

접촉압력을 고려한 R-134a 용 냉동기유 의 윤활성 평가 연구

나병철*, 전경진**, 한동철***

*자동차부품연구원 부품개발연구부

**생산기술연구원 생산자동화기술개발센터

***서울대학교 기계설계학과

ABSTRACT

PAG(Polyalkylene Glycol) and esters are tested with HFC-134a as a refrigeration oil. This investigation enhances the testing method by taking the compressor's environment into account. A testing environment charged with refrigerant gas more closely simulates the conditions of a compressor. The friction coefficient of the PAG/HFC-134a system is similar to that of the mineral oil/CFC-12 system at operating conditions. Ester oils are preferable at the start & stop condition in the lubricity aspect. PAG shows good lubricity in conditions of extreme contact pressure. Consequently, this test provides reliable results on compressor lubricity of refrigeration oils with HFC-134a. It suggests a methodological way for the proper selection of refrigeration oils that may improve the durability and performance of a compressor.

Keywords: refrigeration oil, alternative refrigerant, boundary lubrication, close type wear tester, friction, wear profile

서론

압축기의 윤활성 시험을 위하여는 압축기의 작동조건에 맞는 시험조건이 고려되어야 한다. 일반적으로 오일 성능 시험기는 오일 자체만의 성능을 평가하기 위한 것으로 시험부위가 개방형 구조로 되어있다. 냉매와 냉동기유가 수용되었을 경우 그 물성이 변하기 때문에 기존에 사용되던 개방형 시험기로는 냉매/냉동기유 혼합체의 윤활거동을 판별하는 데에 적합하지 못하다.^(1,2) 따라서 냉동기유의 성능시험은 냉매가 충전된 밀폐형 시험공간에서 이루어져야만 한다. 시험방법에 있어서도 압축기내 부품의 접촉조건을 고려하여야 한다. Falex 시험기 또는 four ball 시험기와 같이 윤활성 시험에 사용되는 표준장비는 그 접촉방식이 점 접촉 또는 선 접촉 방식으로 이루어져 있다.⁽²⁾ 이러한 장비는 극압조건을 형성하여 단시간 내에 가능한 많은 마모가 이루어지도록 하고 있으며 파손하중(failure load)을 측정하여 윤활유의 성능을 판별하고 있다. 이러한

방식으로는 극압 성능이 우수한 것이 윤활성능이 뛰어난 윤활유로 판단될 수도 있다. 실제로 대부분 압축기의 상대운동을 하는 모든 부위는 내구성 측면에서 면 접촉을 이루며 유체윤활이 이루어지도록 설계되어 있다. 또한 대부분의 마모는 압축기 운전 중에 발생하는 것이 아니라 start & stop 조건에서 발생하기 때문에 그 평가방법에 있어서도 작동조건을 고려하여 조정되어야만 한다. 이러한 조건들을 고려하여 밀폐형 pin-on-disk 마모시험기를 제작하였다. 이 시험기는 냉매와 냉동기유가 혼합된 분위기를 형성할 수 있으며 접촉방식도 면 접촉을 이루도록 하였다.

시험장치 및 방법

Fig. 1에 시험기의 밀폐공간 구조를 도시하여 놓았다. 시험온도, 접촉압력, 접촉 상대속도 등은 기본적으로 압축기의 작동조건으로부터 계산하여 적용하였다.

냉동기유는 압축기 윤활과 냉동 싸

이클에서의 오일회수(recovery)를 고려하여 냉매와 수용성(miscibility)이 있어야 한다.⁽³⁾ 여러 종류의 냉매/냉동기유 시스템을 파이렉스(Pyrex) 시험튜브에서 잘 섞은 후 압축기 작동 온도인 약 70 °C에서 이들의 수용성을 관찰하였다. 시험된 냉매/냉동기유 혼합체는 HFC-134a/광유, HFC-134a/알킬벤젠(alkylbenzene), HFC-134a/PAO(Polyalpha Olefin), HFC-134a/PAG, HFC-134a/에스테르 오일이다. 수용성은 시험튜브 속에서 단일상(phase)을 이루면 수용성이 있는 것으로 2상으로 분리되면 수용성이 없는 것으로 판단하였다.

