주파수 8.33 Hz, 진폭은 2.5 mm로 설정하였다. 한편 상대 마찰운동을 하는 두 시험편간의 존재하는 유막의 상태를 관찰하기 위해 시험편이 서로 접촉하여 통전할 때는 1, 절연상태에서는 0으로 표시되도록 양 시험편 간에 전기회로를 구성하여 접촉면의 상태를 측정하였다.

또 다른 시험기로 Fig. 2와 같은 진자(pendulum)식 마찰시험기를 사용하였다. 상부시험편은 베어링용 로울러(SUJ2, 직경 2 mm, 길이 20 mm), 하부시험편은 직경 4.75 mm의 베어링용 볼을 사용하였다. 대기분위기하에서 실험을 수행하였으며 진자 진폭의 감쇄율을 변위센서를 이용하여 측정한 15회 평균값으로 마찰계수를 구하였다.

Table 1에 사용한 윤활제의 종류 및 기본적 물성을 나타내었다. HFC계 냉매와의 상용성이 좋은 에테르계의 폴리프로필렌그리콜 PPG, 에스테르계의 폴리올레스테르 POE, 그리고 폴리비닐에테르PVE에 대해 각각 2종류의 다른 점도, 총 6종류의 시료유를 사용하였고



(a) 진자식 마찰시험기의 개요



(b) 진자운동의 자유물체도

Fig. 2. 진자(pendulum)식 마찰시험장치.

Table 1. 시료유의 물성

	Viscosity (mm ² /s 40/100°C)	Viscosity index	Density (15°C, g/cm ³)
POE32	25.39/4.989	134	0.993
POE68	63.0/12.0	191	0.910
PPG32	34.62/8.041	217	0.990
PPG46	43.83/9.663	212	0.995
PVE32	30.70/4.991	67	0.904
PVE68	63.48/7.618	77	0.925

첨가제로서는 인산에스테르계 TCP(Tricresyl phosphate)를 중량기준 1% 사용하여 첨가제의 효과를 조사하였다. Fig. 3에 시료 윤활유의 기유 구조를 보이고 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4에 왕복동 마찰시험기로부터 얻은 마찰특성의 결과를 보이고 있다. 40°C에서의 동점도가 각각 30 cSt 및 60 cSt정도인 2종류의 윤활유에 대해 50°C 및 150°C에서의 마찰계수를 비교하고 있다. 마찰계수는 POE, PPG, PVE 순으로 높아지는 경향을 보이고 있다. POE의 마찰계수가 특히 낮은 경향을 보이는 것은

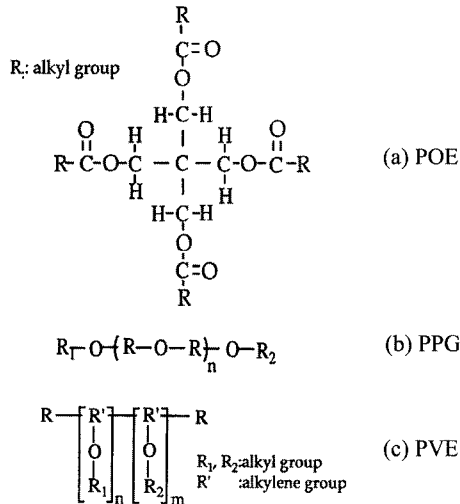


Fig. 3. 시료윤활유의 기유 구조.

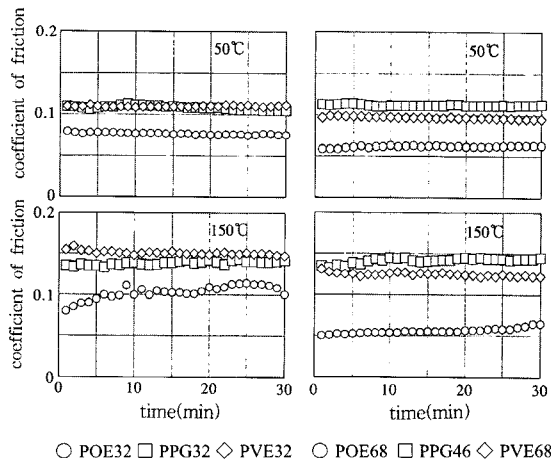


Fig. 4. 마찰계수의 비교(왕복동마찰시험).

