

R-134a 냉매용 냉동기유 선정을 위한 기초 연구

A Basic Study on Selection of Refrigeration Oils for R-134a Refrigerant

나 병 철*, 안 영 재**, 한 동 철***, 전 경 진*
 B. C. Na, Y. J. An, D. C. Han, K.J.Chun

Key words : Refrigeration Oil(냉동기유), Alternative Refrigerant(대체냉매), Miscibility(수용성), Closed Type Wear Tester(밀폐형 마모시험기), Friction(마찰력), Wear Characteristic(마모특성)

Abstract

One of the chlorofluorocarbon compounds, R-12 deplete atmospheric ozone. It leads to international agreement to reduce CFC production. R-134a has similar thermodynamic properties to CFC-12. It has zero ODP(Ozone Depletion Potential). This Paper focuses on the lubricating oils for using with R-134a. PAGs(Polyalkylene Glycol's) and esters are primary lubricants that are now being tested for use with R-134a. Because of extreme polarity of R-134a, there are many problems in the selection of lubricating oil. This investigation analyzes compressor working conditions and calculates wear parts friction for simulation testing. Miscibility and material compatibility is proved by sealed glass tests. Friction was tested on the closed type pin on disk wear tester. This equipment simulates actual refrigerating compressor. Environment controlled test made more reliable result than field test. Conventional oils(mineral oils, Alkylbenzene, PAO(Polyalpha Olefin) are immiscible with R-134a. PAGs and ester oils are miscible with R-134a. Friction coefficient is similar to conventional system(mineral oil/R-12 systems) at operating condition. At start & stop condition, PAGs/R-134a system has high friction coefficient.

It provide reliable result on the lubricity, miscibility, material compatibility of R-134a with these new lubricants. It suggests proper selection of refrigeration oil that may improve compressor durability of performance.

기 호 설 명

dp : 피스톤 직경[mm]

ds : 슬라이드 직경[mm]

dc : 크랭크 핀 직경

dt_1 : 스러스트 베어링 외경[mm]

dt_2 : 스러스트 베어링 내경[mm]

dj : 저어널 베어링 직경[mm]

lj : 저어널 베어링 길이[mm]

Pps : 피스톤과 실린더 벽 사이의 접촉압력[kg/m^2]

Pp : 실린더 압축압력[kg/m^2]

Fp : 압축에 의한 피스톤 하중[kg]

Sl : 크랭크 핀의 관통으로 슬라이더에서 배제되는 폭[mm]

Al : 크랭크 핀에서 배제되는 투사면적[mm^2]

* 정희원, 생산기술연구원

** 대우전자

*** 서울대학교

A_c : 크랭크 핀과 슬라이더의 실제 접촉면적[mm²]

P_c : 크랭크 핀과 슬라이더의 접촉 압력[kg/m²]

P_t : 스러스트 베어링에서의 접촉압력[kg/m²]

F_s : 압축기 로터에 의한 하중[kg]

P_j : 저어널 베어링에서의 접촉압력[kg/m²]

1. 서 론

오존층 파괴에 대한 관심이 고조됨에 따라 냉동기에 사용되는 냉매 R-12는 더 이상의 사용이 금지되었고 R-12를 대체할 신 냉매로써 염소를 수소로 치환 시킨 R-134a가 가장 유력하게 지목 받고 있으며 최근 실용화에 나서고 있다. 본 실험에서는 오존층 파괴지수(ODP : Ozone Depletion Potential)가 0인 대체냉매 R-134a와 관련하여 이에 적용할 수 있는 냉동기유에 관하여 논의하고자 한다.

소형 압축기용 대체냉매로는 3중 혼합냉매와 R-134a가 추천되는데 3중 혼합냉매는 미약하나마 오존층을 파괴하므로 과도기적으로 밖에 사용되어질 수 없다. 따라서 궁극적으로는 R-134a로 확정되어 사용되어질 것이 확실하므로 최근에는 거의 대부분 R-134a로의 전환하는 것을 기정 사실로 받아들이고 있다.¹⁾ 그러나 냉매 R-12를 R-134a로 대체하는 데에는 여러가지 문제점을 내포하고 있다. 그 중 가장 심각한 문제가 냉동기유의 물성 및 윤활성에 대한 것으로 기존에 R-12와 우수하게 사용되던 냉동기유는 신 냉매와는 신 냉매와의 물성 차이로 인하여 더 이상 R-134a용 냉동기유로 사용되어질 수 없다. 따라서 CFC 사용규제는 압축기 및 냉동라인의 설계변경을 요하게 되고 이들 냉매를 제품에 실용화시키는 문제가 큰 이슈로 떠오르고 있다.

대체냉매 R-134a는 이미 개발이 되어 시판을 하고 있으나 냉동기유는 아직 여러 문제점들을 내포하고 있다. 현재까지 일부 상용화되어 있는 승용차용 에어컨과 가정용 냉장고에는 PAG계 윤활유를 사용하여 제작된 압축기를 사용하고 있으나 점차 에스테르(Ester)계 냉동기유로 바뀌어 가는 추세이다. PAG계 냉동기유가 모든 압축기에 적용될 수 있는 것은 아니다. PAGs 윤활유 중에는 R-134a와 적합성이 없는 것도 있고 적합성이 있다 하여도

작동 영역에서 윤활피막을 제대로 형성하는지도 확인되지 않고 있기 때문이다. 아직까지 R-134a가 기존의 R-12에서처럼 안정적으로 작동하지 않기 때문에 R-12에서의 광유처럼 대부분의 윤활조건에 공통적으로 우수한 윤활성을 나타내는 냉동기유가 존재하지 않는다. 따라서 수백 종류에 달하는 냉동 압축기의 윤활조건이 다르므로 각 냉동기의 작동 조건에 적합한 냉동기유를 선정하여 제품에 적용시키는 것이 최선의 방법이 된다.

냉매와 냉동기유는 전 구간의 운전온도 및 압력에서 서로 수용(Miscible) 되어야 한다.²⁾ 냉매와 비 수용성(Immiscible)인 윤활유는 냉동 시스템 내부에 윤활유가 피복되어 열전달과 전체 효율을 저하시키며 증발기의 모세관들을 막아 작동을 불가능하게 한다. 기본적으로 냉동 사이클이 밀폐형으로 구성되어 있기 때문에 압축시 누설되는 윤활유는 냉매에 수용되어 냉매 증발이 이루어지기 전에 다시 압축부로 회수되어야 하는데 이 과정에서 비 수용성 윤활유는 상 분리가 일어나 냉매의 회수가 불가능해지게 된다. 따라서 윤활성을 평가하기 이전에 대체냉매용 냉동기유는 기본적으로 R-134a 수용성(Miscibility)이 고려되어야 한다.

본 논문은 대체냉매를 실용화하여 실제 산업체의 현장에 적용시키는데 도움을 주고자 한다. 윤활유의 특성 중 가장 중요한 부분인 윤활성 및 적합성의 측면에서 기존 냉동 시스템과 비교하여 그 특성을 제시하였다. 대체냉매용으로 추천되고 있는 몇몇 냉동기유를 구입하여 실험하였으며 대체냉매용 냉동기유와 기존 프레온 냉매용 냉동기유의 윤활성을 판별함에 있어 기본적인 압축기 작동 조건을 시뮬레이션하여 실험하였다. 또한 윤활유 제조회사에서 간과하기 쉬운 면 접촉 상황과 실제 밀폐형 냉동기에서의 조건을 부여하기 위해 냉매를 주입시킬 수 있는 밀폐형 마모시험기를 제작하여 냉동기유에 냉매가 혼합된 혼합체의 윤활 특성을 측정하였다. 윤활유의 시험법은 일반적으로 극압 조건에 가까운 선 접촉 및 점 접촉 마모 시험법이 규격화되어 있고 또한 윤활유 자체만을 실험하므로 기존의 윤활유 평가 방법으로는 냉동기유의 특수한 상황을 적합하게 표현할 수 없다. 본 논문에서는 밀폐형 왕복동 압축기에서의 작동 조건을 고려하여 윤활 성능을 측정하였다. 그리고 기존 R-12/광유

시스템에서의 윤활 특성과의 결과를 비교함으로써 기계 윤활의 측면에서 여러 냉동기유 제조회사에서 개발된 냉동기유 중 자사제품에 가장 적합한 냉동기유를 선정할 수 있는 방법론적인 방향을 제시하였다.