HFC-134a와 이와 사용 가능한 냉동기유 들은 새로이 개발된 신 물질들로서 실험장치에 사용되는 재료들과의 화학적 안정성이 규명되지 않은 물질들이다. 따라서 실링 재료를 포함한 시험장치에 사용될 수 있는 금속재료 및 고분자 재료들의 안정성을 먼저 검사하였다. 안정성 시험에 사용된 재료로는 금속재료로 강(steel), 구리, 알루미늄, 스테인레스 강이고 비금속 재료로는 실리콘, Turcon, Viton, 고무를 사용하였다. 이들의 샘플을 채취하여 HFC-134a/PAG, HFC-134a/에스테르 오일 혼합체가 들어 있는 시험 튜브속에 넣고 70°C 에서 약 3개월간 방치하여 재료의 부식, 변색여부를 관찰하였다.

실험에 사용된 냉동기유는 크게 두 종류로 구분할 수 있는데 그 하나는 CFC-12와 오랫동안 사용되어 그 성능이 입증된 것들로 나프타계 광유 3종, 합성유 2종 이고 다른 하나는 HFC-134a용으로 추천되어지는 PAG와 에스테르계 오일 2종 이다. 3종의 광유는 점도지수가 ISO VG 32, 68, 100 등급인 것으로 (A),(B),(C)로 구분하였다. PAO와 알킬벤젠은 점도지수가 ISO VG 68 이다. PAG 는 40°C에서 75 mm²/s 의 점도를 가지며 두 에스테르 오일은 각각 21.5과 74.1 mm²/s 의 점도를 가지며 각각 (A)와 (B)로 구분하였다.

운환성 시험은 우선 냉매가 충전되

지 않은 오일 자체의 성능을 시험하고 그 다음 냉매가 수용된 상태에서의 성능을 시험하였다. 압축기 작동 조건인 3580KPa의 접촉압력과 300rpm의 접촉선속도를 기본으로 하였으며 보다 명확한 운환특성을 나타낼 수 있는 가혹조건에서의 실험도 수행하였다. 실험 설정 변수(Setting points)는 온도, 접촉압력, 접촉 선속도이며 이제까지 가장 널리 사용되어지던 CFC-12/광유 시스템을 운환성의 평가기준으로 사용하였다.

결과 및 고찰

Table 1에는 5개 시편의 수용성 결과를 나타내었다. HFC-134a/광유, HFC-134a/알킬벤젠, HFC-134a/PAO는 2상으로 분리되어 비 수용성을 나타내었고 HFC-134a/PAG, HFC-134a/에스테르 오일은 단일상으로 수용성이 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 기존에 CFC-12와 사용되던 광유, 알킬벤젠, PAO는 수용성이 없어 HFC-134a용 냉동기유로 사용될 수 없음을 나타낸다.

재료의 적합성 시험결과를 Table 2에 나타내었다. 금속 재료들은 HFC-134a/PAG, HFC-134a/에스테르 오일 혼합체 속에서 3개월동안 부식이나 화학반응을 관찰할 수 없었다. 고분자 재료 중 고무는 변질되어 시험기 재료로 사용될 수 없음을 알 수 있었으며 다른 고분자 재료는 변질이 관찰되지 않았다.

Fig 2에는 광유에 대한 마찰력 실험 결과를 도시하였다. 실험조건은 접촉압력 3580 KPa, 오일온도 70°C, 접촉 선속도 0.94 m/sec 이며 압축기 작동상태를 모델링한 시험조건 이다.

