

밀도계를 이용한 비추출식 냉동기유농도 측정에 관한 연구

An investigation on the in si · tu measurement of the oil-concentration with densimeter

김 상 현*, 김 창 년*, 박 영 무**
S. H. Kim, C. N. Kim, Y. M. Park

Key words : Concentration(농도), R-134a, Refrigerant oil(냉동기유), Specific gravity(비중)

Abstract

In order to predict thermodynamic performance of refrigeration system, it is required to know the oil concentration of the refrigerant/oil mixture. The current method to measure the oil concentration is to extract the working mixture and then to measure the oil weight. However, it is quite necessary to estimate oil concentration without any extraction of the working fluid. In this study a new method and working equation is presented as follows. It is based on the measurement of specific gravity and temperature :

$$C = a + b \times t + c \times t^2 + (d + e \times t + f \times t^2) \times SG$$

C is oil concentration, t is temperature(°C), SG is specific gravity of mixture and a~f is coefficients. The oil concentration ranges over 0~12 wt% and the temperature ranges over 20~50°C. The specific gravity and temperature are measured using the on-line densimeter and thermometer. This working equation enables to predict the oil concentration without any extraction of the mixture. This equation can be applied for R-12/Naphthenic oil and R-134a/POE oil oiquid mixtures.

기 호 설 명

a, b, c, d, e, f : 계수
A, B : 계수
b₀₋₈ : 계수
C : 오일의 농도

SG : 비중
t : 온도(°C)
T : 온도(K)
그리스문자
 θ : 온도의 무차원수

* 아주대학교 대학원 기계공학과

** 아주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

하첨자

ref : 기준

1. 서 론

일반적으로 증기압축식 냉동장치에서는 압축기를 구동시키기 위해서 반드시 적당량의 오일이 필요하다. 오일은 압축기 작동부위의 마모를 방지하고 수명을 연장하며, 마찰을 줄여서 소요동력을 최소화한다. 이러한 윤활 목적외에도 압축기 흡입과 토출측 사이에 압축된 가스를 봉입하고 냉각제로서 베어링으로부터 열을 제거하며 크랭크 케이스로부터 압축기 셸 밖으로 열을 전달하는 역할을 수행한다.

반면, 오일이 냉매에 혼합되어 열교환기나 팽창장치 등에 유입되면 각 장치의 성능이 변화하게 된다. 특히, 오일이 증발기에 유입되면 증발기에서의 열전달률이 변화되어 냉동장치 전체의 성능이 변화된다.⁽¹⁾

따라서 이런 현상을 정확히 이해하기 위해서는 냉동장치내로 순환하는 오일의 양을 알아야 한다. 이 오일의 양을 측정할 수 있는 방법에는 몇 가지가 있다. 그 중 가장 대표적인 방법이 ASHRAE STANDARD⁽²⁾에 기술되어 있다. 그러나 이 방법은 오일의 양을 측정하기 위하여 냉매/오일 혼합물을 추출하여야 하며 그 양 또한 많아서 사용중인 소형 냉동장치에 적용하기에는 비현실적이다. 이런 결점을 보완한 방법으로 비추출식 방법이 대두되었으며, 열·물리적 성질을 이용한 방법⁽³⁾과 전기 및 광학적 성질을 이용한 방법⁽⁴⁾등 여러 방법들이 제시되었다.

비추출식 방법의 대표적인 연구사례는 Baustian 등⁽⁵⁾의 연구 결과이다. 이들은 오일의 양을 예측하기 위하여 U관 밀도계를 사용하여 비중을 측정하였다. 냉매액이 구형되는 폐회로 실험장치를 제작하였고, 이들은 일정량의 냉매와 오일을 실험장치에 주입한 후 온도변화에 따른 밀도를 측정하여 혼합물의 밀도를 온도와 주입한 오일 농도의 함수로 표현되는 상관관계식을 제시하였다.

그러나 실제로 냉동장치에 일정량의 냉매와 오일을 주입하여 오일의 농도를 측정하면 유동중인 오일의 농도는 Baustian 등이 가정한 것과 같이 주입한 오일량을 기준으로 계산한 오일 농도와 같지 않았다.