POE 기유 성분 중 에스테르기가 흡착성[3]이 강해 금속 표면에 흡착막을 쉽게 형성하기 때문에 그로 인해 낮은 마찰계수를 보이고 있는 것으로 생각된다. Fig. 5에 실험후의 상부시험편 및 하부시험편의 마찰면의 사진을 보이고 있다. 특히 점도가 높은 50°C POE의 경우 상부시험편의 접촉부의 외주부만에서 마모흔이 보이고 있고 마찰부 중앙부는 거의 마모가 발생하고 있지 않아 윤활상태가 EHL 혹은 부분 EHL 상태인 것으로 생각되어 진다. Fig. 6에 하부 평판 시험편의 마찰부를 조도계로 측정한 표면 거칠기 상태를 온도(50, 100, 150°C)를 고려하여 동일한 동점도 영역별로 배열하여 비교한 결과를 보이고 있다. POE나 PPG에 비해 PVE의 마모가 적은 것을 알 수 있으며 특히 윤활조건

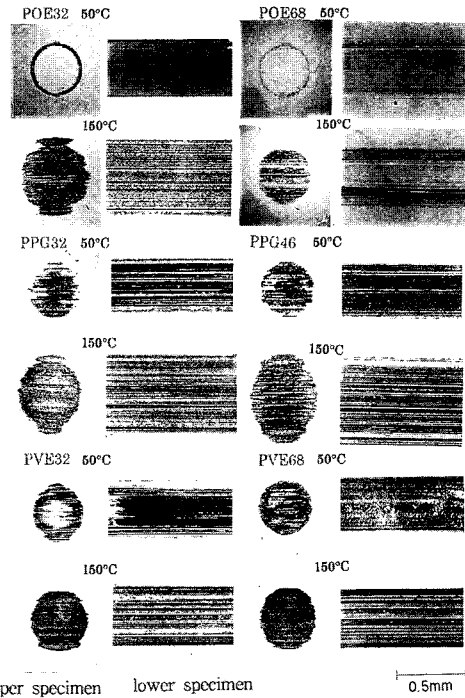


Fig. 5. 마모면 사진(왕복동 마찰시험).

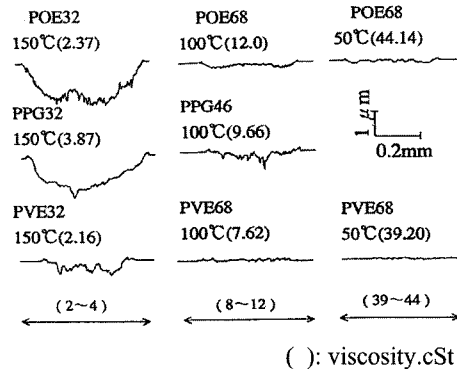


Fig. 6. 마찰면 거칠기의 비교(왕복동 마찰시험).

이 가혹한 저점도영역에서 그 차이가 분명히 나타나고 있다. 이는 PVE의 윤활유 구조가 Fig. 3에 보여지는 것처럼 분지(分枝)구조가 발달한 다른 윤활유와 달리 입자가 뭉쳐있는 듯한 구조로 되어 있고 Table 1에 보여지는 것처럼 다른 윤활유에 비해 낮은 점도지수 곧 높은 점도-압력계수로 인해 고압력하에서 윤활유가 상대적으로 고화(solidification)되기 쉬운 것이 마모특성 개선에 기여한 것으로 판단되어 진다[4]. 150°C에서의 POE의 마모가 특히 심한 것은 이 온도가 흡착능력을 상실하는 전이온도에 근접했기 때문일 것으로

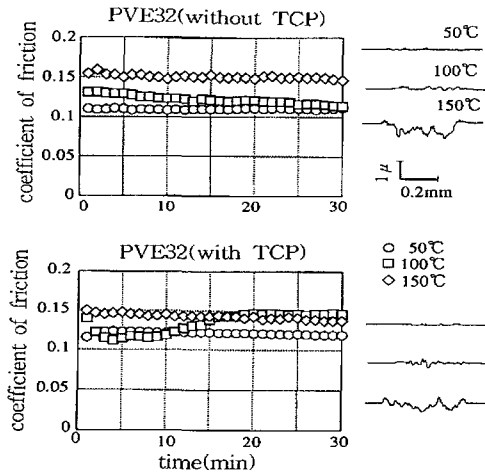


Fig. 7. PVE에 대한 TCP첨가의 영향.

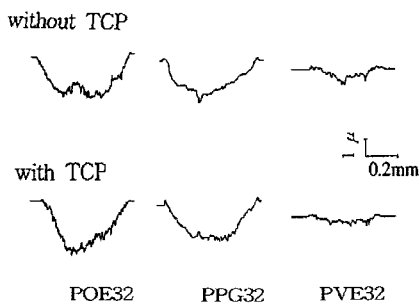


Fig. 8. 윤활유에 따른 TCP 첨가효과 비교.