기존 CFC-12와 함께 사용되던 냉동기유의 마찰계수는 0.04에서 0.08 정도를 나타내었다. 초기의 높은 마찰력은 시간이 지날수록 낮아져 일정 값에 도달하게 된다. 이론상 경계운환에서는 점도가 마찰계수에 영향을 미치지 못하며 표면상태와 오일 막 유지능력이 마찰력에 영향을 미친다.⁽⁴⁾ 냉매를 충전하면 마찰계수가 0.02 부터 0.08까지로 약간 낮아

진다. 이러한 마찰력의 감소는 두 가지로 설명될 수 있다. 첫째는, 표면돌기에 의하여 미소규모의 유체윤활(hydrodynamic lubrication)이 형성된 경우와 둘째로, CFC-12의 염소 성분이 표면에 염화철(iron chloride)피막을 형성하여 마찰력을 감소시킨 경우이다. 이 염화철은 표면 보호막으로 작용하여 마찰력을 저감시키고 내 마모성을 증진시키는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾

Fig 3은 HFC-134a 가 수용된 PAG와 에스테르 오일들의 마찰력을 나타내고 있다. 마찰계수는 0.04에서 0.07 정도로 기존 냉동기유와 대등한 수준의 윤활성을 나타내고 있다. 이들의 우수한 윤활성은 첨가제에 의한 영향으로 생각된다. HFC-134a에는 염소성분이 없기 때문에 보호피막을 생성할 수 없지만 에스테르계 오일은 접촉표면에 표면피막을 생성시키는 첨가제를 포함시키는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ PAG역시 우수한 윤활성을 나타내는데 일반적으로 PAG 자체의 윤활성은 매우 불량한 것으로 알려져 있기 때문에 안정된 보호피막을 생성시키기 위하여 여러 첨가제를 포함시키는 것으로 알려져 있다.^(5, 6)

압축기는 항시 같은 조건으로 작동하는 것이 아니라 온도에 따라 운전과 정지를 반복하게 된다. 실제로 대부분의 마모는 start & stop 조건에서 일어나게 된다. 따라서 이 경계윤활 상태에서의 마찰거동을 알아보기 위하여 또 다른 조건에서의 실험이 수행되었다.

Fig 4는 접촉 선속도와 접촉압력에 따른 마찰계수와 마찰력을 도시한 것이다. 이론적으로 접촉압력이 증가하여도 마찰계수는 동일하여야 한다. 그러나 유체윤활의 영향이 커질수록 달라지게 된다.⁽⁷⁾ 마찰계수의 차이는 접촉 선속도가 빠른 0.94 m/s일 때보다 0.31 m/s일 때에 더 작게 나타났다. 이것은 0.31 m/s로 저속 운전할 때에 경계윤활의 특성을 더 잘 나타낸다는 것을 의미한다.

Fig 5에는 0.31m/s의 접촉 선속도로 운전할 경우의 마찰력을 비교하여 놓았

다. HFC-134a/PAG와 HFC-134a/ester 둘 다 광유와 비슷한 마찰력을 나타내었다. 그러나 이전의 0.94m/s일 때의 실험과 비교하여 PAG 시스템은 0.31m/s일 때에 마찰력이 크게 증가한 것을 알 수 있다.(Fig. 3 참조). 이 결과는 PAG가 기존의 표준 오일 실험장비에 의해 성능향상이 이루어졌음을 의미한다. 즉, PAG오일에는 극압 조건에서의 성능개선이 이루어졌기 때문에 저속, 저 접촉압력의 경계윤활 조건에서는 첨가제가 활성화되지 못하여 성능향상이 이루어 지지 않은 것으로 생각된다. 따라서 본 연구의 PAG에 도입된 첨가제는 부적합한 성능개선 방법을 이용하였기 때문에 경계윤활 지역에서는 윤활제로서의 성능이 저조하여 압축기의 start & stop 상황에서는 마찰력 증가로 인한 손실을 초래할 수 있다. 이러한 경향은 접촉압력을 9792KPa로 높이면 더욱 뚜렷이 나타난다. 이때 PAG오일의 마찰력은 다른 것들에 비해 크게 증가하였다.

본 실험에서는 마모특성을 표현하는 데에 마모된 트랙의 표면조도 또는 마모윤곽(wear profile)을 측정하여 비교하였다. Fig 6은 접촉압력이 10.8MPa일 경우 마모트랙의 표면윤곽을 나타내었다. 마모되지 않은 초기 디스크의 조도는 0.25Ra 이다. 이러한 조건에서는 HFC-134a/PAG가 낮은 표면 조도를 나타내었고 HFC-134a/에스테르가 가장 높은 표면 조도를 나타내었다. 이러한 마모트랙은 HFC-134a/PAG 시스템이 가장 안정된 마모트랙을 생성시킨다는 것을 나타내고 있다.