그 이유는 온도에 따라 오일의 용해도가 다르며 회로내 어딘가에 오일의 일부가 축적될 가능성도 있기 때문이다. 따라서 오일농도를 측정할 수 있는 식을 구성하고 이를 검증하기 위해서는 가동중인 냉동회로에서 냉매/오일 혼합물을 추출하여 오일의 농도를 계산한 후, 비중과 오일농도 그리고 온도의 관계식을 구하는 것이 합리적이다.

따라서 본 연구의 목적은 밀도계를 이용하여 비추출식 방법으로 냉동장치내로 유동하는 오일의 양을 보다 정확히 예측할 수 있는 합리적인 상관관계식을 제시하는데 있다.

2. 실 험

2.1 냉매와 오일의 선정

실험에 사용된 냉매는 가정용 냉장고와 자동차용 공조장치에 사용해 오던 R-12와 그 대체냉매인 R-134a를 선정하였다. 또한 오일의 경우는 R-12와 함께 사용되어 왔던 Naphthenic 오일과 현재 R-134a와 함께 사용되고 있는 POE 오일을 선정하였다. 이들 오일의 물성은 Table 1과 같다.

2.2 실험장치

냉매의 액조건을 구현할 수 있고 오일의 농도, 온도, 압력 그리고 질량유량을 정밀하게 조절할 수 있는 폐회로 펌프구동 실험장치를 제작하였다.⁽⁷⁾ Fig. 1은 그 개략도 이다.

Table 1 Typical properties of oils for testing and evaluation

Class List	Naphthenic Mineral Oil	POE Oil
Products	RO 68	SOLEST 68
Specific gravity 20°C	0.905	0.945
Viscosity(cSt) 40°C	63.8	64.0
Flash point(°C)	193.3	296
Pour point(°C)	-37.2	-43.0
Specific gravity	SG=0.98193- 2.99489×10 ⁻⁴ ×T	SG=1.03307- 0.00026×T

실험장치는 크게 냉매순환펌프, 압력용기, 온도조절용 항온조, 오일주입 및 혼합물 채취장치, 용측기 등으로 구성되어 있다. 또한 온도조절용 항온조와 혼합물 채취장치사이에 밀도계가 설치되어 있으며 밀도계 입출구에는 온도와 압력을 측정하기 위하여 열전대와 압력변환기가 설치되어 있다. 또한 밀도계로 유입되는 냉매/오일 혼합물의 상태를 확인하기 위하여 관측경을 입출구에 설치하였다.

냉매순환펌프는 액상의 냉매-오일 혼합물을 순환시키기 위한 특수 플린저 펌프로서 유량은 토출압력이 30bar에서 최대 3 l/min이다. 구동모터는 용량이 1/2HP 3상으로 인버터를 이용하여 회전수를 조절할 수 있다.

압력용기는 장치의 제일 높은 곳에 설치하여 장치의 전체 압력을 조절할 수 있도록 하였으며 순환 펌프에 의해 발생하는 펄스를 완충시키는 완충기로서의 역할도 수행하도록 하였다. 그리고 압력용기의 측면에는 액주계를 설치하여 액의 양을 관측할 수 있도록 하였다.

오일 주입 및 혼합물 채취장치는 주입과 채취를 쉽게 하기 위하여 유로를 2개로 구성하였으며, 오일 주입 및 혼합물 채취를 위하여 75ml의 스테인레스강 실

린더가 사용되었다. 또한 채취한 혼합물에서 냉매를 제거하기 위하여 길이가 3m이고 직경이 9.525mm (3/8")인 테프론 관이 사용되었다.

용측기는 순환펌프의 입구에 설치하여 펌프에 항상 액만이 유입되도록 하였다.

실험에 사용된 밀도계(OVAL사)는 U관으로 되어 있으며 측정범위는 0~6.0g/cc이며 정밀도는 $\pm 0.002g/cc$ 이다. 밀도계는 오일의 농도가 낮을수록, 온도가 높을수록 정밀도와 감도가 떨어진다.