2. 실험 배경

R-134a 분자는 R-12나 R-22에 비교하여 높은 극성을 지니고 있다. R-134a의 높은 극성으로 인하여 현재 널리 쓰이고 있는 팜유나 합성유 등과 같은 비극성 윤활유와는 용해성이 없다. 따라서, 높은 극성을 지닌 합성유가 R-134a용 윤활유로 사용될 수 있다. R-134a에 용해되는 합성유로는 몇 가지가 확인되었는데 현재까지 평가된 결과로는 폴리알킬렌 글리콜(Polyalkylene Glycol's : PAGs)과 에스테르(Ester)계 윤활유가 호평을 받고 있다.³⁾ PAGs는 많은 연구가 지속된 결과 특정 압축기에서 사용하여 상품화가 이루어지고 있다.⁴⁾ 현재는 PAGs와 에스테르계의 합성유가 거의 R-134a용 윤활유로 확정되어 가고 있는 추세이다.⁵⁾ 그러나 높은 극성으로 용해성에 문제가 없는 PAG라 할지라도, PAG의 분자구조가 산소결합(-O-)과 Hydroxyl기(-OH-)를 가지고 있어, 팜유나 다른 합성유보다 수분을 흡수하기 쉬운 결함을 내포하고 있다. 밀폐형 냉동 사이클 내의 수분은 모터에 사용되는 전선 피복제나 단열 피복제 등의 유기 절연물질에 손상을 입혀 PAG의 취약점이 되고 있다.⁷⁾ 또한, 최근에 주목받고 있는 에스테르도 모두 용해성이 있는 것은 아니므로 수용성 및 적합성에 관한 실험이 병행되어야 한다.

압축기 내 각 요소 부위의 마찰 상태를 평가하는 데에는 마모시험기를 사용하여 마찰력을 측정한다. 일반적인 마모시험기는 주로 선 접촉형상의 팔렉스 마모시험기(Falex Wear Tester)나 점 접촉형상의 4구 마모시험기(Four Ball Wear Tester)가 이용되었다. 이들은 대부분 개방형의 시험기로 윤활유 자체의 성능을 실험하는 표준 시험기이다.⁶⁾ 측정은 최대의 마모가 발생하도록 선 접촉 또는 점 접촉 하에서 이루어지고 있으며 측정 값은 대부분 심한 파손이 일어나는 하중을 측정한다. 측정 하중이 높을수록 우수한 윤활유로 평가한다. 실제로 압축

기에서의 윤활 상태를 관찰하여 보면, 우선 냉동기유와 냉매가 혼합되어 사용된다. 냉동기유에 냉매가 용해되면 그 윤활 특성도 변하게 되므로 일반 윤활유의 윤활성 측정과는 달리 측정되어야 한다.⁹⁾ 또한 압축기는 설계시 모든 부품이 유체윤활의 상태에서 사용되게끔 설계되어 있고 대부분이 면 접촉을 이룬다. 일반 윤활유의 윤활성 측정시의 고하중, 고속 마찰 마모와는 마찰 거동이 다르다. 따라서 일반적인 방법으로 우수한 윤활성을 지닌 것으로 평가된 윤활유라도 압축기 내에서는 아주 불량하게 작동할 수도 있다. 압축기의 마모는 다른 일반 기계와 달리 비교적 낮은 하중과 온도에서 운전과 정지(Start & Stop)를 반복하는 저속 경계 윤활에서 발생한다. 따라서, 정확한 윤활성의 실험을 위해서는 몇 가지가 개선되어야 한다.

우선, 냉매와 냉동기유가 같이 존재하여 실험할 수 있도록 실험공간(Chamber)을 가져야 한다. 실험 공간내에서 압축기의 운전 온도를 유지한다. 이때 냉매와 냉동기유가 혼합되어 마찰 및 마모 실험은 실제의 압축기의 운전을 모사(Simulation) 한다. 하중은 유막파괴가 가능한 고 하중보다는 실제 압축기에서의 접촉 압력을 고려하여 가한다. 운전 시간은 길면 좋으나, 여러 윤활유의 비교를 위하여 일정시간으로 제한하여야 한다. 일정시간의 실험 후 시편의 파손 정도를 측정하여 비교한다. 이와 함께 마찰력을 측정하여 윤활성이 좋고 에너지의 손실이 적은 냉동기유로 판별한다. 이러한 실험 조건을 만족시키는 마모시험기는 아직 없으므로 본 실험에서는 위의 단점을 보완하는 실험실 테스트에 사용 가능한 시험기를 제작하여 실험을 수행하였다.

대부분의 압축기의 부품은 접촉 압력이 적은 면 접촉을 주로 하므로 이를 모사(Simulation)할 수 있도록 면접촉 형태의 핀 온 디스크(Pin-Disk Wear Tester)를 제작하였다. 제작된 마모시험기는 시험 환경, 하중, 온도, 및 운전 시간 등을 조절할 수 있도록 고안되었으며 특히 냉매와 윤활유가 혼합된 상태에서 실험할 수 있도록 밀폐형 혼합실을 제작하였다. 윤활성의 평가를 위한 기준으로는 현재까지 무난하게 사용되어 온 R-12 냉매와 팜유계의 냉동기유를 기준으로 정하여 윤활성의 우수 여부를 판별하였다. 적어도 R-134a와 냉동기유의 윤활성은 이 기준에서 크게 벗어나지 않으면 윤활성의

측면에서 사용이 가능하다고 판단된다.

대체냉매인 R-134a는 프레온계 냉매와는 달리 냉동기유의 선정이 매우 까다롭고 제약이 많다. 그리고 냉동기유 자체의 성질과 R-134a를 포함하였을 때의 성질이 다르기 때문에 R-134a와 사용이 가능한 윤활제라 하더라도 제품에 맞도록 선별적으로 사용되어야 한다.

3. 실험용 압축기 모델링

본 실험을 위하여 선정된 압축기는 가정용 냉장고용으로 널리 쓰이는 헤르메틱 타입(Hermetic Type) 소형 왕복동형이다. 작동원리 및 마찰발생 부위가 Fig.1에 표시되어 있으며 스카치 요크(Scotch-York) 형태의 기구를 이용하여 피스톤을 움직이며 냉매를 압축시킨다.

압축 과정에서 마찰력을 발생시키는 부품은 피스톤과 실린더 벽면, 왕복 슬라이더와 크랭크 핀, 모터의 하중을 지지하는 스러스트 베어링, 크랭크 축 회전을 유지하는 저어널 베어링으로 구성된다. 각 마모부품의 치수는 설계도면을 기준으로 결정하며 기호 및 치수는 다음과 같다.

피스톤 직경, $dp = 23\text{mm}$

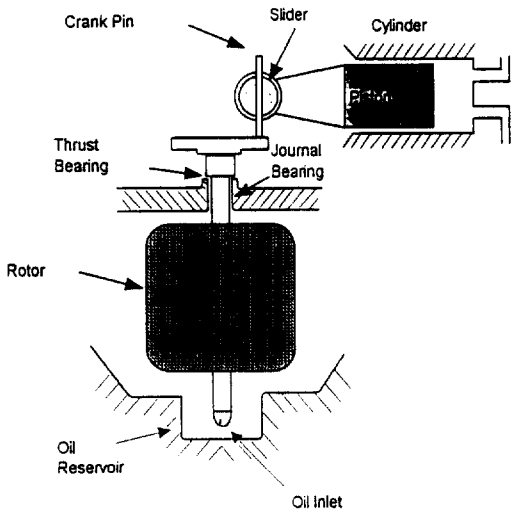


Fig.1 Compressor Working Components and Wear Parts

슬라이더 직경,	$ds = 21\text{mm}$
크랭크 핀 직경,	$dc = 14\text{mm}$
스러스트 베어링 Outer Dia.,	$dt_1 = 27\text{mm}$
스러스트 베어링 Inner Dia.,	$dt_2 = 22.5\text{mm}$
저어널 베어링 Dia.,	$Dj = 18\text{mm}$
저어널 베어링 Length,	$lj = 16\text{mm}$

피스톤과 실린더 내의 접촉 압력은 압력발생 방향과 마모발생 표면의 방향이 수직이어서 다른 부위에 비해 동력 손실에 큰 영향을 끼치지 못한다. 압축압력이 약 10 기압(103323kgf/m^2) 정도이고 압축기의 피스톤은 매우 정밀하게 가공되어 있으므로 큰 마찰을 일으키지 않는다. 압축 시 피스톤과 실린더 벽면과의 접촉압력은 피스톤의 압축압력 Pp 보다 클 수 없으므로 마찰발생으로 인한 피스톤과 실린더 사이의 마찰력 Pps 는 다음과 같이 표시된다.

$$Pps < 103323\text{kg/m}^2 \quad (1)$$

또한 슬라이더의 접촉부는 동일하중을 지지하는 크랭크 핀보다 접촉면적이 크기 때문에 크랭크 핀에서 보다 접촉면압이 커지므로 크랭크 핀에서의 모델링만으로 대신할 수 있다.