극압 조건에 대한 시험은 볼 시편과 디스크에 의해 점 접촉의 형태로 이루어 졌다. 이러한 조건은 기존에 사용되던 표준 오일시험 방법과 동일한 조건이 된다.

Fig 7은 극압 조건하에서의 마모거동을 나타내고 있다. 이때 접촉압력은 Hertz 접촉압력으로 2.2 GPa이다. CFC-12/광유 시스템은 9.8N-11.8N의 마찰력 결과를 나타내었다. HFC-134a/PAG 시스템

도 광유 시스템과 거의 비슷한 마찰력을 나타내었다. 그러나 HFC-134a/에스테르 시스템은 매우 불안정한 마찰력을 나타내었다. 에스테르 오일에는 극압 첨가제가 포함되지 않은 것으로 사료된다. PAG의 마찰력은 안정적으로 점차 줄어드는 양상을 나타낸다. 즉, PAG 오일에는 보호피막을 생성하여 접촉면을 안정적으로 변화 시키는 극압 첨가제가 포함되어 있음을 알 수 있다.

에스테르 오일의 경우 비 정상적인 높은 마찰로 실험 중 파손되었다. A 에스테르 오일의 경우 B 에스테르 보다 일찍 파손이 되었는데 이것은 A 에스테르 오일의 낮은 점도에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 극압 조건에서 보다 우수한 성능을 나타내려면 점도가 높은 에스테르 오일을 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

Fig 8은 볼이 접촉한 디스크의 마모 표면의 윤곽을 표시한 것이다. 광유 시스템의 경우 가장 낮은 표면 변형을 나타내었다. PAG 시스템의 경우 변형의 정도는 광유 시스템보다 크지만 그 형상에 있어서 마모를 효과적으로 억제할 수 있는 안정된 형상을 나타내고 있다. 이러한 변형은 극압 첨가제에 기인한 것으로 표면의 접촉 돌출부를 안정된 오목한(convex spot) 형상으로 변화 시켜 접촉면적을 넓히는 역할을 한다.

PAG 시스템과 에스테르 시스템은 압축기 작동조건에서는 우수한 윤활성을 나타내었지만 PAG 시스템의 경우 경계윤활 영역에서 현저하게 낮은 윤활성을 나타내어 본 실험에 사용된 압축기에는 점도가 높은 에스테르 시스템이 유리한 것으로 나타났다. PAG 시스템은 매우 가혹한 극압 조건을 겪는 압축기에 유리하게 사용될 수 있을 것이다.

결 론

실험결과 나타난 냉동기유들의 마모특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 냉매충전은 냉동기유의 점도 감소와

함께 마찰계수를 감소시킨다. 이것은 압축기의 작동조건이 충분한 경계윤활조건이 아님을 나타낸다. 이러한 조건에서는 HFC-134a용 냉동기유인 PAG, 에스테르 시스템 모두 기존에 사용되던 CFC-12/광유 시스템과 대등한 윤활성을 나타낸다.

2. 경계윤활은 압축기의 start & stop 시 형성되는 조건이며 이때 PAG 시스템의 마찰력이 현저하게 증가하였다. 광유와 에스테르 오일 시스템은 이 조건하에서 우수한 윤활성을 나타내었다.

3. 온도가 낮아질수록 마찰력이 감소하는데 이는 점도가 높을수록 유체윤활의 생성이 용이하기 때문이다.