온도는 T형 열전대를 이용하여 실험장치 주요부분에서 측정하였으며, 압력은 Druck사에서 제작한 압력변환기를 사용하여 측정하였다. 압력변환기의 보정은 휴대용 압력보정기(DPI601)를 이용하여 자체적으로 수행하였다. 온도와 압력신호는 자료수집기와 PC사이에 RS-232C 통신을 이용하여 실시간 측정하였다. 계측장치에 관한 자세한 사항은 Table 2와 같다.

2.3 실험조건

일반적으로 가정용 냉장고회로 온도 범위는 $-23^{\circ}C$ 에서 $54^{\circ}C$ 이며, 자동차 에어컨은 $10^{\circ}C$ 에서 $40^{\circ}C$ 이다. 특히 용측기의 온도는 각각 $54^{\circ}C$ 와 $40^{\circ}C$ 정도이

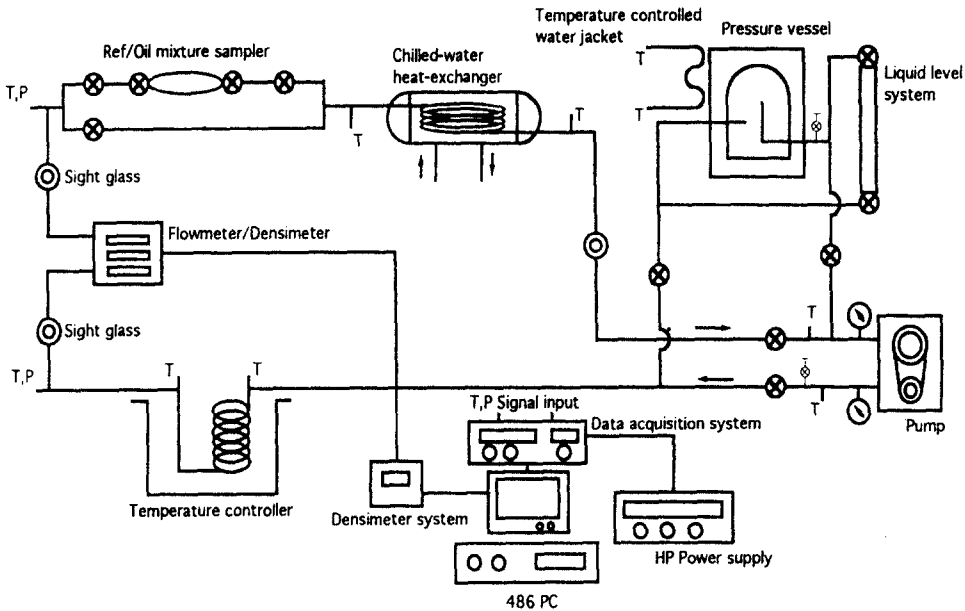


Fig.1 Schematic diagram of flow loop

Table 2 Specifications of measuring equipments

Equipments	Specification
Densimeter system	Model : DMS OVAL Electric Corp. Range : 0~6.0000g/cc Accuracy : ± 0.002 g/cc, 0.1 $^{\circ}$ C Output density&temp. : 4~20mA
Portable pressure indicator/calibrator	Model : DPI601, Druck Range : 70(mbar) to 35(bar)($\pm 0.05\%$ fs) Accuracy : 0.05%(35 to 75bar[0.1%])
Data acquisition terminal	Model : DA2500E Yokogawa Electric Corp. Range TC : -200 to 2315($^{\circ}$ C) Resolution TC : 0.1 to 0.2, RTD : 0.1 $^{\circ}$ C
HP-IB DC power supply	Model : HP 6674A Volt Ampere Output range : 0~60V, 0~35A Programming Accuracy : 60mV, 25mA
Micro motion mass flowmeter	Model : N25-1811KP, OVAL Range : 0~600g/h Accuracy : 0.1% of full scale

므로 실험온도 조건으로 20~50 $^{\circ}$ C를 택하였다. 또한 오일의 농도는 0~12% 범위로 설정하였다.