Fig.2에 크랭크 핀에서의 접촉면압이 작용하는 부위를 표시하였다. 그림에서와 같이 슬라이더가 원형단명을 가지므로 크랭크 핀에 관통하는 부위는 투사면적으로 환산하여 양 끝단에서의 손실면적을 삭제하여야 한다.

먼저 피스톤으로 부터의 하중 Fp 를 계산하면,

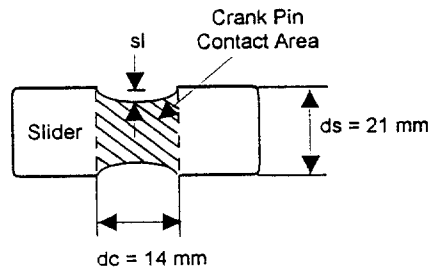


Fig.2 Crank Pin Contact Area

$$F_p = P_p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 = 42.9 \text{kgf} \quad (2)$$

크랭크 핀이 관통할 시 슬라이더 단면에서 크랭크 핀에 의해 배제되는 길이 Sl 은 다음과 같다.

$$sl = \frac{ds}{2} - \sqrt{\left(\frac{ds}{2}\right)^2 - \left(\frac{dc}{2}\right)^2} = 2.674 \text{mm} \quad (3)$$

크랭크 핀, 슬라이더의 접촉부 면적을 구하기 위해 먼저 슬라이더를 관통하는 크랭크 핀에 의해 배제되는 부분을 계산하여야 하는데 Fig.3에 배제 면적의 형상을 원호로 가정한 투사단면을 도시하였다. 크랭크 핀 원호부분의 곡률반경을 ρ , 원호가 생성되는 부분까지의 원호각을 θ 라 하면 기하학적 구조로부터 다음의 관계식이 정리된다.

$$\sin \theta = \frac{dc}{2\rho} \quad (4)$$

$$sl = \rho(1 - \cos \theta) \quad (5)$$

수식 (4), (5)에서 ρ 를 제거하면

$$2sl \cdot \sin \theta + dc \cdot \cos \theta - dc = 0 \quad (6)$$

각 수치를 대입하고 반복 계산하면

$$\begin{aligned} \theta &= 0.7298 \text{rad} \\ \rho &= 10.5 \text{mm} \\ Al &= 13.92 \text{mm}^2 \\ Ac &= 2080.8 \text{mm} \\ Pc &= 152778 \text{kgf/m}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 θ 는 생성된 원호각, ρ 는 원호로 가정한 곡률반경, Al 은 크랭크 핀에서 배제되는 투사면적, Ac 는 크랭크 핀과 슬라이더의 실제 접촉면적, Pc 는 크랭크 핀에서의 접촉압력이다.

Fig.4에 스러스트 베어링과 저어널 베어링의 치수를 도시하였다. 스러스트 베어링에서의 접촉압력을 P_t 라 하고 로터의 무게를 F_s (약 3kgf)라 하면 다음과 같이 표시될 수 있다.

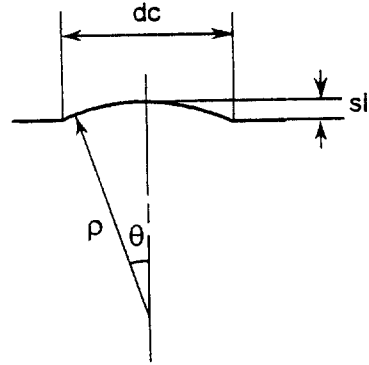


Fig.3 Exclusive Area of Crank Pin

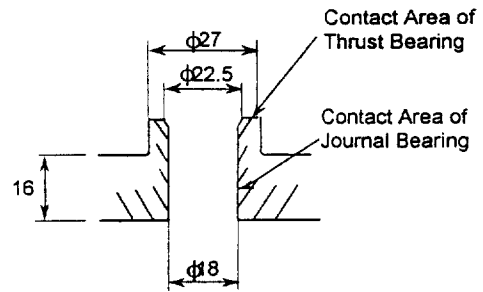


Fig.4 Thrust & Journal Bearing Dimensions

$$P_t = \frac{F_s}{\frac{\pi}{4} \cdot (dt_2^2 - dt_1^2)} = 17148 \text{kgf/m}^2 \quad (8)$$

이 값은 크랭크 핀에 비하여 약 1/10 정도의 접촉압력을 나타낸다. 저어널 베어링에서의 접촉면 압은 다음과 같이 주어진다.

$$P_j = \frac{F_p}{d_j \cdot l_j} = 148958 \text{kgf/m}^2 \quad (9)$$

압축기 마찰면을 검토한 결과 크랭크 핀과 저어널 베어링에서 보다 크게 나타났으며 약 150,000kgf/m² 정도를 나타내었다. 이 값은 정적인 압력이 작용할 때의 접촉압력이 된다. 실제 작동 시에는 저어널 베어링이나 크랭크 핀에서나 동일면에 단속적인 충격하중을 받게 된다. 따라서 실제 정적하중으로 환산한 접촉압력은 산출된 정적 접촉압력의 2배가 된다. 따라서 약 300,000kgf/m² 내외의 값을 압축기

작동 시의 정적 접촉압력 조건으로 간주하고 본 실험에서는 이 값을 기준으로 압축기 운전조건에 대한 실험조건을 조성하였다.

4. 실험장치

R-134a 및 냉동기유가 반응성이 큰 신 물질인 관계로 실험장치에 사용된 소재에 대한 안정성을 보장 할 수가 없다. 따라서 실험장치에 사용되는 재료들도 제작전에 적합성을 판별하여 대체냉매 혼합체 속에서 재료의 특성을 그대로 나타낼 수 있는지 여부를 판별하여야 한다. 이러한 재료의 안정성 실험은 실험장치에 사용되는 고분자 재료 및 금속에 대한 재료실험으로 안정성이 확인된 후 실험재료로 사용되어야만 한다.

냉동기유의 유효성을 측정하기 위해서는 냉매와 냉동기유가 섞여 있는 특별한 밀폐형의 실험공간이 필요하다. 또한 압축기에 사용되는 대부분의 기계 부품들은 면접촉을 하는 유효조건에서 사용되고 있다. 따라서, Fig.5와 같은 밀폐형 실험공간을 가지는 핀 온 디스크(Pin-on-Disk) 형태의 마모시험기를 제작하여 실험에 사용하였다.

마모시험기는 기본적으로 테이블, 디스크를 회전시키는 모터, 접촉부인 핀과 디스크, 냉동기유와 냉매의 혼합을 유지하는 밀폐형 실험공간, 마찰력을 측정하는 측정장치와 그리고, 실험을 위한 제어장치로 구성되어 있다. 스테인레스 강으로 만든 밀폐형 실험공간 내부에 시편인 핀과 디스크가 오일 저장소(Oil Reservoir) 내에 잠겨져 설치되어 있다.