4. HFC-134a/PAG 시스템은 광유나 에스테르계 오일 시스템 보다 극압 조건에서 우수한 윤활성을 나타내었다.

5. PAG 시스템의 마모윤곽은 극압 조건을 견디기에 매우 유리한 형상으로 안정된 상태를 유지하고 있다. PAG는 기존 표준 시험장비에 의하여 극압 첨가제에 의하여 성능개선이 이루어졌음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Cooper, W. D. Dowhing R. C. and Gray, J. B. Alkylbenzene as a Compressor Lubricant, Purdue Compressor Tech. Conf. 1974
2. Sanvordenker, K. S. and Gram W. J. Laboratory Testing under Controlled Environment Using a Falex Machine. Purdue Compressor Tech. Conf. 1974
3. Pita, E. G. Refrigeration Principles and Systems, John Wiley & sons.
4. Short, G. D. High-Viscosity Ester Lubricants for Alternative Refrigerants. ASHRAE Conference 1992
5. Kitaichi, S. Sato, R. Ishidoya and T. Machida Tribological Analysis of Metal Interface Reactions in Lubricant Oils/CFC12 and HFC134a System. Purdue Compressor Tech. Conf. 1974
6. Noboru Masuda Some Evaluation Results of HFC-134a/PAG Mixtures for Refrigeration. Purdue Compressor Tech. Conf. 1972

Table 1. Miscibility test result

Refrigerant	Refrigeration Oil	Miscibility
HFC-134a	Mineral Oil	X
HFC-134a	PAG	O
HFC-134a	Alkylbenzene	X
HFC-134a	Polyol Ester	O
HFC-134a	PAO	X

Temperature Range: 20 °C – 70 °C
 Testing method: Sealed Test

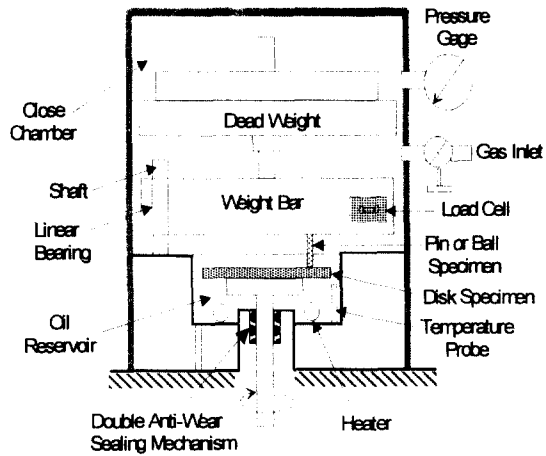
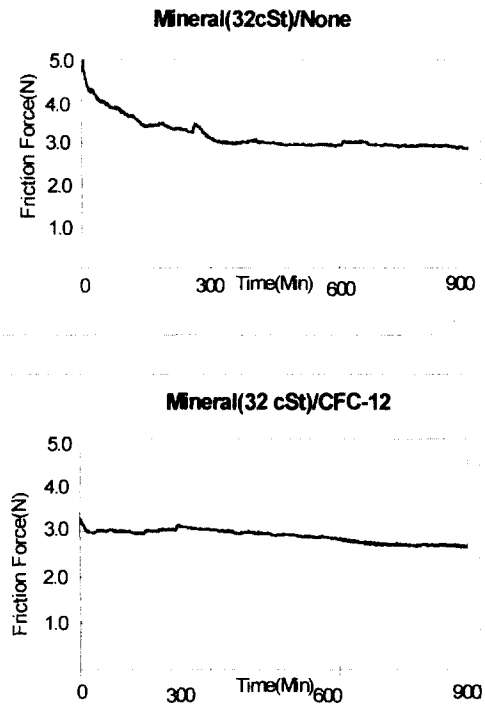