2.4 실험 방법 및 순서

먼저 정밀저울(Model F32000S, Sartorius, 정밀도 0.1g)을 이용하여 실험장치에 5~6kg의 냉매를 충전한다. 액주계에 액이 구현되어 있는지 확인한 다음 펌프 및 항온조 등을 작동시키고, 자료 수집기(DA 2500E)를 통하여 실험장치 전체의 온도 분포가 균일한지를 확인한다.

오일을 주입하기 전에 온도를 변화시켜가면서 냉매의 온도, 압력, 그리고 밀도를 측정하여 REFPROP⁽⁸⁾으로부터 계산한 비중과 비교하여 계측시스템의 보정치를 구한다. 다음, 오일주입기를 이용하여 오일을 주입한 후 온도를 20~50 $^{\circ}$ C 범위에서 5~10 $^{\circ}$ C 간격으로 변화시켜 가면서 혼합물의 온도, 압력, 밀도 그리고 오일의 농도를 측정한다. 오일의 농도는 온도, 압력, 밀도를 측정한 후 채취실린더를 이용하여 측정한다. 혼합물을 실린더에 채취한 후 질량을 측정하고, 실린더내의 냉매를 기체상태로 완전히 제거한 후 다시 질량을 측정하여 오일과 냉매의 질량을 계

산하여 오일의 농도를 계산한다. 오일 농도의 측정 오차를 줄이기 위하여 동일조건에서 농도를 여러번 측정한 결과 $\pm 0.1\%$ 의 오차를 보였다.

1차 오일 주입 후 오일을 조금씩 추가하여 원하는 오일의 농도까지 위의 과정을 반복 수행한다. 원하는 농도까지 실험을 수행한 후 냉매와 오일을 제거하고 세척제와 고압의 질소가스를 사용하여 실험장치 전체를 세척한다. 다음 새로운 냉매/오일 혼합물을 이용하여 위의 과정을 반복한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험장치 보정

밀도계의 보정은 1차적으로 기지의 저밀도 물질과 고밀도 물질을 이용하여 제작사에서 수행한다. 그러나 본 실험에서 측정된 순수냉매의 밀도와 REFPROP에서 계산한 순수냉매의 밀도에는 약간의 오차가 있었다. 그래서 순수냉매를 이용하여 밀도계를 2차 보정하였다. Fig.2는 그 결과를 보여주고 있다. 즉, 순수냉매 R-12와 R-134a에 대하여 온도변화에 따라 측정된 비중과 REFPROP으로 계산한 비중을 보여주고 있다. 각 순수냉매의 비중이 온도에 대하여 선형적으로 오차가 발생하였다. 이 오차는 밀도계, 온도계, 압력계 등에서 발생한 오차의 종합적인 결과라고 생각한다. 따라서 실제 측정된 혼합물의 비중에 시스템 오차를 보정하였다.

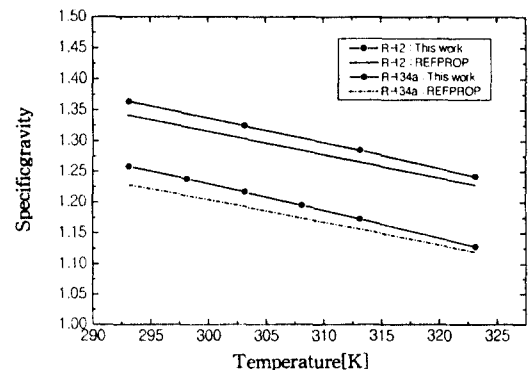


Fig.2 Comparison of specific gravity of the liquid refrigerant R-12 and R-134a with reference value