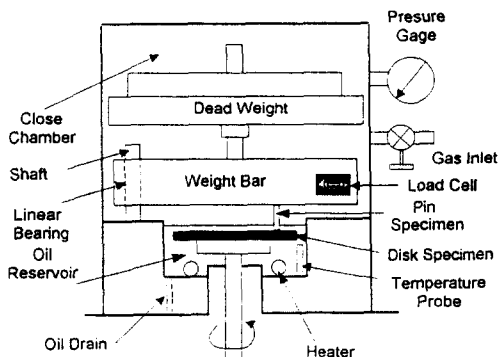


Fig.5 View of Close Type Chamber

오일 저장소(Oil Reservoir)에 냉동기유가 주입되고 핀과 디스크가 접촉한다. 냉매는 가스 주입구로 벽면에 부착된 압력계를 이용하여 일정량이 주입된다. 밀폐형 실험공간에서는 냉매가스의 누설이 큰 문제이다. 냉매 주입에 의한 실험공간의 내부에 고압이 형성되고 또 내부의 디스크가 외부의 모터의 구동축과 연결되어 회전한다. 모터의 구동축에서는 특수하게 제작된 마모시일(Wear Seal)을 2중으로 장착하여 밀봉을 유지하였다. 밀폐형 실험공간은 사각 케이스의 밀면에 홈을 가공하고 바이톤(Witon) 재질의 링을 장착하여 밀봉하였으며 벽면에 관측창을 설치하여 내부를 관측할 수 있도록 하였다. 냉매 주입 후 모든 접촉 부위에 비누 거품을 발라 냉매의 누출 여부를 확인한 후 모터를 회전시킨다. 디스크가 모터와 함께 회전하여 접촉된 핀과 마찰을 발생시킨다. 핀을 장착한 Bar는 마찰력에 의하여 축을 중심으로 회전하려고 한다. Bar(Bar)와 접촉한 로드셀(Load Cell)이 회전력을 측정하여 마찰력을 구한다. 하중은 미리 데드웨이트(Dead Weight)에 의하여 가해진다. 디스크의 구동은 AC 서보모터로 하는데 실제 필요한 소요 토크보다 월등히 큰 용량의 것을 사용하여 마찰력에 의한 디스크 회전속도의 변화를 방지하였다. 오일의 온도는 히터와 PID 온도 제어장치를 사용하여 유지하였다.

5. 실험재료 및 실험방법

5.1 실험재료

재료의 적합성 판별 실험에 사용된 금속재료는 주철, 구리, 알루미늄, 스테인레스강이고 이중 주철, 구리, 알루미늄은 압축기에 사용되는 재료이고 스테인레스는 실험장치에 사용되는 재료이다. 고분자 재료의 물성실험에는 실리콘(Silicon), 터르콘(Turcon), 바이톤(Viton), 일반 오-링(Normal O-Ring) 재료가 사용되었고 실리콘, 터르콘(Turcon), 바이톤은 실험장치에 사용되는 밀봉재료이고 오-링은 압축기에 사용되는 밀봉재료이다.

유효성의 측정실험에 사용된 유효유는 기존의 냉매인 R-12와 사용되는 냉동기유와 대체냉매인 R-134a와 사용이 가능하리라고 추천되는 냉동기

유의 두 가지로 크게 나누어진다. 기존의 냉동기유로는 나프타계의 광유, 알킬벤젠 및 PAO의 합성오일물, 그리고, R-134a용으로는 PAG 오일 및 두 종류의 에스테르 오일이 선택되었다. 광유는 ISO VG 점도 32, 68, 100 등급의 세 종류를 사용하였고 PAO와 알킬벤젠은 ISO VG 68등급을 사용하였다. R-134a용 냉동기유인 PAG는 40°C에서 75cSt의

점도를 갖는다. 또 에스테르 오일은 각각의 점도가 40°C에서 21.5cSt와 74.1cSt인 두 종류의 오일을 실험하였다. 특히, 광유는 현재까지 R-12와 문제없이 사용되어 온 우수한 냉동기유이므로 앞으로의 여러 냉동기유의 운환성 평가에 기준이 될 수 있다. Table 1에 본 실험에 사용된 냉동기유의 대표적인 물성치가 표시되었다.

Table 1 Material Properties Testing Oils

Property Oil Type		Viscosity cSt		Viscosity Index	Flush Point °C	Pour Point °C
		40°C	100°C			
Mineral Oil (R-12)	Naphthenes(A)	29.5	4.35	—	168.0	-42.5
	Naphthenes(B)	55.0	5.80	—	180.0	-40.0
	Naphthenes(C)	97.2	8.02	—	188.0	-30.0
Synthetic Oil (R-12)	Alkylbenzene	68.0	7.80	—	210.0	-40.0
	PAO	62.0	10.00	148.0	245.0	-54.0
Synthetic Oil (R-134a)	PAG	75.0	14.70	208.0	198.0	-30.0
	Ester(A)	21.5	4.60	133.0	239.0	-53.0
	Ester(B)	74.1	10.10	118.0	246.0	-35.0

5.2 냉매/윤활유의 수용성 실험

냉동기유 선정을 위한 실험에 반드시 확인되어야 할 사항이 냉매와 냉동기유와의 수용성(Miscibility)을 판별하는 실험이다. 수용성은 냉동기유의 사용가능성을 판단하게 하는 매우 중요한 물성치로 대체냉매의 성공적인 운환을 위하여서는 높은 수용성이 요구된다. 수용성은 여러 윤활유와 R-134a 냉매를 체적비로 약 5:5 정도 용기 안에 넣고 흔들어 놓은 후의 압축기 작동온도(약 70°C)까지 온도를 변화시켜 가며 혼합여부를 관찰하여 판별하였다. 또한 과도기적으로 기존 압축기에 설계변경이 없이 혼합냉매가 사용될 경우를 고려하여 기존 R-12 냉동기에 R-134a 및 윤활제가 첨가될 경우 R-12와 PAG, 에스테르의 수용성 여부도 판별하였다.

5.3 압축기 및 실험장치 재료에 대한 적합성 실험

실험용 금속재료와 고분자 재료들을 각각 R-134a/PAG 및 R-134a/에스테르 혼합체속에 넣고 압

축기 작동온도(약 70°C)까지 온도를 변화시켜 가며 약 3개월간 방치하여 금속부식 및 고분자 변질 여부를 관찰하였다. 본 실험에서는 간단히 육안 관찰로 판별하였으나 장기간의 안정성을 확보하고 정밀한 부식여부를 판별하기 위해서는 장기간의 밀봉관 시험(Sealed Tube Test)⁷⁾이 병행되어야 한다. 본 실험에서는 실험장치의 사용 기간이 1년 미만으로 육안 관찰 결과만으로도 실험기간 동안에는 장치에 문제가 발생하지 않았다.

5.4 마찰 마모 실험

윤활특성의 실험은 아래와 같은 운전조건하에서 냉매가 없이 냉동기유 자체의 마찰 및 마모 실험을 먼저 수행하였다. 그 후 같은 조건으로 냉매의 분위기에서 냉동기유의 마찰 및 마모 실험을 또한 수행하였다. 냉매의 분위기에서의 실험은 먼저 마모시험기내를 헹산으로 깨끗이 청소하고 건조기로 충분히 말려 수분을 제거한 후에 시작한다.

냉동기유는 마모시험기 내의 오일 저장소에 170 ml 정도 주입되고 냉매가스를 불어넣어 내부의 공기를 밀어낸 후 완전히 밀폐한다. 냉매가스는 1

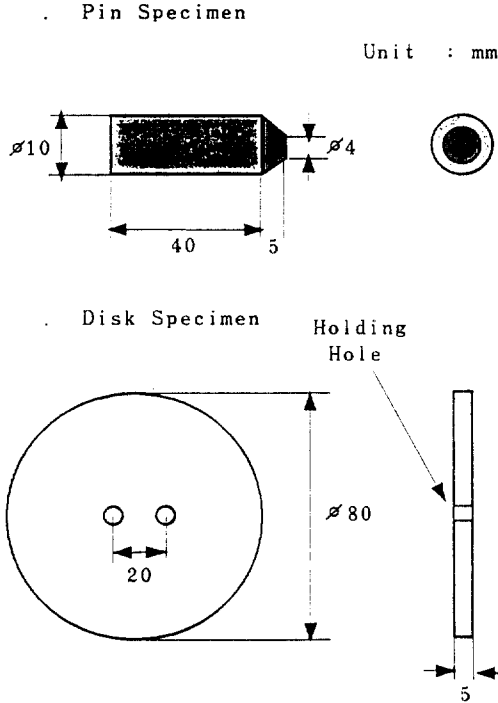


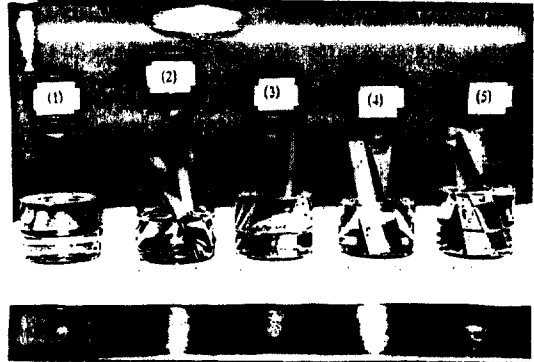
Fig.6 Pin & Disk Specimen

kg/cm²의 압력으로 4회 주입한다. 실제 실험시는 시간이 지남에 따라 냉매가 냉동기유 속에 용해되어 압력이 감소하였다. 모터를 회전시켜 마찰력을 측정한다. 실험조건은 실제 사용중인 압축기의 운전 조건에 가깝도록 노력하였다. 운전조건은 압축기 모델링 결과 및 운전조건을 기초로 결정하였다. 또한 경계윤활조건에서 냉동기유의 윤활특성을 파악하기 위하여 마찰 선속도를 0.31m/s로 낮추어서도 실험하였다. 하중을 높이어 실제 조건보다 가혹한 여러 조건을 정하여 윤활특성을 측정하였다. Fig.6에 실험에 사용된 시편의 형상을 도시하였다. 핀은 직경 4mm로 면접촉을 하며 핀의 상부에 설치한 데드 웨이트를 조절하여 접촉면압을 변경시킬 수 있다.