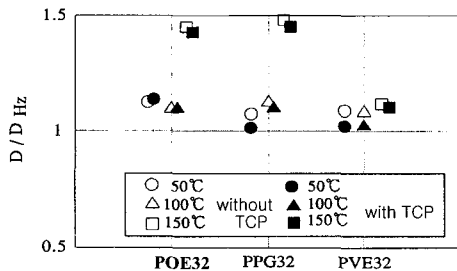


Fig. 9. TCP첨가에 따른 마모특성의 변화.

생각된다[5].

Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9는 인산에스테르계의 극압 첨가제 TCP가 마찰마모특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. Fig. 7에서 PVE는 TCP의 첨가에 따른 흡착막의 형성에 의해 극한 윤활조건인 고온에서 마모량이 저감되고 있음을 알 수 있다. 그러나 윤활조건이 양호한 저온에서의 마모량이나 마찰계수의 저감에는 큰 영향이 보이지 않고 있다. Fig. 8은 윤활유의 종류에 따른 TCP 첨가의 효과를 비교한 것으로 TCP 첨

가에 의해 마모저감 효과가 뚜렷히 보이고 있는 PVE에 비해 POE의 경우는 TCP의 첨가에 따른 마모개선 효과가 전혀 보이지 않음을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 POE의 경우 윤활유의 기유 구조에 흡착성이 강한 에스테르기를 포함하고 있어 역시-P=O 결합의 강한 친화성으로 인한 흡착막 형성으로 마모성능 개선에 기여하는 TCP의 효과가 발휘될 수 없기 때문이다.

Fig. 9는 마모사진으로부터 얻은 접촉원의 지름과 이 큰 헤르츠접촉원 지름과의 비를 윤활유 종류, 온도, 첨가제 유무에 따라 표시한 것이다. 앞에서의 결과와 같이 POE, PPG 보다 PVE의 마모량이 작고 TCP 첨가에 따른 마모개선효과도 POE PPG, PVE 순으로 큰 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 2와 같은 진자(pendulum)식 마찰시험기를 이용하여서도 실험을 수행하였다. 요동운동을 하는 진자에 고정된 상부 로울러 시험편과 그 상부 로울러 시험편을 지지하는 하부 볼 시험편 사이에 상대 마찰운동이 발생한다. 변위센서를 이용하여 요동운동의 감쇄주기를 측정된 후 다음 식 (1)을 이용하여 마찰계수를 구하였다.

$$\mu = \frac{L \cos \Phi (\theta_0 - \theta_n)}{4nr} = \frac{C(\theta_0 - \theta_n)}{n} \quad (1)$$

θ_0 : 초기진자 위치각, θ_n : n회 진자운동후의 위치각
 C : 시험편 형상, 진자의 치수, 하중등에 의한 정수

실험을 통해 얻은 마찰계수값을 Fig. 10에 비교하였다. 40°C에서의 점도가 30 cSt, 60 cSt 정도인 각각 2종의 POE, PPG, PVE 외에 TCP 100%, 파라핀계 광유인 P32, 그리고 기본구조는 POE와 같으나 분지구조가 직쇄형인 HS-POE[6]를 추가하여 비교 검토하였다. 왕복동식 마찰시험기에의 결과와 마찬가지로 대체적으로 마찰계수는 POE, PPG, PVE 순으로 높아지는 경향을 보이고 있다. 특히 점도가 높고 흡착성이 강한 POE68의 경우는 마찰계수가 0.1 이하로 작아서 상대적으로 양호한 윤활상태를 나타내었다. TCP 첨가에 의한 마찰계수 개선효과는 거의 보이지 않고 있다. 전술한 바와 같이 TCP는 마찰계수 개선보다는 가혹한 윤활조건에서의 마모성능 개선에 크게 기여하는 것을 알 수 있다. 50°C에서 파라핀계 광유 P32의 마찰계수가 특히 높았던 것은 다른 합성유들과는 달리 광유는 기유구조상 극성이 없어 흡착능력이 거의 없기 때문으로

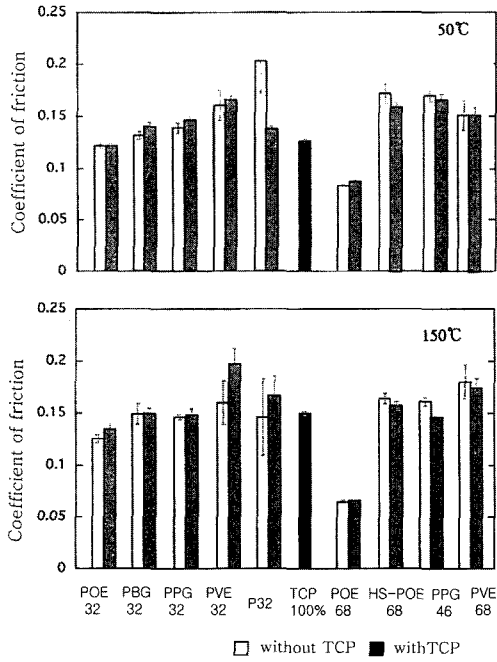


Fig. 10. 마찰계수 비교(진자식 마찰시험).