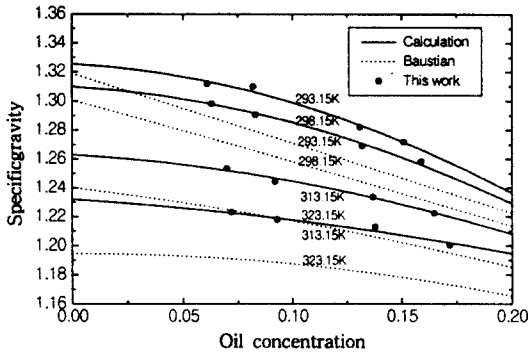


Fig.3 Comparison of specific gravity of calculation and Baustian for R-12/Naphthenic oil mixture

3.2 Baustian 등의 측정결과와 비교

Fig.3은 본 연구에서 측정된 R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물의 비중과 Baustian 등⁽⁵⁾의 연구결과 중 R-12/VG32(150SUS) Naphthenic 오일 혼합물의 비중을 비교하고 있다. 그림에서 실선은 본 연구에서 측정된 R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물의 자료를 Baustian등이 제시한 다음의 상관관계식에 적용하여 얻은 결과이며 점선은 Baustian 등이 제시한 R-12/VG32 Naphthenic 오일 혼합물의 계수를 이용하여 계산한 결과이다. Baustian등이 제시한 혼합물 비중에 관한 상관관계식은 다음과 같다.

$$SG = b_0 + b_1 C + b_2 \theta + b_3 C^2 + b_4 C \theta + b_5 \theta^2 + b_6 C^2 \theta + b_7 C \theta^2 + b_8 C^2 \theta^2 \quad (1)$$

여기서, $\theta = T/T_{ref}$, $b_i (i=1,8)$ =계수 그리고 온도(T)의 단위는 절대온도 K이며, T_{ref} 는 291.15K이다. 그리고 SG는 혼합물의 비중이고, C는 오일의 농도이다. 실험에서 사용한 두 오일의 비중과 점성이 서로 차이가 있으므로 정확하게 비교할 수는 없다. 그러나 정성적인 경향은 살펴볼 수 있다. 앞에서 기술하였듯이 Baustian 등은 유동중인 오일 농도와 주입한 오일농도가 같다는 가정하에 식을 구하였다. 그러나 실제로 오일농도는 동일한 오일의 양을 주입하였다 하더라도 온도에 따른 용해도 차이와 회로상에 축적될 가능성이 있으므로 오일농도가 같지 않다. 실제로 측정된 결과 오일농도의 차이가 확인되었다.

Table 3 Coefficients for equation (1) for R-12/Naphthenic oil mixture

Coefficients	Mixtures	
	Baustian VG 32	This work VG 68
b ₀	0.624438	2.28668
b ₁	8.662384	-0.05715
b ₂	2.407836	-0.99812
b ₃	-22.505005	-8.20542
b ₄	-21.507901	0.1030045
b ₅	-1.706437	0.04316325
b ₆	48.802555	-0.00002911
b ₇	12.346718	-0.128582
b ₈	-26.296189	6.31417
Correlation	0.99	0.99

일정온도에서 오일농도 변화에 따른 혼합물의 비중의 경향을 살펴보면, 293.15, 298.15, 313.15K의 경우, R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물의 경우 오일의 농도가 증가함에 따라 비중이 2차 곡선형태로 완만하게 감소하는 경향을 보이나 R-12/VG32 Naphthenic 오일 혼합물의 경우에는 1차 직선형태로 감소하는 경향을 보이고 있다. 참고로 오일의 농도가 0%일 때 즉 순수냉매 R-12의 경우 온도가 293.15K에서 REFPROP으로 계산한 비중은 0.3335 정도인데, R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물의 경우는 0.3325정도로 REFPROP의 계산값과 근사한 반면 Baustian등이 실험한 R-12/VG32 Naphthenic 오일 혼합물의 비중은 0.3195정도로 차이를 보이고 있다. 이것은 Baustian등이 실험측정치로부터 계산한 상관관계식의 계수가 주입한 오일농도를 기준으로 구성되었기 때문에 곡선을 연장하였을 때 생기는 오차가 커졌기 때문이라고 판단된다. 아울러 제측한 혼합물의 비중을 이용하여 식(1)로부터 오일농도를 계산하려면 복잡한 비선형식을 풀어야 하는 불편한 점이 있다.