6. 실험결과 및 고찰

6.1 시험 냉동기유의 수용성 및 재료의 물성 실험

용해성 실험을 위하여 유리병 안에 윤활유와



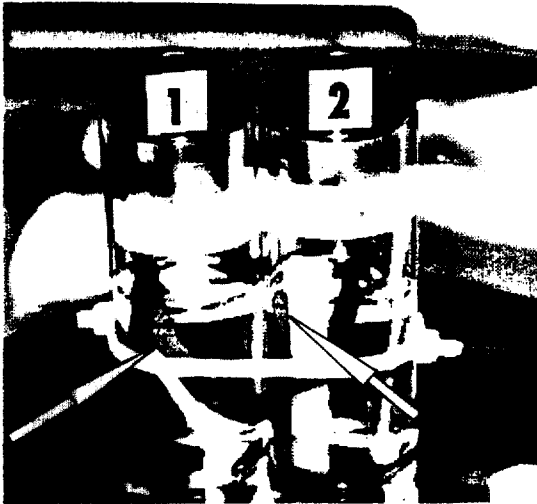
- (1) Mineral Oil/R-134a
- (2) PAG/R-134a
- (3) Alkylbenzene/R-134a
- (4) Polyol Ester/R-134a
- (5) PAO/R-134a

Fig.7 Specimen of R-134a/Oil Mixture

냉매를 주입한 샘플을 준비하였다. Fig.7에 성분별로 시험에 사용된 5종의 윤활유/냉매 혼합체의 용해되는 상황을 나타내었다. 같이 삽입된 금속조각은 실험장치 및 압축기에 사용되는 금속과의 반응성을 알아보기 위한 것이다.

여기에서 (1)은 광유/R-134a 혼합체이고 명확하게 상 분리가 나타나 2 상을 나타낸다. (2)는 PAG/R-134a의 혼합체로 완전수용이 이루어졌음을 알 수 있다. (3)은 알킬벤젠/R-134a의 혼합체로 명확하게 2상을 나타낸다. (4)는 에스테르/R-134a 혼합체로 완전 수용됨을 알 수 있다. (5)는 PAO/R-134a의 혼합체로 또한 명료하게 2상을 나타낸다. Fig.7의 사실로 미루어 보아 기존에 R-12용 냉동기유로 쓰이던 광유, 알킬벤젠, PAO 등은 R-134a와 사용할 수 없음을 알 수 있다. 또한 이 결과는 수용성의 측면에서, 본 실험에 사용된 PAG와 에스테르가 R-134a용 윤활제로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 금속과의 반응성 면에서 PAG와 에스테르가 R-134a와 수용을 이룬 상황에서 별 반응을 보이지 않았다. Fig.7에서 R-134a 혼합체 속의 금속재료는 약 3개월간 압축기 작동온도(약 70°C)에 방치한 결과 부식의 흔적을 발견할 수 없었다. 보다 정밀한 재료실험을 행하면 이들 금속간에 부식 정도의 차이를 발견할 수 있을 것이다.

Fig.8에 압축기 및 실험장치에 사용되는 고분자



Polymer : Silicon, Turcon, Viton, Normal O-Ring

- (1) PAG/R-134a
(2) Ester/R-134a

Fig.8 Compatibility of Polymer with R-134a Mixtures

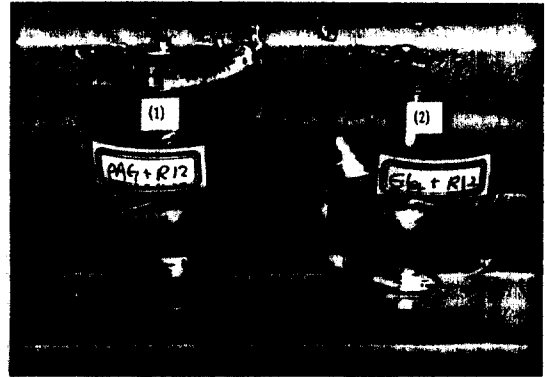
재료에 대한 반응성 여부를 사진으로 나타내었다. 각각 PAG/R-134a, 에스테르/R-134a가 혼합된 혼합체에 실리콘, 터크론, 바이톤, 일반 오-링 재료를 넣고 약 3개월간 압축기 작동온도에 방치한 결과 일반 오-링 재료에 변색과 함께 부식이 일어났음을 알 수 있었으며(Fig.8의 화살표 부분) 다른 재료에는 별 반응을 보이지 않았다. 따라서 본 실험장치에는 물론 R-134a를 사용하는 압축기에서도 일반 고무재료는 문제를 일으킴을 알 수 있다.

기존 R-12 냉매에 R-134a용 윤활제인 PAG 및 에스테르가 어떻게 작용하는지를 같은 방법으로 판별하였다. Fig.9에 이들 윤활제의 수용성 여부를 사진으로 표시하였다.

사진에서 보듯이 PAG 및 에스테르는 R-12와 완전수용을 이루는 것을 알 수 있다. 냉동기의 사용가능성의 측면에서만 본다면 R-12와 R-134a의 혼합냉매에서도 수용성의 측면에서는 냉동기유로써 추천될 수 있음을 알 수 있다.

6.2 시험 윤활유의 마찰력 분석

윤활유의 윤활성을 판별함에 있어서 냉매의 영향을 알아보기 위하여 R-12 용냉동기유로 실험을



- (1) PAG/R-12
(2) Polyol Ester/R-12

Fig.9 Specimen of R-12/Alternative Refrigerant Oil Mixtures

하였다. Fig.10에 R-12용 냉동기유인 팽유의 마찰력과 Fig.11에 합성유인 PAO, 알킬벤젠에 대한 마찰력 측정 결과들을 비교, 도시하였다.

실험조건은 하중이 4574g, 온도가 70°C, 마찰 선속도가 0.94m/sec이다. 각 그림에서 (a)는 냉매를 주입하지 않고 오일 자체의 마찰력을 측정된 것이고 (b)는 같은 조건으로 R-12 냉매를 주입한 후의 마찰력을 측정된 것이다. 경계윤활에서 R-12용 냉동기유는 약 0.04에서 0.07까지의 우수한 마찰계수를 가진다. 초기에 높은 마찰력은 시간이 지남에 따라 감소하여 거의 일정한 값을 갖는다. 이는 시편의 표면조도가 접촉운동에 의하여 점차 떨어져 일정한 값에 이르는 것으로 경계윤활이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 이론적으로 경계윤활에서는 점도의 영향은 거의 없고, 표면의 조건과 물리 화학적 피막 생성능력에 따라 마찰력의 크기가 변화한다. 합성유인 경우 팽유보다 윤활성 측면에서 우수한 성능을 나타내고 특히 PAG의 경우 매우 우수함을 윤활특성을 지님을 알 수 있다.