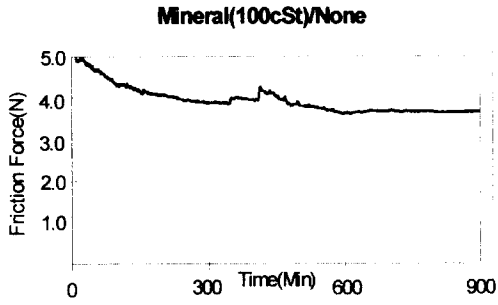
Fig. 1 View of Close Type Test Chamber

Table 2. Result of material compatibility test

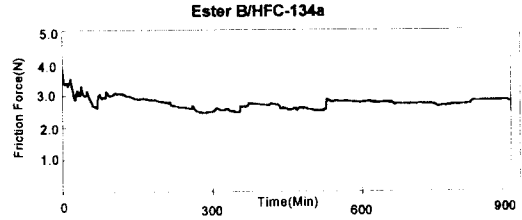
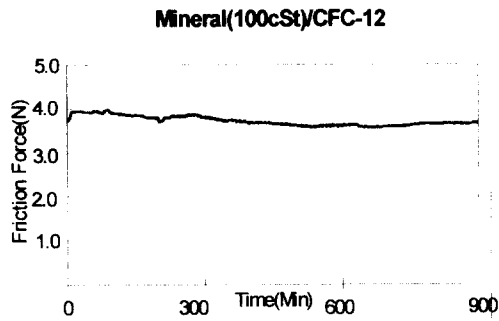
Material	Refrigerant	Refrigeration Oil	Compatibility
Steel	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Copper	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Aluminum	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Stainless Steel	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Silicone	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Turcon	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Viton	HFC-134a	PAG	O
		Ester	O
Rubber	HFC-134a	PAG	X
		Ester	X

Temperature: 70 °C
 Period: 3 month
 Testing method: Sealed Test





Line Speed: 0.94 m/s, Load: 45N
Fig. 2 Friction Force of Mineral Oils



Line Speed: 0.94 m/s, Load: 45N
Fig. 3 Friction Force of HFC-134a/Oil Mixture

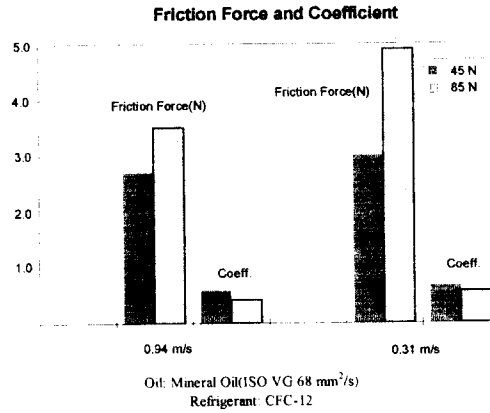


Fig. 4 Effect of Contact Speed and Pressure

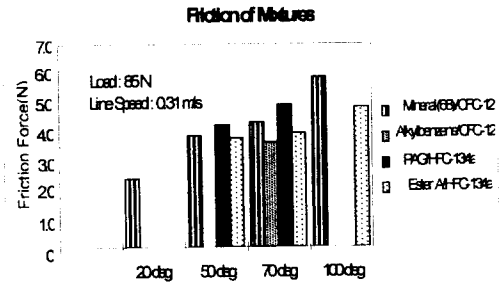
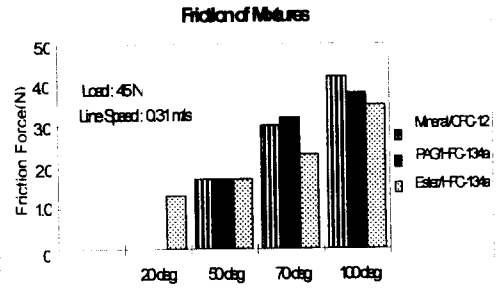
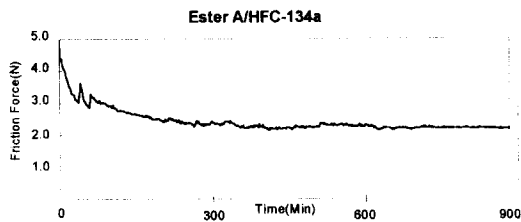
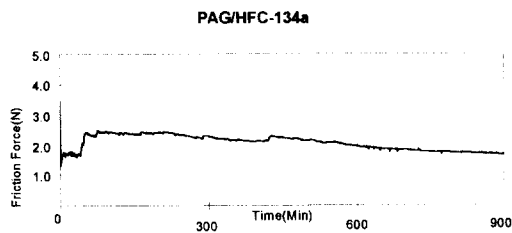
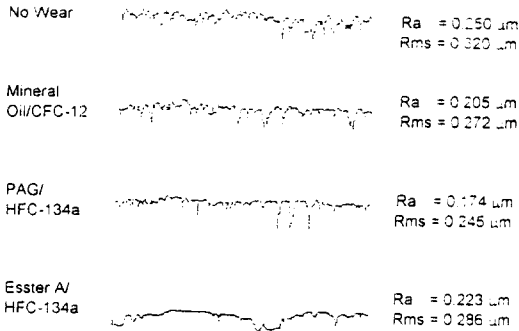
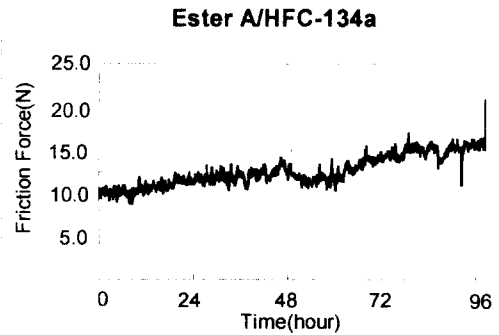
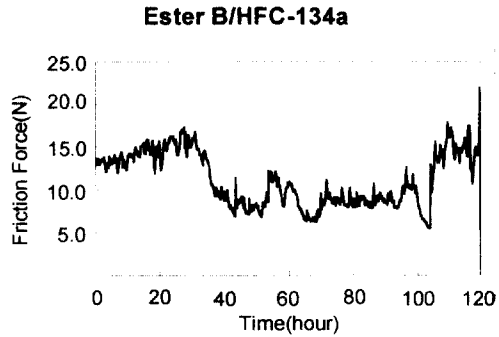