Table 3은 R-12/VG68 Naphthenic 오일과 R-12/VG32 Naphthenic 오일 혼합물에 대하여 Baustian등이 제시한 상관관계식의 계수값들이다.

Table 4 Coefficients for equation (3)

Coefficients	Mixtures	
	R-12/naphthenic oil	R-134a/POE oil
a	-0.1404872	-0.02575
b	0.1521228	0.250795
c	-0.0008843	-0.0013572
d	0.2395017	0.11581
e	-0.1175216	-0.201888
f	0.0005615	0.00075974
Correlation	0.9868	0.9867

3.3 혼합물의 오일 농도 관계식

앞에서도 기술하였듯이 Baustian등이 제시한 상관관계식은 오일의 농도를 예측하는데 비선형방정식을 풀어야 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 유동중인 오일농도를 기준으로 구성하되, 보다 쉽게 오일의 농도를 예측할 수 있도록 새로운 상관관계식을 제시한다.

먼저 오일의 농도와 혼합물의 비중은 각 온도에서 대체로 선형적인 변화를 하기 때문에 다음과 같은 1차 관계식을 제안하였다.

$$C = A + B \times SG \tag{2}$$

여기서 C는 추출하여 계측한 오일농도이고, SG는 혼합액의 비중이며 A, B는 계수이다.

그리고 온도의 영향을 고려하여 혼합물의 비중과 온도를 독립변수로 하는 비선형식을 제안하였다. 따라서 최종 오일농도의 상관관계식은 다음과 같다.

$$C = a + b \times t + c \times t^2 + (d + e \times t + f \times t^2) \times SG \tag{3}$$

여기서 t는 혼합물의 온도이며 단위는 °C이다.

Table 4는 본 연구에서 측정된 R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물과 R-134a/VG68 POE 오일 혼합물의 온도, 오일의 농도 그리고 비중의 자료를 이용하여 계산한 상관관계식의 계수값들이다.

Fig.4와 Fig.5는 각각 R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물과 R-134a/VG68 POE 오일 혼합물에 대해서 식(3)으로 계산한 오일농도와 측정된 자료를 비교하고 있다.

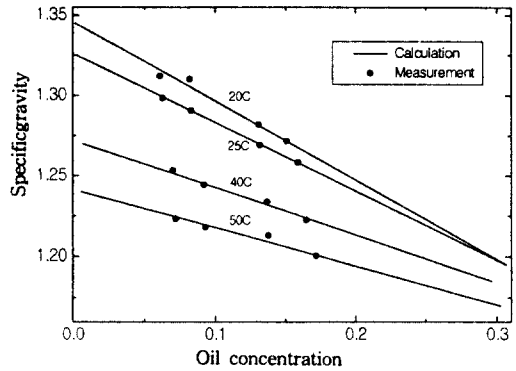


Fig.4 Best fit curve for R-12/VG68 Naphthenic oil mixture

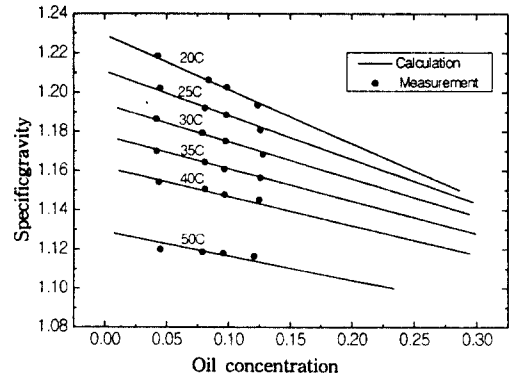


Fig.5 Best fit curve for R-134a/VG68 POE oil mixture

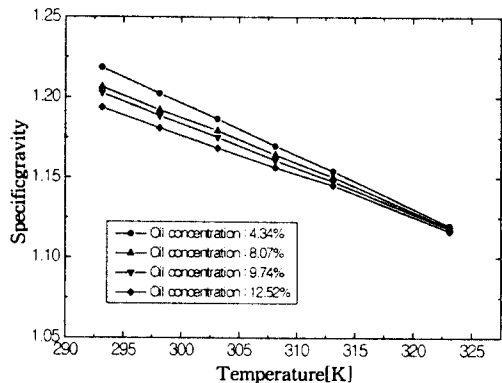


Fig.6 Specific gravity for R-134a/VG68 POE oil mixture with respect to temperature