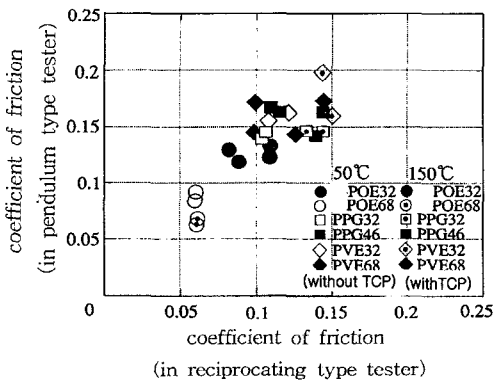


Fig. 11. 마찰계수 비교(왕복동-진자식 마찰시험).

생각되어진다. 반면 일반적으로 흡착성이 강한 첨가제는 극성이 없는 윤활유일수록 그 효과가 크다는 사실이 보고되고 있으며[3] 따라서 P32의 경우가 TCP첨가에 의한 마찰개선 효과가 가장 크게 보이고 있다.

Fig. 11은 왕복동시험기에서의 마찰계수와 진자식 마찰시험기에서 얻은 마찰계수와를 비교하고 있다. 진자식 마찰시험기에서의 마찰계수가 상대적으로 약간 높은 값을 보이고 있어 더 가혹한 윤활상태로 생각되어진다. Fig. 11에 보여지는 것 같이 두 시험의 마찰계수간에는 비교적 양호한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 실험이 어려운 냉매 분위기하에서의 실험

대신 표준 시험기의 일종인 진자식 마찰시험기로 냉동공조기에 사용되는 윤활유의 마찰성능을 비교평가하는 것이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

환경문제로 인해 냉동공조기의 냉매가 대체되어감에 따라 사용되는 윤활유도 기존 광유에서 합성유 계통으로 바뀌어 가는 추세에 있다. 대체냉매와 상용성이 있는 합성유 계통의 윤활유에 대해 마찰마모 성능 및 첨가제의 영향등을 실험적으로 조사하였다.

1. 에스테르계 POE는 기유가 갖는 흡착성 때문에 낮은 마찰계수를 보인다. 그러나 기유의 흡착성으로 첨가제의 효과는 거의 인정되지 않았다.
2. PVE 는 다소 높은 마찰계수를 보였으나 가혹한 윤활조건에서의 마모성능은 우수했고 첨가제로 인한 마모개선 효과도 인정되었다.
3. 첨가제 TCP는 마찰계수 개선에는 큰 영향을 미치지 못했으며 기유의 극성이 약한 윤활유일수록 첨가 효과가 크게 나타났다.
4. 왕복동식 마찰시험기와 진자식 마찰시험기 사이에는 마찰계수 사이에는 양호한 상관관계가 인정되어 표준형 마찰시험기에서도 냉동기유의 마찰성능 평가가 가능하다.

참고 문헌

1. S. Taira, "Experimental Evaluation of Room Air Conditioner with Swing Compressors for R410A," Proc. Int. Symp. on HCFC Alternative Refrigerants, pp.112-117, 1996.
2. T. Katafuchi, M. Kaneko and M. Iino, "Anti-wear Performance of New Synthetic Lubricants for Refrigeration Systems with New HFC Refrigerant," Proc. of 20th Leeds-Lyon Symp., pp.163-169, 1993.
3. 水原和行, tribologist, 38,5, pp.414-420, 1993.
4. Alsten J.V. and Granick, S.G., "Tribology Studied Using Atomically Smooth Surfaces," Tribology Trans., 33,3, pp.436-446, 1990.
5. Y. Yamamoto, "Friction and Wear Characteristics of Lubricants for Alternative Refrigerant HFC134a," 일본 기계학회논문집, 63-612C, pp.2845-2851, 1997.
6. T. Matsuo and M. Itoh, "New Synthetic Refrigeration Oil Suitable for R410A and 407C Applications," Proc. Int. Symp. on HCFC Alternative Refrigerants, pp.141-147, 1996.