Fig. 5 Comparison of Friction Forces for Refrigerant/Oil Mixtures



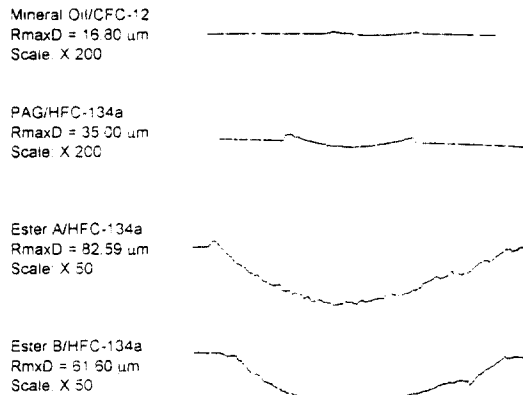
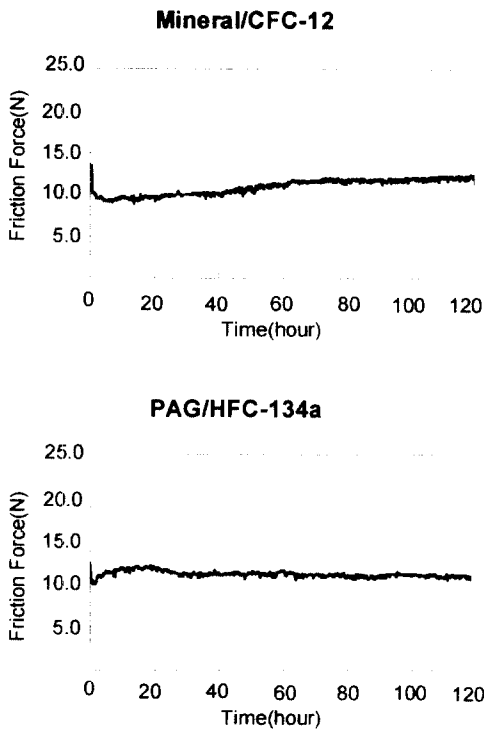
Temp: 70 °C
Speed: 0.94 m/sec
Contact Pressure: 10.8 MPa
Time: 120 Hour

Fig. 6 Surface Roughness of Wear Track under Area Contacted Condition



Line Speed: 0.31m/s, Load: 2.1 GPa

Fig. 7 Friction Force of Refrigerant/Oil Mixtures on the Point Contact Condition



Temp: 70 °C
Speed: 0.94 m/sec
Measuring Length: 8.0 mm
Contact Type: Point(Hertz Contact Pressure: 2.2 GPa)
Time: 120 Hour

Fig. 8 Wear Profile of Ball Contacted Disk