R-12를 주입한 마찰계수는 냉동기유 자체의 마찰계수 보다는 약간 낮은 0.02에서 0.07정도이다. 냉매의 주입은 냉동기유의 점도를 떨어뜨리지만 경계윤활에서는 이의 영향이 배제되므로 다음과 같은 두 가지의 원인으로 생각된다. 첫째, 35 기압 정도의 접촉압력에서는 표면변형이 적으므로 표면 돌기의 웨지(wedge) 효과로 마이크로 스케일의

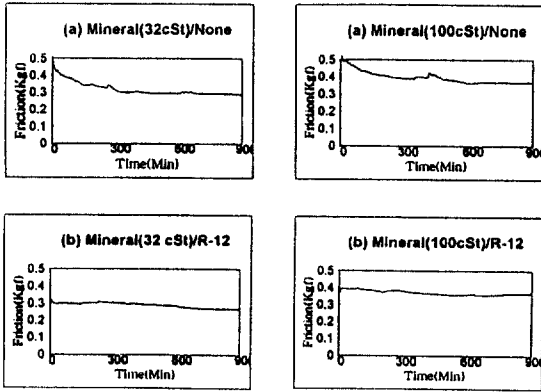


Fig.10 Friction of Mineral Oils at Compressor Operating Condition

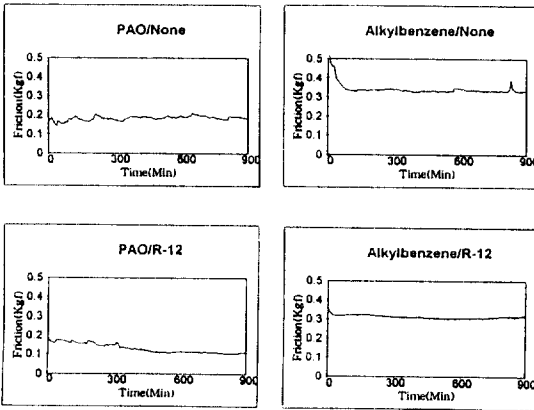


Fig.11 Friction of Synthetic Oils at Compressor Operating Condition

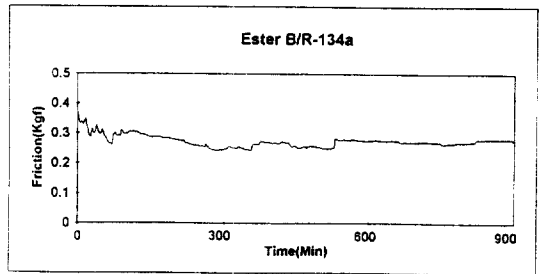
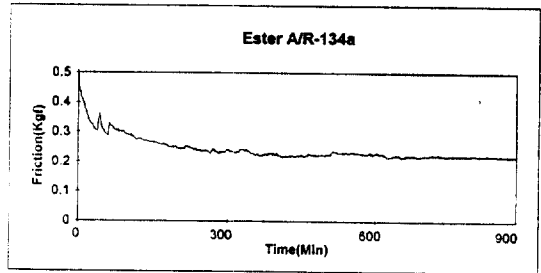
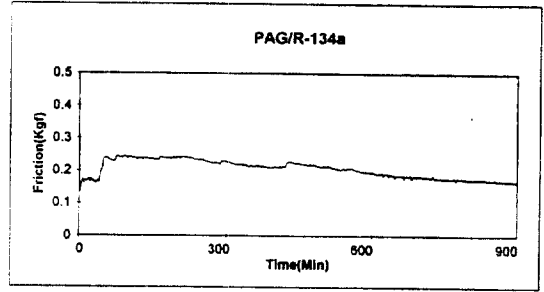


Fig.12 Friction of Oil/R-134a Mixtures at Compressor Operating Condition

유체윤활의 효과가 약간은 관련이 있다. 둘째, 더 큰 영향을 미치는 것은 R-12에 존재하는 염소에 의해 접촉부에 보호피막이 생성된 때문이다. 염소는 철(Fe)과 반응하여 접촉표면에 염화철(Iron Chloride) 코팅을 생성하는데 이는 마찰력 감소 및 내마모성 향상에 탁월한 효과가 있다. R-12 냉매는 접촉부의 피막형성 능력이 우수하여 냉동기유의 윤활성을 증대시키는 역할을 한다.

현재까지 널리 사용되어 온 R-12용 냉동기유의 결과를 윤활성의 기준으로 하여 동일조건으로 R-134a용 냉동기유를 실험하였다. R-134a를 주입하여 측정한 결과가 Fig.12에 나와 있다. 실험결과로 보면 R-134a용 냉동기유의 마찰계수는 0.04에서

0.06의 낮은 마찰계수를 가진다. 기존의 R-12용 냉동기유의 결과와 거의 차이가 없는 우수한 결과이다. R-134a는 염소성분을 수소로 치환한 것이므로 염화철 피막을 생성하지 못한다. 그러나 에스테르계 합성유는 R-134a용 냉동기유로 사용할시 첨가제의 작용으로 접촉표면에 인화물 컴파운드(phosphide compound)를 생성하여 고체 윤활 필름을 형성한다. 이 인화물은 극압 윤활제로 사용되는 것으로 R-12에 의한 염화철 피복효과와 같이 마찰력 및 마모감소에 탁월한 효과가 있다. 본 실험에 사용된 PAG도 압축기 작동 조건하에서는 R-12용 냉동기유보다 우수한 마찰력을 나타낸다. PAG에는 일반적으로 여러 성분의 첨가제를 포함

시킨다. 따라서 이러한 낮은 마찰력을 나타내는 이유가 인화물 첨가제에 의한 것인지 혹은 마이크로 스케일의 유체윤활을 향상시키는 윤활개선에 의한 것인지 확실치는 않다. 하지만 PAG 자체만의 윤활성은 매우 불량한 것으로 알려져 있기 때문에 보호피막 형성을 위한 첨가제를 다량으로 포함시키는 것으로 알려져 있다.⁵⁾

압축기 작동 조건에서의 윤활성만을 고려하면 본 실험에 사용된 PAG나 에스테르들이 모두 기존의 광유에서 보다 윤활성의 측면에서 우수한 성능을 보이므로 신냉매에 대한 압축기 설계변경만 이루어진다면 적어도 작동중에는 윤활에 관한 문제가 발생치 않을 것이다. 그러나 여기에서 반드시 고려되어야 할 사항이 압축기의 작동조건이 항상 일정하지 않다는데 있다. 냉동 압축기는 항상 작동중인 것이 아니라 온도에 따라 수시로 운전과 정지가 반복되고 실질적으로 대부분의 마모가 이러한 경계윤활 상태에서 발생하므로 압축기 작동 조건에서의 윤활성과 함께 경계윤활의 성향이 잘 나타날 수 있는 조건에서의 실험이 수반되어야 한다.

Fig.13에 광유(ISO VG 68 cSt)에 대하여 접촉 선속도 및 하중이 변화할 때의 마찰력과 마찰계수를 비교하였다. 유체윤활의 영향이 전혀 없다면 기본적으로 마찰계수는 전부 동일하여야 한다. 그러나 유체윤활에서는 유막 두께에 따라 마찰계수가 변화하게 된다. 면접촉의 경우에는 미소돌기에 의한 약간의 유체윤활이 포함되어 마찰력에 영향을 미치게 된다. 그 양이 어떻게 변화하는지 정량적으로 알 수는 없으나 0.94m/s에서보다 0.31m/s에서 마찰계수의 변화가 적은 것을 알 수 있다. 따라서 접촉

선속도가 낮을수록 경계윤활의 특성을 잘 나타낸다고 할 수 있다. 하중이 높아지면 경계윤활의 영향이 뚜렷해지지만 그렇다고 마찰계수가 증가하는 것은 아니다. 하중이 커지면 오히려 표면돌기를 무디게 하여 극압제로의 작용이 가능한 조건이 되므로 마찰력은 어느 정도 높아지지만 마찰계수는 떨어지게 된다.

PAG는 수분을 매우 잘 흡수하는데 수분은 마모를 증가시키는 치명적 요소이다. PAG/R-134a의 접촉부에는 FeOOH와 FeF₃가 생성되는데 이는 수분과 Fe, R-134a와 Fe가 반응한 것으로 접촉표면이 반응에 의하여 변질될 수 있음을 보여 주고 있다. PAG의 윤활성이 나쁜 가장 큰 이유는 염소에 의한 피막형성이나 인화물과 같은 자체윤활제의 생성능력이 없는데 있다. 따라서 PAG계 윤활제에는 원하는 조건에서 성능을 발휘할 수 있는 윤활성 향상에 관련된 첨가제가 반드시 포함되어야 한다. 따라서 PAG계 윤활유를 사용할 경우 압축기의 작동조건을 명확하게 규명하는 것이 무엇보다 중요하다. 그 이유는 압축기에 따라 각기의 작동조건이 다르기 때문에 어떤 압축기에서는 우수한 윤활성능을 발휘하는 냉동기유라도 구조가 다른 냉동기에서는 그만한 윤활성능을 발휘하지 못할 수도 있기 때문이다. 결국 신 냉매용 압축기에는 그 압축기에 맞는 냉동기유를 주문 제작하던지 아니면 각종 냉동기유 중에서 자사제품에 적합한 냉동기유를 선별하여 사용하여야 한다. 따라서 본 실험에서는 압축기 운전조건 이외에 온도, 접촉압력 및 접촉 선속도를 변화시켜 가며 그 윤활특성의 변화를 비교하여 보았다.