식(3)의 상관관계식의 사용범위가 온도의 경우 20~50℃, 오일 농도의 경우 0~20%로 제한이 있으나 실제 냉동장치의 혼합물 온도와 오일온도를 충분히 고려하고 있으므로 오일/냉매 혼합물을 추출하지 않고 혼합물의 비중을 측정하여 위의 상관관계식에 대입하면 장치내에 유동하는 오일의 농도를 예측할 수 있다.

Fig.6은 온도변화에 따른 R-134a/VG68 POE 오일 혼합물의 비중의 변화를 보여주고 있다.

4. 결 론

냉동장치내를 유동하는 오일의 양을 비추출식 방법으로 예측할 수 있는 방법을 개발하기 위하여 냉동회로상에 밀도계를 설치하여 비중을 측정할 수 있는 냉매액구현 실험장치를 구성하고 R-12/VG68 Naphthenic 오일 혼합물과 R-134a/VG68 POE 오일 혼합물의 비중을 온도에 따라 측정하고 그 때마다 혼합물을 추출하여 오일의 농도를 확인하였다.

측정한 비중, 온도 그리고 오일농도를 이용하여 냉동장치내를 유동하는 혼합물의 비중과 온도를 독립변수로 하는 오일 농도에 관한 상관관계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$C = a + b \times t + c \times t^2 + (d + e \times t + f \times t^2) \times SG$$

이 상관관계식은 온도 20~50℃, 오일의 농도 0~20% 범위에서 유효하지만 실제 냉동시스템의 온도와 오일농도 범위를 포괄하고 있다. 따라서 이 식을 이용하면 냉동장치내의 혼합물의 비중과 온도를 측정하면 유동하는 오일의 농도를 예측할 수 있다. 또한 다른 혼합물의 경우도 본 연구에서 제시한 것과 유사한 오일농도에 관한 상관관계식을 이용하면 비추출식 방법으로 유동중인 오일농도를 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국 과학재단의 핵심전문연구 과제(과제번호 : 971-1006-034-1)로 수행되었습니다. 이에 재단의 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ASHRAE, 1994, "Lubricants in refrigerant system", ASHRAE HANDBOOK, Refrigeration Systems and Applications, Ch. 29.
2. ASHRAE, 1984, "Standard Method for Measurement of Proportion of Oil in Liquid Refrigerant", ASHRAE STANDARD, ANSI/ASHRAE 41.4.
3. J.J. Baustian, M.B. Pate and A.E. Bergles, 1986, "Properties of oil-refrigerant liquid mixtures with applications to oil concentration measurement : Part I - Thermophysical and Transport Properties", ASHRAE Trans., Vol. 92, pp.55~73.
4. J.J. Baustian, M.B. Pate and A.E. Bergles, 1986, "Properties of oil-refrigerant liquid mixtures with applications to oil concentration measurement : Part II - Electrical and Optical Properties", ASHRAE Trans., Vol. 92, pp. 74~92.
5. J.J. Baustian and M.B. Pate, 1988, "Measuring the concentration of a flowing oil-refrigerant mixture with a vibrating U-tube densimeter", ASHRAE Trans., Vol. 94, pp. 167~177.
6. 이윤우, 1994, "대체냉매용 냉동기유 개발현황", CFC 정보, 계간/통권 10호.
7. 황의필, 1997, "냉동기내에서 유동중인 오일농도의 비추출식계측에 관한 연구", 석사학위논문, 아주대학교.
8. Huber, M. Gallager, J., McLinden, M. and Morrison, G., 1996, "NIST thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixture(REFPROP), Version 5.0", National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA.