

대체냉매 R-407C와 R-410A를 사용하는 냉동시스템의 오일농도 예측에 관한 연구

A study on prediction of oil concentration in the R-407C and R-410A refrigeration system

이 종 문*, 김 창 년**, 박 영 무***
J. M. Lee, C. N. Kim, Y. M. Park

Key words: Concentration(농도), Oil(오일), POE, R-407C, R-410A, Specific gravity(비중)

ABSTRACT

A vibrating U-Tube densimeter has been evaluated as a sensor for measuring the concentration of oil in the liquid line of a refrigeration system. Calibration and performance tests were conducted under simulated liquid-line conditions for R-407C/POE oil and R-410A/POE oil mixtures in oil concentration from 0 to 15 weight percent. Test temperatures ranged from 20 to 50°C. As a result of test, oil concentration correlations are presented in terms of specific gravity at each constant temperature. These equations enable to predict the oil concentration without any extraction of the mixture, and can be applied for R-407C/POE oil and R-410A/POE oil mixtures.

기 호 설 명

a, b : 계수
 C : 오일의 농도
 SG : 비중
 t : 온도 [°C]

하첨자

id : 이상유체

1. 서 론

기존의 냉매가 지구의 온난화와 오존층 파괴에 영향을 미치는 환경오염물질로 인식된 이후 이들 냉매의 대체화에 대한 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구의 결과로 자동차 에어컨 등에 널리 사용되었던 R-12를 대신하여 R-134a가 사용되고 있다. 또한 가정용 에어컨에 상용되었던 R-22는 대체냉매 R-407C와 R-410A의 사용이 유력시 되고 있으며 이미 일본 및 미국의 에어컨 제조회사에서는 이들을 사용한 제품을 선보였다.^(1, 2)

대체냉매의 개발과 병행하여 필수적으로 수행해야 할 연구 과제는 대체냉매에 적용할 수 있는 새로운 오일을 개발하는 것이다. 증기압축식 냉동시스템의 압축기를 구동하기 위해서는 적당량의 오일이 필요하다. 이 오일은 작동하는 면 사이에서 얇은 막을 형성하여 고체사이의 직접적인

* 아주대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 아주대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부

마찰을 줄이고 마찰계수를 낮추어 줌으로서 압축기의 마찰을 줄이고 마모를 최소화한다. 그러나 실제 압축기에서는 냉매와 오일이 같이 섞여 압축기의 윤활작용을 수행하게 된다. 이 때 오일이 냉매와 함께 혼합되어 냉동시스템을 순환하게 되면 열교환기나 팽창장치의 성능에 영향을 끼친다. 특히 증발기에서는 냉매와 오일이 분리되어 오일이 증발기에 쌓이게 되며, 결과적으로 냉동시스템의 성능을 변화시키게 된다. 따라서, 증기압축식 냉동사이클의 성능을 좀 더 정확하게 예측하기 위해서는 실제 냉동시스템에서 순환하는 오일농도를 예측할 필요가 있다.

기존의 연구결과를 살펴보면 Kiyoharu 등⁽³⁾은 자외선을 이용하여 자동차 에어컨 내를 유동중인 오일농도를 실시간으로 예측하는 연구를 수행하였다. 냉매/오일 혼합물이 자외선을 흡수하는 성질을 이용하였으며 정확도는 10% 이내였다. Grebner와 Crawford⁽⁴⁾은 R-12/나프텐계 오일 혼합물과 R-134a/합성오일 혼합물에 대한 상평형 실험을 실시하여 이들의 상호 열역학적 성질들을 예측할 수 있는 실험식을 개발하였다. Hughes와 McMullan⁽⁵⁾은 냉매/오일 혼합물의 압력-온도 관계들을 실제 증기 압축식 냉동 사이클 해석에 적용하였으며, 그 결과 오일의 첨가는 증발기 용량을 떨어뜨리고 압축일을 증가시켜 시스템의 COP의 감소를 야기 시킴을 밝혀냈다. Bian 등⁽⁶⁾은 HFC 냉매에 광유의 적용 가능성에 대한 연구를 수행하여, 냉매의 유속이 증가하면 압축기로의 오일귀환이 증가하는 것을 보고하였다. 그러나 광유를 실제로 사용하기 위해서는 HFC 냉매와 광유의 윤활성 및 열적인 안정성에 대한 연구가 필요하다고 언급하고 있다. Baustian 등^(7, 8)은 냉매액관에서 오일농도를 예측할 수 있는 연구를 수행하였다. 이 연구를 수행하기 위해 냉매액관을 구현할 수 있는 실험장치를 제작하였으며 진동하는 U관 밀도계를 이용하여 냉매/오일 혼합물에서 오일의 농도를 예측하였다. 그러나 이들은 실제로 장치내를 유동하는 오일의 농도가 아니라 초기에 장치내에 주입한 오일의 양을 기준으로 냉매/오일 혼합물의 온도와 밀도를 측정하여 이들간의 상관관계식을 제시하였다. 따라서 주입한 농도와 실제로 유동하는 오일의 농도에 차이가 있을 때에는 이 식의 유효성에 의문이 생길 수 있다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 U관 밀도계를 이용하여 냉매/오일 혼합물의 오일농도와 온도를 변화시키면서 비중을 측정하여 오일농도와 온도 변화에 따른 혼합물의 비중 변화를 살펴보고 또한 추출식 방법으로 냉매/오일 혼합물에서 오일농도를 측정하여 냉매/오일 혼합물에 대하여 실제 냉동시스템에서 순환하는 오일농도를 예측할 수 있는 비중-농도-온도 상관 관계식을 제시하고자 한다.

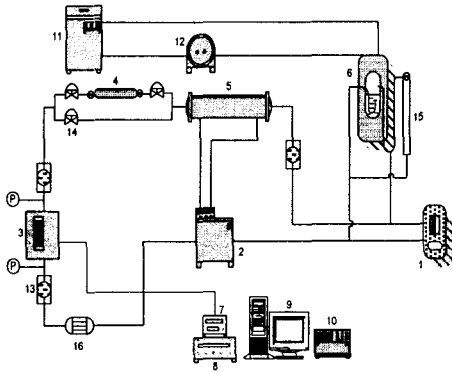
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

냉매가 항상 액체 상태로 유동할 수 있는 폐회로 펌프구동 실험장치를 제작하였다. Fig. 1은 본 실험장치의 개략도이다. 펌프구동 시스템의 장점은 펌프구동에 사용되는 오일이 시스템 내를 유동중인 냉매/오일 혼합물의 농도에 영향을 미치지 않는 것이다. 실험장치는 크게 냉매순환펌프, 압력용기, 온도조절용 항온조, 오일주입 및 혼합물 추출장치, 열교환기 등으로 구성되어 있다. 또한 온도조절용 항온조와 혼합물 추출장치 사이에 밀도계를 설치하였으며 밀도계 입구와 출구에는 온도와 압력을 계측하기 위하여 열전대와 압력변환기를 설치하였다. 밀도계로 유입되는 냉매/오일 혼합물의 상태를 확인하기 위하여 관측경을 밀도계의 입구에 설치하였다. 냉매순환 펌프는 액상의 냉매/오일 혼합물을 순환시키기 위한 특수 플런저 펌프로써 유량은 토출압력이 30 bar에서 최대 3 l/min이다. 구동모터는 용량이 1/2 HP 3상으로 인버터를 이용하여 회전수를 조절할 수 있다.

압력용기는 장치의 제일 높은 곳에 설치하여 장치의 전체 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 압력용기의 온도조절은 온도조절용 항온조를 사용하였다. 압력용기는 순환펌프에 의해 발생하는 펄스를 완충시키는 완충기로서의 역할도 수행한다. 그리고 압력용기 측면에 액주계를 설치하여 실험장치내의 냉매액의 구현을 관측할 수 있도록 하였다.

오일주입 및 혼합물 추출장치는 주입과 추출이 용이하도록 2개의 유로로 구성하였으며 오일주입과 추출을 위하여 75 ml의 스테인레스강 실린더를 사용하였다. 추출한 혼합물에서 냉매를 분리



| | | | |
|---|---------------------------|----|---------------------------|
| 1 | Pump | 9 | Computer |
| 2 | Constant Temperature Bath | 10 | Data Acquisition System |
| 3 | Flowmeter/Densimeter | 11 | Constant Temperature Bath |
| 4 | Oil Injector/Sampler | 12 | Water Circulation Pump |
| 5 | Heat Exchanger | 13 | Sight Glass |
| 6 | Pressure Vessel | 14 | Valve |
| 7 | Density Monitoring System | 15 | Liquid Level Gauge |
| 8 | HP Power Supply | 16 | Filter Dryer |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

해 내기 위하여 길이 15 cm, 직경 9.525 mm(3/8 in)의 동관을 실린더에 연결하였으며 이 동관 내부에 면화를 넣어서 오일과 냉매를 분리하는데 사용하였다.

실험장치의 온도를 조절하기 위해서 항온조를 펌프 출구에 설치하였으며 열교환기를 이 항온조와 연결하여 장치의 온도 변화를 최소화하였다. 냉매/오일 혼합물의 밀도 및 온도측정은 U관 밀도계(OVAL)로 측정하였다. 밀도측정의 정밀도는 $\pm 0.002 \text{ g/cc}$ 이며, 온도측정의 정밀도는 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 이다. 밀도계의 보정은 기지의 저밀도 물질(예, 공기)과 고밀도 물질(예, 물)을 이용하여 제작사에서 수행하였으며, 물을 이용한 유량측정 실험결과 그 오차범위는 $\pm 0.15\%$ 이내였다. 시스템의 질량유량은 Coriolis효과를 이용한 질량유량계를 이용하여 측정하였으며 정밀도는 0.1 kg/h 이다. 실험장치 주요부분의 온도는 T형 열전대를 이용하

Table 1 Specifications of measuring equipments

| Equipments | Specification |
|-----------------------------|---|
| Densimeter system | Model : DMS Range : 0~6.0000 g/cc Accuracy : $\pm 0.002 \text{ g/cc}$, 0.1°C Output density & temp. : 4~20 mA |
| Data acquisition terminal | Model : DA2500E Range TC : $-200\sim 2315^\circ\text{C}$ Resolution TC : 0.1~0.2 RTD : 0.1 |
| HP-IB DC power supply | Model : HP 6674A Output range : 0~60 V, 0~35 A Programming accuracy : 60 mV, 25 mA |
| Pressure transmitter | Model : PDCR 922 Range : 60bar abs Supply : 10V DC Accuracy : 0.2% of full scale |
| Micro motion mass flowmeter | Model : N25-1811KP Range : 0~600 kg/h Resolution : 0.1 kg/h |

여 측정하였다. 압력은 정밀도가 12 kPa인 Drunk사의 압력변환기를 사용하여 측정하였으며, 보정은 정밀도 1.8 kPa의 휴대용 압력보정기를 사용하여 보정하였다.

온도와 압력은 자료수집기와 PC사이에서 RS-232C통신을 이용하여 실시간 측정하였다. 각 실험장치의 제원은 Table 1과 같다.

2.2 실험조건 및 방법

실험에 사용된 냉매는 R-407C와 R-410A이다. 오일은 이들 냉매와 같이 상용되고 있는 POE (Polyolesters) 오일을 사용하였다. 이 오일은 화학적 안전성, 윤활성, 혼화성이 우수한 합성오일이다. 냉매와 오일에 대한 물성은 Table 2와 Table 3에 제시한 것과 같다. 실험온도 조건은 냉동시스템에서 냉매가 액체 상태로 존재할 수 있는 $20\sim 50^\circ\text{C}$ 로 정하여 10°C 간격으로 실험을 수행하였다.

실험순서는 다음과 같다. 먼저 실험장치에 냉

Table 2 Typical properties of refrigerants⁽¹⁰⁾

| Refrigerant Title | R-410A | R-407C |
|---------------------------|--|--|
| Critical Temperature (°C) | 85 | 87 |
| Composition (wt %) | R-32/R-125 (50/50) Azeotropic Mixture | R-32/R-125/R-134a (23/25/52) Non-azeotropic Mixture |

Table 3 Typical properties of oil

| Oil Title | POE oil |
|---------------------------|-----------|
| Product name | SOLEST-68 |
| Specific gravity (@ 20°C) | 0.957 |
| Viscosity(cSt) (@ 40°C) | 64 |
| Fire Point(°C) | 296 |
| Pour Point(°C) | -43.0 |

매를 5~6 kg정도 주입한다. 이때 냉매의 질량은 정밀도 0.1 g의 정밀저울(Sartorius Factory F3200)로 측정한다. 압력용기 외부에 부착된 액주계로 장치내에 냉매/오일 혼합물이 액체로 존재하는 것을 확인하고 항온조를 이용하여 원하는 실험온도를 설정한다. 펌프를 구동하고 실험장치내의 온도가 균일하게 분포되었는지 확인한다. 온도를 20~50°C 영역에서 10°C간격으로 변화시키면서 냉매에 대한 온도, 압력 그리고 비중을 측정하여 REFPROP⁽¹⁰⁾으로 계산한 비중값과 비교하여 오차를 보정한다. 냉매에 대한 실험이 끝나면 오일주입기를 이용하여 실험장치에 오일을 주입한다. 오일 주입 후 온도를 변화시키면서 혼합물의 온도, 압력, 비중을 측정한다. 각 온도마다 측정이 끝나면 혼합물 추출기를 이용하여 실험장치에서 혼합물을 추출하고 정밀저울을 이용하여 질량을 측정한다. 추출기에 냉매분리기를 설치하고 밸브를 서서히 열면서 냉매를 추출기에서 제거한다. 냉매를 완전히 제거한 후 잔류오일의 질량을 측정하여 혼합물 중의 오일농도를 계산한다. 오일주입농도를 15%까지 변화시키면서 위의 실험을 반복한다. 한 종류의 오일에 대해 실험을 마친 후 냉매와 오일을 실험장치에서 배

출시키고 실험장치를 세척한다.

실험장치의 세척은 우선 고압가스(공기 혹은 질소)를 이용하여 실험장치 속에 잔류하고 있는 냉매와 오일을 고압으로 밀어낸다. 다음 실험장치를 진공시킨 후 실험장치에 세척제를 주입하여 실험장치를 운전시켜 세척한다.

3. 결과 및 고찰

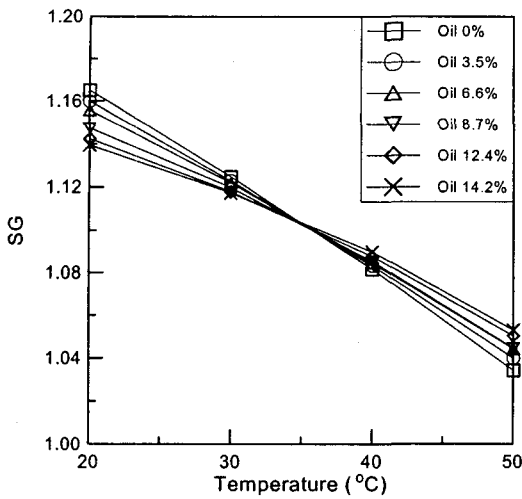
3.1 온도변화에 따른 비중의 변화

Fig. 2의 (a)와 (b)는 오일의 농도와 온도 변화에 따른 냉매/오일 혼합물의 비중 변화를 나타낸 것이다. R-407C/POE 오일 혼합물의 경우 비중 변화가 20과 30°C에서는 오일농도가 증가할수록 감소하며 35°C에서는 비중변화의 변곡점이 생기며, 40과 50°C에서는 오일농도가 증가하면 혼합물의 비중도 증가하는 경향을 보였다. R-410A/POE 오일 혼합물의 경우도 R-407C/POE 오일 혼합물과 같은 경향을 볼 수 있었다. 그러나, 오일농도의 변화에 따른 비중의 변화 폭은 R-407C/POE 오일 혼합물의 변화 폭 보다 작게 나타났다.