일반적으로 같은 실험조건에서 측정된 마찰력은 측정조건이 변하더라도 그 우열의 경향이 유지된다. 하지만 첨가제의 영향이 지배적일 경우에는 그 첨가제의 작용조건에서 우수한 성능을 나타내게 된다. 따라서 각 온도, 하중, 접촉 선속도에 따른 데이터 포인트를 설정하여 R-12에서의 마찰력과 비교하였다. 측정 포인트는 보다 가혹한 조건으로 경계윤활의 영향이 지배적이 되도록 하였는데 먼저 접촉선속도를 0.31m/sec로 낮추고 실험하여 여러 온도에서의 결과를 비교한 것이 Fig.14와 같다.

접촉 선속도를 낮게 하면 경계윤활의 특성이 보다 잘 나타내므로 0.94m/sec로 실험하였을 때 보다

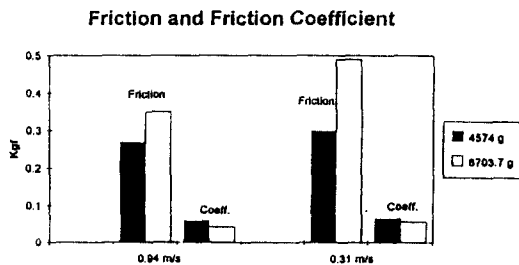


Fig.13 Effect of Contact Speed and Contact Pressure for Friction Measurement

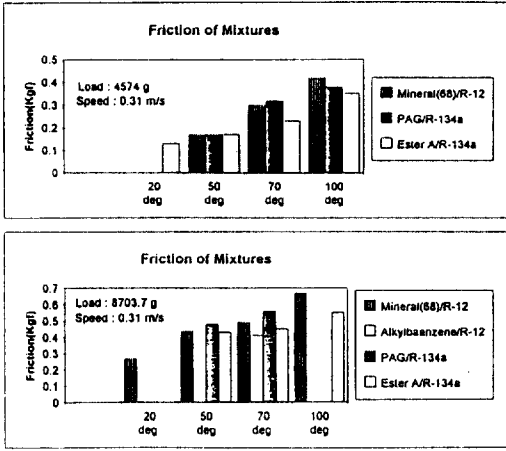


Fig.14 Friction Comparison of Oil/Refrigerant Mixtures

전체적으로 약간 큰 마찰력을 나타내었다. 측정된 온도범위에서 PAG/R-134a, 에스테르/R-134a 모두 기존의 광유/R-12 시스템에서와 유사한 마찰력을 나타내고 있다. 특히 주목할 변화는 PAG의 마찰력이다. 본 실험에 사용된 압축기의 운전온도가 약 70°C임을 고려할 때 광유와 에스테르는 접촉 선속도가 낮아짐에 따라 마찰력의 변화가 그리 크지 않으나 PAG 혼합체는 두드러진 마찰력 증가를 나타내고 있다. 여기에서 관찰할 수 있는 것은 광유/R-12나 에스테르 R-134a와 같이 자체 윤활막을 생성시킬 수 있는 냉동기유는 마찰력이 낮게 나타나지만 PAG와 같이 자체 피막형성능력이 없는 냉동기유는 마찰력이 크게 증가했음을 알 수 있다. 이는 PAG가 내마모 첨가제에 의해 윤활성이 개선된 것이므로 저속 운전 시와 같이 표면돌기에 의한 웨어 효과의 영향이 적고 접촉압력 또한 극압을 일으킬 만큼 크지 않은 운전조건에서는 극압첨가제의 영향이 감소하기 때문으로 생각된다. 일반적으로 윤활유에 첨가되는 내마모 첨가제는 극압개선편제이며 고온, 고압의 조건에서 작용을 한다. 그러나 마일드 웨어(mild wear) 영역에서는 큰 영향을 미치지 못한다. 경계윤활은 그리 고압접촉이 아니더라도 저속 운전이라면 발생한다. 즉, 이 PAG는 저속 운전시에는 첨가제의 효과가 없어 큰 마찰력을 나타내게 된다. 따라서 PAG를 사용한 냉동기는 정상 운전시에는 문제가 없지만 스타트 엔드 스톱

(start & stop)시에는 마찰손실에 따른 문제가 있을 것으로 생각한다. 이전의 실험에 비하여 접촉압력이 거의 2배에 달하는 8703.7g의 하중을 가하였을 때는 더욱 이러한 경향이 뚜렷하다. 즉, 광유나 알킬벤젠에 비하여 PAG의 마찰력이 큰 값을 나타낸다.

Fig.14를 관찰하면 온도가 낮아짐에 따라 마찰력의 차이가 작아짐을 알 수 있다. 마찰력은 온도가 낮아짐에 따라 낮아지는 경향이 있는데 이는 온도감소에 의하여 점도가 증가하여 유막생성에 유리하기 때문으로 사료된다. 유체윤활 성분이 커지면 앞에서 확인하였듯이 마찰력의 차이도 줄어들게 된다.

광유는 고온에서의 윤활성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 70°C이하의 온도에서는 매우 우수한 윤활성을 나타내지만 100°C에서는 두 조건에서 다같이 상대적으로 큰 마찰력을 나타내고 있다. 마찰력뿐만 아니라 열 안정성면에서도 광유는 합성유에 비하여 떨어지는 것으로 알려져 있다. 이러한 취약점 때문에 광유는 극한 조건에서 사용되기 어렵다.

실제 압축기에서는 측정될 만큼의 마모는 발생하지 않는다. 오히려 작동 시에는 유체윤활에 가깝고 스타트 엔드 스톱(start & stop) 시의 저속운전 구간에만 경계윤활이 발생한다. 따라서 냉동기유의 윤활성을 측정하는데에는 면접촉에 의한 실제 작동영역에서의 마찰력이 고려되어야 할 것이다. 또한 앞에서 거론한 바와 같이 냉동기유는 냉매의 종류에 따라 윤활성능이 바뀌므로 냉매가 포함된 상태에서의 마찰력을 측정하여야 한다. 특히 대체냉매로 사용되는 R-134a의 경우에는 더욱 그러하다. 이러한 관점에서 볼 때 실제 운전조건에서의 윤활성은 에스테르와 PAG가 모두 우수하지만 저속 경계윤활에 의한 마모를 감안한다면 에스테르계가 보다 우수한 것으로 사료된다. 접촉 형태가 다른 심한 극압 조건이라면 적절한 극압 첨가제가 포함된 냉동기유가 추천될 수 있을 것이다.

이제까지 대체냉매용 윤활제 선정에 관한 기본적인 특성 및 실험상의 중요 관점에 대하여 논의하였는바 이와 같은 실험은 실제 냉동기유 제조 회사나 냉동 압축기를 제조하는 산업 현장에서 적용이 가능하며 실질적인 도움이 되리라 생각한다. 아직까지 대체냉매에 관한 연구가 미진한 상황에서 산업체에 유용한 제안이 될 수 있으리라 생각한다.

7. 결 론

R-134a 냉매는 기존의 R-12 냉매를 대체하는 물질로 거의 확정이 되어진 상태이다. 그러나 R-134a 냉매를 압축기에 사용하는데에는 아직 해결해야 할 여러 문제가 있다. R-12 냉매와 잘 사용되어 온 광유나 알킬벤젠 및 PAO 등의 합성유는 R-134a 냉매에 적용이 불가능하다. 우선 기존 윤활유들은 R-134a 냉매와 용해성이 없어 사용되지 못한다. 현재까지의 자료에 의하면 R-134a 냉매에는 PAG계 및 에스테르계의 윤활유가 가능성이 있다고 알려져 있다.

본 실험에서는 R-134a 냉매용 냉동기유의 선정을 위한 기초적인 실험방법을 제시하였고 또한, 이를 기초로 확보된 냉동기유의 기본특성을 평가하여 보았다.

냉동기유의 기본 요구사항을 만족시키는데 대한 실험으로 R-134a에 대한 수용성을 실험하였고 각 사용 재료에 대한 적합성 여부를 간단하게 판별하였다.

윤활성을 실험실적으로 측정할 수 있는 밀폐형 마모시험기를 제작하였다. 실제 마찰력 측정에서는 윤활유에 포함된 첨가제의 작용 여하에 따라 그 값이 변화될 수 있다. 극압 첨가제가 포함된 윤활유는 극압 조건에서 그 자체의 성능보다 우수한 윤활성을 나타내게 된다. 따라서 극압 조건이 형성되는 기존의 윤활성 측정법으로 윤활유를 제조하였다면 우수한 마찰특성을 나타내기 위하여 극압 조건에서 성능을 개선시키는 방향으로 첨가제등이 배합될 것이다. 그러나 압축기의 기계부품은 대부분 유체윤활 상태에서 작동하도록 설계 제작되었으므로 윤활성의 크라이테어러이는 면접촉의 경계윤활 상태가 보다 합리적이라 사료된다. 밀폐형 마모시험기로 기존의 R-12용 냉동기유 및 확보한 R-134a용 냉동기유들을 가급적 압축기의 운전조건에서 상사시킨 운전조건에서 실험을 하였다. 압축기에 대한 해석을 통하여 운전조건을 산출하고 실험조건을 설정하였다. 실험에서의 작용하중은 접촉속도, 접촉압력을 달리하여 각 냉동기유의 윤활특성을 관찰하였다. 이와 같은 배경하에 측정된 실험결과 및 이에 대한 고찰은 크게 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 대체냉매인 R-134a는 기존에 R-12와 함께 사용되던 광유, 알킬벤젠, PAO와는 수용성이 없어 사용될 수 없다. 본 실험에 사용된 PAG와 에스테르는 기본적으로 R-134a와 수용성이 있다.

2) 기존의 압축기에 밀봉용으로 사용되던 고분자 재료 중 일반 고무재질의 O-Ring은 부식되어 사용될 수 없다.

3) 압축기 재료로 사용되는 금속재료는 단기적으로 실험한 결과 대체 냉매와 별 문제를 일으키지 않았다.

4) 압축기 운전조건에서와 상사조건으로 실험한 기본 실험에서 R-12용 냉동기유는 R-12와 섞여 있을 때 낮은 마찰계수를 보인다. R-134a용 냉동기유도 R-134a와 섞여 있을 때 거의 같은 정도의 마찰계수를 갖는다. 따라서 본 실험의 R-134a용 냉동기유는 압축기 운전조건에서의 윤활성 관점에서는 우수한 성능을 보이고 있다.

5) 실험조건을 바꾸어 압축기의 스타트 엔드 스톱(Start & Stop)시 형성되는 저속(접촉속도가 약 0.31m/s) 운전을 할 경우 PAG에서의 마찰력이 두드러지게 증가하였다. PAG에는 자체적으로 윤활 피막 생성능력이 없어 첨가제 등이 비교적 많이 함유되는데 저속, 저압의 경계윤활 상태에서는 이들 첨가제가 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 그 이유로는 기존 윤활유의 윤활성 평가에 사용되던 점 접촉 혹은 선 접촉 방식의 윤활성 평가로는 극압 상태에서의 개선만 가능하기 때문에 극압제 성분만을 첨가한 것으로 사료된다. 자체 윤활막 생성이 가능한 광유/R-12에서나 R-134a/에스테르의 경우에는 정상운전 조건에서보다 약간 큰 정도의 우수한 값을 나타내었다.

6) 접촉압력이 약 60기압 정도로 높게 한 실험에서도 PAG의 마찰력은 광유나 에스테르에 비하여 높게 나타났다. 이는 경계윤활의 영향이 더욱 커졌기 때문이다. 이때에도 에스테르는 광유와 거의 대등한 마찰력을 나타내었다.

7) 작동온도가 낮아지면 마찰력은 떨어진다. 이는 온도 저하에 따라 점도가 증가하여 유막형성에 유리하기 때문이라 생각된다. 따라서 고 점도의 윤활유가 윤활의 측면에서는 유리하다고 할 수 있다.

8) 광유는 일반 압축기 작동온도에서는 우수한

윤활성을 나타내지만 100도의 고온 실험에서 매우 큰 마찰력을 나타내고 있다. 열적 안정성 측면에서는 합성유인 PAG와 에스테르가 광유보다 우수한 특성을 나타낸다.

이상의 결과를 보면 R-134a용 압축기에는 설계시 부터 윤활조건을 감안하여 윤활유를 선택할 필요가 있다. 즉, 압축기 내의 접촉방식 및 윤활조건을 감안하여 적절한 기유(Base Oil) 및 첨가제를 선정할 필요가 있다. 본 실험에 사용된 냉동기유는 PAG의 경우 정상 운전조건에서 우수한 결과를 나타내었으며 경계윤활 조건에서는 윤활성이 저조한 것으로 평가되었다. 에스테르의 경우 일반 운전조건 및 경계윤활에서 우수한 윤활성을 나타내었고 보다 구체적인 실험이 진행중에 있다. 그러나 이러한 평가를 모든 냉동기유에 적용시킬 수는 없다. 그 이유는 PAG계 윤활유도 그 특성이 다양하고 에스테르 윤활유는 더욱 종류가 다양하여 심지어는 R-134a와 혼합성이 없는 것도 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서 밝히고자 하는 사항은 냉동기에서의 윤활성 측정방법을 확립하여 각 압축기 및 냉매에 맞는 냉동기유를 선별할 수 있도록 하기 위함에 있다. 냉동기유 제조회사에서는 윤활성 측정의 기준으로 표준 마모시험기를 사용하기 때문에 이러한 오일은 극압성 좋은 제품만 생산할 수도 있기 때문이다.

실제로 압축기에서의 사용을 위하여서는 충분한 데이터의 보강이 윤활유의 성능 및 신뢰성의 확보에 중요하다. 이를 위하여서는 압축기에 R-134a용 냉동기유를 넣고 냉동부하를 걸어 주면서 장기간 마찰 및 마모상태를 조사하여야 한다. 그러나 실험실적 방법은 일종의 시뮬레이션 실험으로 여러 사용 가능한 재료의 상대 비교를 목적으로 한다. 실제 방법(Field Test)을 이용한 윤활성 및 파손 정도의 측정에 앞서 본 논문에 제시된 시험법 및 냉동기유의 특성을 고려하면 제조업체에서의 냉동기유의 선정에 도움을 줄 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. K.Doys, Y.Aoki, and M.Onoyama, "Refrigerant Oil for Alternative Refrigerant-134a", 1990, Refrigeration, Vol.65, No.756, pp.47-52
2. E.G. Pita, Refrigeration Principles and Systems, John Wiley & sons
3. G.D Short, 1990, "Synthetic Lubricants and Their Refrigeration Applications", Lub. Eng., Vol.46, 4, pp.239-247
4. M.H. Knapp, 1972, "The Use of Synthetic Lubricants in Compressor", Purdue Compressor Tech. Conf. pp.480-482
5. S.G. Sundaresan and W.R. Finkenstadt, 1992 "PAG and Polyolester Lubricant Candidates for Use with HFC-134a in Refrigeration Compressors", ASHRAE Conference
6. G.D. Short, 1992, "high-Viscosity Ester Lubricants for Alternative Refrigerants", ASHRAE Conference
7. D. F. Huttenlocher, 1972, "Accelerated Sealed Tube Test Procedure for Refrigerant 22 Reactions", Purdue Compressor Tech. Conf.
8. W.D. Cooper, R.C. Dowing and J.B. Gray, 1974, "Alkylbenzene as a Compressor Lubricant", Purdue Compressor Tech. Conf., pp.88-94
9. K.S.Senvordenker and W.J.Gram, 1974, "Laboratory Testing under Controlled Environment Using a Falex Machine", Purdue Compressor Tech. Conf., pp.67-71
10. G.Tompsett, 1992, "Compatibility of Nonmetallic Materials with R-134a and Alternative Lubricants in Refrigeration Systems", ASHRAE Conference