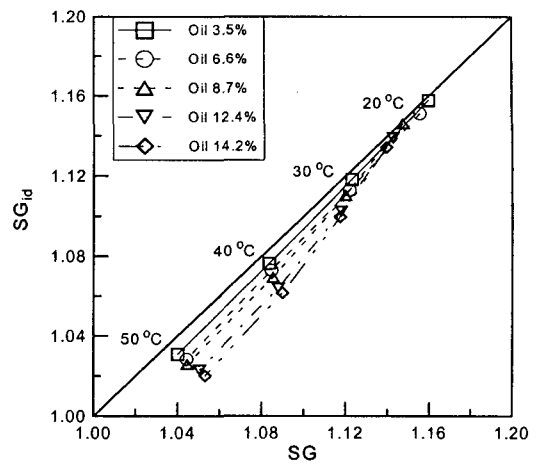
오일의 농도변화에 따른 혼합물의 비중 변화의 경향이 온도에 따라 다르게 나타나는 이유는 R-407C와 R-410A를 구성하고 있는 단일냉매들의 비중과 POE오일의 비중을 비교해 보았을 때 R-32의 비중이 20°C에서는 POE 오일보다 크지만 30°C이상에서는 오히려 작기 때문으로 보인다. 김상현 등⁽⁹⁾이 실험한 단일냉매 R-134a와 R-12의 실험결과에서는 오일의 농도가 증가하면 혼합물의 비중은 실험온도영역에서 일정하게 감소하는 경향을 볼 수 있었다.

3.2 혼합물의 이상거동 이탈도

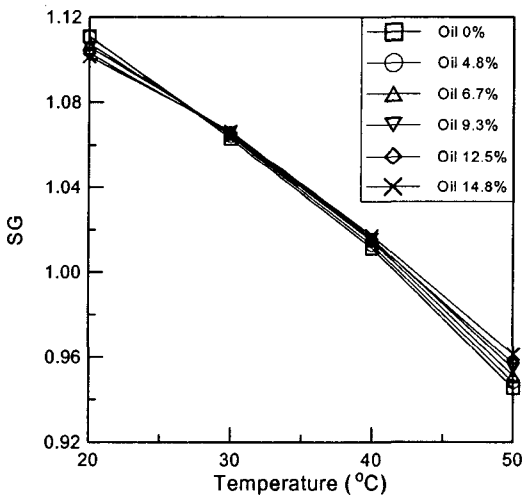
이상 혼합법칙을 이용하여 냉매/오일 혼합물의 이상거동 이탈도를 계산해 보았다. Fig. 3(a)는 R-407C/POE 오일 혼합물의 이상거동 이탈도를 나타낸 것이다. 오일의 농도와 온도가 증가할수록 혼합물의 이상거동 이탈도는 증가하였다. Grebner와 Crawford⁽⁴⁾가 실시한 냉매/오일 혼합물의 상평형 실험에서도 오일의 농도와 온도가 증가할수록 이탈도는 증가하는 결과를 볼 수 있



(a) R-407C/POE oil mixture

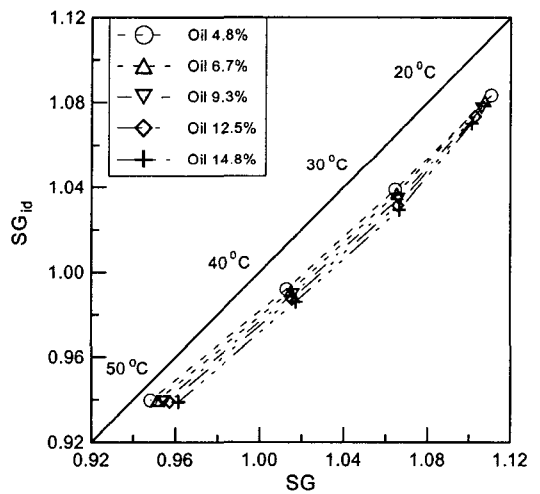


(a) R-407C/POE oil mixture



(b) R-410A/POE oil mixture

Fig. 2 Specific gravity-temperature data.



(b) R-410A/POE oil mixture

Fig. 3 Deviation from ideal behavior.

었다. Fig. 3(b)는 R-410A/POE 오일 혼합물의 이상계동 이탈도를 보여주고 있으며 오일의 농도가 증가할 수록 이탈도가 증가하는 것을 알 수 있다.

3.3 혼합물의 오일농도 상관 관계식

냉동시스템 내의 오일 농도를 예측할 수 있는 상관 관계식을 제시하기 위하여 U관 밀도계를

이용하여 냉매/오일 혼합물의 오일농도와 온도를 변화시켜 가면서 비중을 측정하였으며 추출식 방법에 의해서 오일농도를 측정하였다.

실험 자료를 이용하여 모든 영역에서 사용할 수 있는 비중-농도-온도 상관 관계식을 제시하려고 하였으나 R-407C/POE 오일 혼합물과 R-410A/POE 오일 혼합물에서는 그러한 관계식을 구하기가 매우 어려워 온도별로 비중-농도 상관 관계식을 다음과 같이 제시하였다. 관계식은

실험자료를 이용하여 1차 다항식으로 근사화한 것이다.

$$C = a + b \cdot SG \quad (1)$$

여기서, C는 오일의 농도이고, a, b는 계수이며, 실험자료를 이용하여 최소자승법으로 구하였다. 각각의 혼합물에 대한 계수값을 Table 4에 제시하였다.

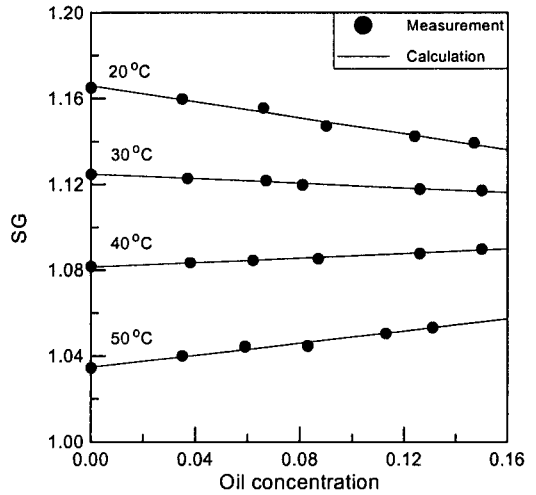
만약 실험에서 측정된 온도 이외의 온도에서 오일농도를 예측하기 위해서는 내삽법을 사용하면 된다.

Fig. 4 (a)와 (b)는 온도와 오일농도 변화에 따른 혼합물의 비중 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 점은 측정 데이터이며 실선은 상관 관계식으로 계산한 값이다. R-407C/POE 오일 혼합물의 경우 30~40℃영역에서는 오일농도의 변화에 따른 혼합물의 비중변화가 매우 작음을 알 수 있다. 반면 20℃와 50℃에서는 농도변화에 따른 혼합물의 비중변화가 선형적으로 나타나고 있다.

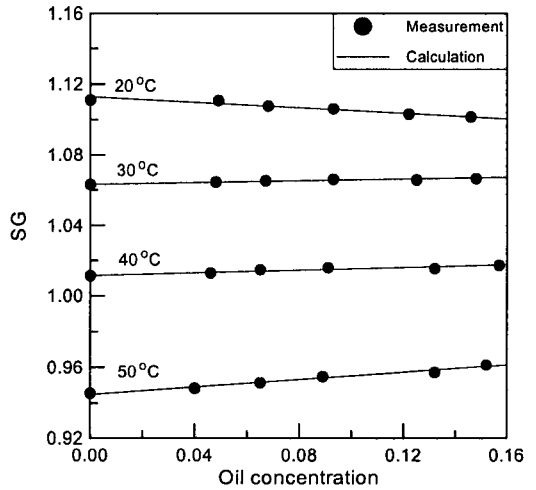
R-410A/POE 오일 혼합물의 비중변화도 R-407C/POE 오일 혼합물과 유사한 비중변화를 보여주고 있다.

4. 결론

냉매/오일 혼합물의 오일농도와 온도의 변화에 따른 비중 변화를 살펴보기 위하여 냉매가 항상



(a) R-407C/POE oil mixture



(b) R-410A/POE oil mixture

Fig. 4 Best-fit curves of specific gravity with oil concentration for refrigerant/oil mixtures.

Table 4 Coefficients for equation 1

| Mixtures | Temperature | Coefficients | |
|-------------|-------------|--------------|----------|
| | | a | b |
| R-407C /POE | 20℃ | 6.25752 | -5.36651 |
| | 30℃ | 20.9957 | -18.6645 |
| | 40℃ | -20.1207 | 18.6072 |
| | 50℃ | -7.33885 | 7.09302 |
| R-410A /POE | 20℃ | 14.2087 | -12.7687 |
| | 30℃ | -44.5623 | 41.9086 |
| | 40℃ | -25.7572 | 25.4672 |
| | 50℃ | -8.99445 | 9.5213 |

액체 상태로 유동할 수 있는 실험장치를 구성하여 대체냉매 R-407C 및 R-410A와 이들 냉매와 사용되는 합성오일인 POE 오일에 대하여 실험을 수행하였다.

오일농도의 변화에 따른 혼합냉매/오일 혼합물의 비중 변화는 순수냉매/오일 혼합물의 비중변화와 다른 경향을 보였다. 즉 R-407C/POE 오일

혼합물의 경우, 20과 30℃에서는 오일농도가 증가할 수록 혼합물의 비중은 감소하였으나 40과 50℃에서는 증가하였다. 비슷하게 R-410A/POE 오일 혼합물의 경우도 20℃에서는 오일농도가 증가할수록 혼합물의 비중은 감소하였으나 30, 40, 50℃에서는 증가하였다.

실험에서 측정된 혼합물의 비중과 오일농도를 이용하여 냉매/오일 혼합물에 대하여 각 온도별로 비중-오일농도 상관 관계식을 제시하였다. 이상관계식은 실제 냉동시스템에서 유동중인 냉매/오일 혼합물의 오일농도를 예측하는 데 사용될 수 있을 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. 정동수, 1996, 신냉매 개발 동향, 공기조화 냉동공학, 제25권, 제6호, p. 479.
2. 김만희, 박윤서, 1996, 신냉매 적용 냉동공조기기 개발동향, 공기조화 냉동공학, 제25권, 제6호, p. 489.
3. Kiyoharu Kutsuna, Yoshimitsu Inoue, and Takehito Mizutani, 1991, Real Time Oil Concentration Measurement in Automotive Air Conditioning by Ultraviolet Light Absorption, SAE Trans., VOL. 100.
4. Grebner, J. J., and Crawford, R. R., 1992, The Effects of Oil on the Thermodynamic Properties of Dichlorodifluoromethane(R-12) and Tetrafluoroethane (R-134a), ACRC TR-13.
5. Hughes, D. W., and McMullan, J. T., 1982, Pressure Enthalpy Charts for Mixtures of oil and refrigerant R-12, International Journal of Refrigeration, Vol. 5, No. 4, pp. 199-202.
6. Bian, F. R., Michels, H. H., Siemel, T. H., and Pandey, D. R., 1996, Study of Lubricant Circulation in HVAC Systems, United Technologies Research Center.
7. Baustian, J. J., Pate, M. B., and Bergles, A. E., 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.
8. Baustian, J. J., Pate, M. B., and Bergles, A. E., 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.
9. 김상현, 김창년, 박영무, 1997, 밀도계를 이용한 비추출식 냉동기유 농도측정에 관한 연구, 공기조화·냉동공학회 동계학술대회 논문집, pp. 333-338.
10. NIST, 1998, REFPROP Version 6.00, Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology.