

CO₂ 압축기의 운전조건과 오일토출의 상관분석에 관한 실험적 연구

이 익 수, 강 병 하^{*†}

국민대학교 대학원, *국민대학교 기계시스템공학부

An Experimental Study on Correlation between Oil Discharge and Various Operating Conditions of a CO₂ Compressor

Ik Soo Lee, Byung Ha Kang^{*†}

Graduate School, Kookmin University

^{*}School of Mechanical Eng., Kookmin University

(Received March 17, 2010; revision received December 11, 2010)

ABSTRACT: A portion of oil for lubrication of compressor flows together with refrigerant in the refrigeration system. If the oil discharge from a compressor is increased in the refrigeration system, not only pressure drop is increased in other components, such as evaporator and gas cooler, but also heat transfer coefficient in the heat exchangers is decreased. Oil discharge rate from a compressor may strongly depend on operating conditions of a compressor. In this study, one stage single rotary compressor is employed for measuring oil circulation ratio(OCR). Carbon dioxide and PAG oil are used as refrigerant and lubricant. Using a U-tube densimeter, mixture density is measured. Oil circulation ratio(OCR) can be estimated by measured mixture density. The results obtained indicate that the oil circulation ratio(OCR) is increased as the suction temperature or compressor operating frequency is increased. Oil circulation ratio(OCR) correlation of the compressor is also suggested.

Key words: Oil Circulation Ratio(오일순환율), PAG oil(PAG 오일), Density(밀도), Carbon dioxide(이산화탄소)

기 호 설 명

하첨자

OCR : 오일순환율 [%]
f : 운전주파수 [Hz]
T : 압축기 흡입온도 [°C]

mix : 혼합물
o : 오일
r : CO₂ 냉매

그리스 문자

ρ : 밀도 [g/ml]

1. 서 론

일반적으로 증기압축식 냉동장치에서는 압축기를 구동시키기 위해서 반드시 적당량의 오일이 필요하다. 오일은 압축기 작동부위의 마모를 방지하고 수명을 연장하며, 마찰을 줄여서 소요 동력을 최소화

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

화한다. 이러한 유효목적 이외에도 압축기 흡입과 토출 측 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 냉동시스템 전체의 성능이 저하된다.⁽¹⁾

정상상태의 냉동시스템 내를 순환하는 오일/냉매 혼합물의 오일순환율은 시스템 내에 적체되어 있는 오일의 양이 일정하다고 가정하면 압축기에서의 오일토출량과 같다. 따라서 각 운전조건에서 사이클 내를 순환하는 오일농도는 압축기 내에서 압축과정이 진행되는 동안에 냉매와 오일의 상태변화와 압축기의 운전조건에 따라서 결정된다고 할 수 있으며, 적절한 오일순환율과 오일회수의 신뢰성을 확보하기 위해서는 이에 대한 연구가 필요하다.⁽²⁾

압축기의 오일토출량에 관한 기존의 연구를 살펴보면, 압축기 내부의 메카니즘을 규명하기 위하여 가시화 기법을 이용한 연구가 다양하게 진행되었다. Cho et al.⁽³⁾은 압축기의 오일토출량에 대한 정량적인 데이터를 확보하기 위하여 로터리 압축기 내부의 오일거동을 분석하기 위한 테스트 모델을 제작하여 여러 조건에 따른 오일토출량을 CCD 카메라를 이용하여 측정하였고, 실제 압축기에 가시화 부를 설치하여 압축기 출구의 압력과 온도에 따른 오일토출량을 분석하였다. 가시화 기법을 이용한 다른 연구로서 Toyama et al.⁽⁴⁾는 스크롤 압축기에서 오일입자의 거동현상을 가시화기법을 이용하여 측정하였다. 본 연구에서는 압축기 모델의 상부와 하부 및 오일냉매 혼합물의 토출배관에 가시화 부가 설치된 압축기 모델을 제작하였고, 오일입자의 크기와 속도 및 오일유동에 따른 오일순환율의 관계를 분석하였다.

Dreimen and Bunch⁽⁵⁾는 트윈 로터리 압축기를 이용하여 오일분리기를 장착했을 때와 하지 않았을 때의 오일토출량을 비교하였고 운전주파수의 변화에 따른 유량과 압축기 토출온도의 관계를 분석하였고, Navarro et al.⁽⁶⁾은 냉매로서 R290을 사용하는 왕복동식 압축기를 이용하여 증발온도와 응축온도를 변화시키며 압축효율의 변화를 측정하였다. 또한 R407C와 R209를 사용하는 다른 종류의 압축기를 이용하여 증발온도, 압축비, 압축방식을 변수

로 적용하여 그에 따른 체적효율, 냉각능력, 오일순환율의 변화를 측정 및 계산하였다.

압축기의 내부의 오일토출에 관한 메카니즘 분석뿐만 아니라, 오일토출량을 줄이기 위해 압축기의 구성요소들을 개선하고 그에 대한 수치해석 결과를 통하여 Ogata et al.⁽⁷⁾는 압축기의 피스톤 접촉면적과 길이의 최적설계와 오일/냉매 혼합물의 분리를 위해 판형 분리커버를 부착함으로써 오일토출량을 감소시킬 수 있다는 결과를 나타내었고, Christen et al.⁽⁸⁾는 로터리 압축기를 이용하여 다양한 흡입압력과 토출압력의 변화 및 압축비의 변화에 따른 압축기의 오일토출량, 체적효율 및 소요동력 대하여 측정을 하였고 또한 왕복동식 압축기와와의 비교를 통하여 정량적인 데이터를 제시하였다.

본 연구에서는 자연냉매인 이산화탄소를 사용하는 로터리 압축기를 이용하여 압축기의 흡입온도와 운전주파수에 따른 오일/냉매 혼합물의 밀도 변화와 오일순환율을 측정하고, 이를 토대로 압축기의 오일토출량의 변화를 예측할 수 있는 상관관계식을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

폐회로 시스템에서 냉매/오일 혼합물이 액체 또는 기체 상태로 혼합되어 유동할 수 있게 시스템을 설계 제작하였다. 본 연구의 실험 장치는 초월임계 사이클을 갖는 CO₂ 냉동시스템을 모사하였다. 또한 높은 임계 압력을 갖는 CO₂ 냉매의 특성을 고려하여 실험 장치의 각 부분을 고압 피팅으로 연결하였다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 CO₂ 압축기, 가스쿨러, 팽창밸브, 증발기모델, 질량유량계 그리고 밀도계로 구성된다. 본 실험에 사용된 압축기는 CO₂를 냉매로 사용하는 1단 압축 로터리 방식으로서 A모델인 3.5 kW급과 B모델인 10.4 kW급의 두 제품을 사용하였다. CO₂ 냉매를 응축시키기 위해 에틸렌글리콜/물을 브라인으로 사용하는 냉 향온조 순환부를 가스쿨러로 이용하였으며, 팽창효과를 위해 팽창밸브를 설치하여 시스템내의 저압부를 형성하였다. 압축기 흡입부측에는 전기가열기를 이용하여 증발기모델을 제작하고 냉매로의 열전달을 위해 가변전압기를 이용, 전압을 조정하여 온도를 설정하였다. 시스템 각 부분

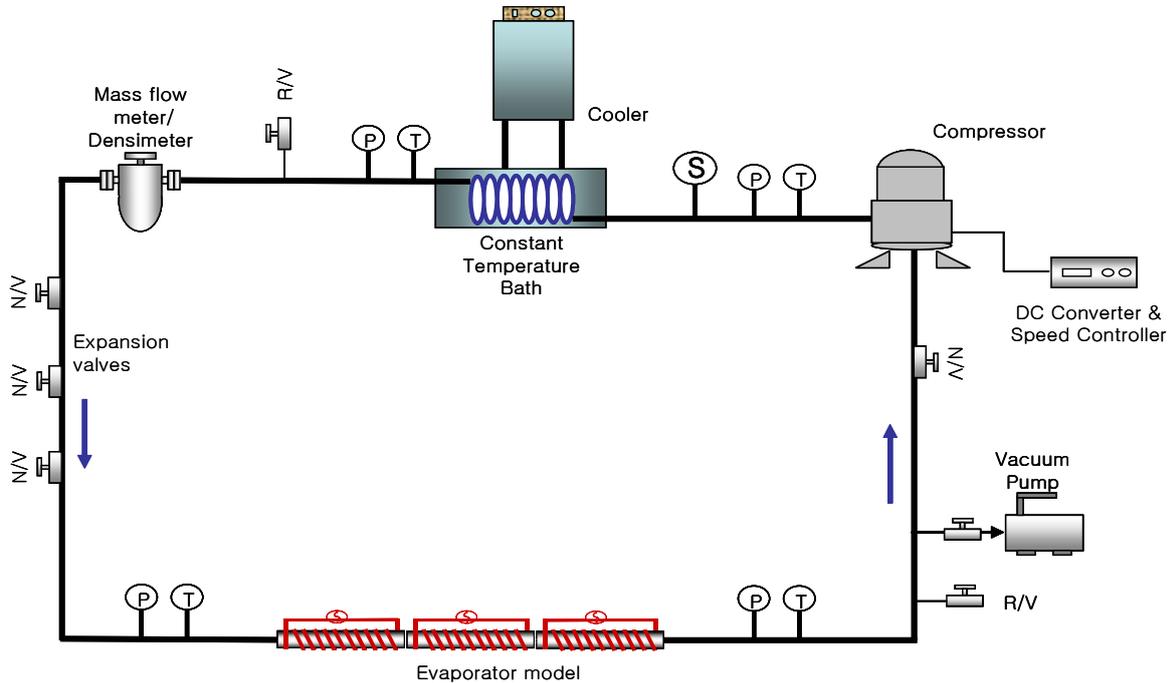


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

의 압력과 온도를 측정하기 위해 압력센서와 T-type 온도센서를 장착하였고, 데이터 취득 시스템 (Yokogawa DR-230)을 이용하여 데이터를 취득하였다. 온도센서의 오차범위는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이고, 압력측정센서의 측정범위는 0~13.8 MPa, 허용오차는 $\pm 0.1\%FS$ 이다. 또한 압축기에서 토출되는 오일/냉매 혼합물의 밀도와 질량유량을 측정하기 위해 본 실험에서는 U-tube 밀도계/질량유량계(Oval model CN010G-HY-200R)를 이용하였다. 질량유량 측정범위는 0~20 kg/min, 허용오차는 $\pm 0.1\%FS$ 이며, 밀도 측정범위는 0~10 g/ml, 정확도는 ± 0.002 g/ml이다.

2.2 실험조건 및 방법

실험에 사용된 오일은 CO₂ 냉매와 상용되며 극성

Table 1 Typical properties of oils

Items	Property
Type	PAG oil
Manufacturer	Idemitsu Kosan Co.
Model	PZ-100S
Specific gravity at 15°C	1.007
Pour point(°C)	-40
Flash point(°C)	232
Viscosity at 40°C(cSt)	102.7

냉동기유인 PAG(Poly Akylene Glycol) 오일을 사용하였다. 이 오일은 화학적 안정성, 유통성이 우수한 합성오일이다. Table 1에 본 연구에서 사용한 오일에 대한 물성을 표기하였다. 실험의 조건으로서 압력조건은 흡입압력 3.0 MPa, 토출압력 9.0 MPa로 설정하였고 압축기의 흡입온도는 0~15°C 범위 내에서 5°C 간격으로 실험을 수행하였다. 또한 운전 주파수에 따른 밀도변화를 측정하기 위해 인버터를 이용하여 45~63 Hz의 범위 내에서 실험이 수행되었다.

실험방법은 초기에 CO₂를 관내에 충전하기 전에 진공펌프를 이용하여 관내를 충분히 진공으로 유지한 후 적절한 양의 냉매를 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 압력차를 이용하여 주입시켰다. 냉매 주입 후 액압축을 방지하기 위해 증발기모델을 예열시킨 후 압축기의 주파수를 인버터를 이용하여 구동시켰다. 그 후 인버터의 출력을 조절하여 압축기의 설정주파수를 설정하였고, 흡입온도를 조정하기 위해 증발기 모델에 가변전압기를 이용 420~500 V의 전압을 인가하여 압축기의 흡입온도를 설정하였다. 시스템 가동 후 정상상태가 되었을 때 유동중인 오일/냉매 혼합물의 온도, 압력, 밀도와 질량유량을 측정한다.

압축기의 오일토출량(정상상태인 경우 시스템의 오일순환율)을 결정하기 위해 본 연구에서는 혼합

물의 밀도를 이용한 관계식(1)을 제시하였다.

$$OCR = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_{mix}} = \frac{\dot{m}_{mix} - \dot{m}_r}{\dot{m}_{mix}} = 1 - \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_{mix}} \quad (1)$$

$$OCR = 1 - \frac{\rho_r}{\rho_{mix}} \quad (2)$$

여기서 오일의 체적유량은 냉매의 체적유량에 비해 미소한 크기를 가지고 있으므로 해당 압력과 온도에 해당하는 순수냉매의 체적유량은 유동중인 혼합물의 체적유량과 같다는 가정을 하면 오일순환율(OCR)은 식(2)와 같이 된다. 본 관계식에서 순수 이산화탄소의 밀도는 NIST webbook의 Thermophysical Properties of CO₂⁽⁹⁾를 이용하였다.

CO₂/오일 혼합물의 밀도를 측정하여 OCR을 계산한 결과에 대한 불확실성 해석을 위해 본 연구에서는 식(3)을 이용하였다. 실험을 통하여 측정된 CO₂/오일 혼합물밀도의 측정 불확실성은 ±0.42%으로 나타났다. 이 값은 각 측정기기의 오차와 불확실성 확대계수를 고려하여 계산하였다.

$$\frac{\Delta OCR}{OCR} = \left[\left(\frac{\partial OCR}{\partial \rho_{mix}} \frac{\rho_{mix}}{OCR} \frac{\Delta \rho_{mix}}{\rho_{mix}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축기의 운전주파수에 따른 오일토출량 변화

Fig. 2는 압축기의 흡입온도를 0°C ~ 15°C 범위에서 일정하게 유지하면서 압축기의 운전주파수를 변화시켰을 때 냉동시스템 내에서 순환하고 있는 오일/냉매 혼합물의 밀도를 나타내고 있다. A 모델의 경우 흡입온도가 10°C로 유지되었을 때 오일/냉매 혼합물의 밀도를 측정해보면 운전주파수가 45 Hz일 때 0.899 g/ml, 운전주파수가 58 Hz일 때 0.904 g/ml, 운전주파수가 63 Hz일 때 0.906 g/ml로 측정되었다. B 모델의 경우 흡입온도가 10°C로 유지되었을 때 오일/냉매 혼합물의 밀도를 측정해보면 운전주파수가 45 Hz일 때 0.917 g/ml, 운전주파수가 50 Hz일 때 0.919 g/ml, 운전주파수가 58 Hz일 때 0.921 g/ml, 63 Hz일 때 0.922 g/ml로 측정되었으며 더 자세한 수치는 Table 2와 Table 3에 제시하였다. 혼합물의 밀도에 대한 전체적인 경향을 보면 압

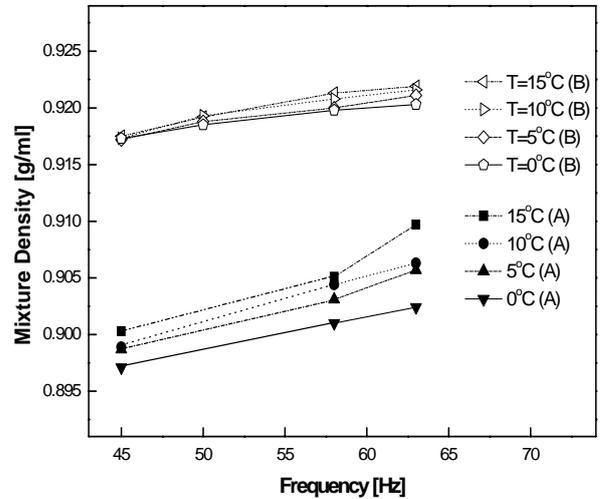


Fig. 2 Effect of frequency on mixture density for various suction temperatures.

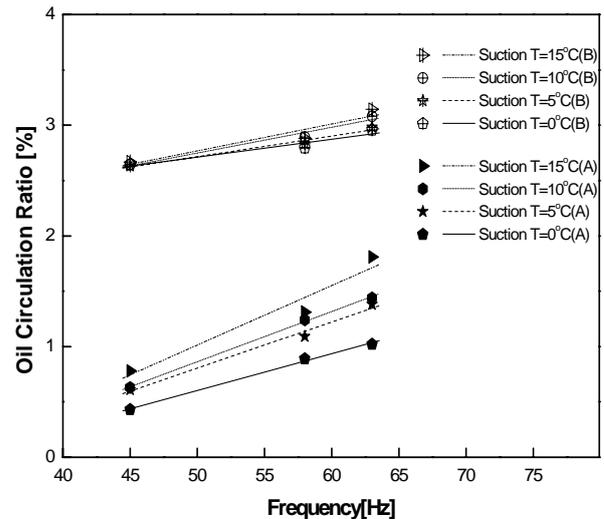


Fig. 3 Effect of frequency on OCR for various suction temperatures.

축기의 운전주파수가 증가함에 따라 오일/냉매 혼합물의 밀도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 밀도관계식을 적용하여 오일토출량을 분석한 결과 주파수가 증가할수록 압축기에서 토출되는 오일의 양이 증가되는 것을 확인할 수 있었고, 그에 대한 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

이는 압축기에서 빠져나가는 오일/냉매 혼합물의 질량유량이 증가함에 따라 압축기에서 나가는 토출가스의 운동량이 증가하게 되고, 이러한 요인으로 인해 토출가스에 포함되는 오일의 양이 증가하는 것으로 판단할 수 있다.

Table 2 Distributions of CO₂/Oil mixture density for Model A[g/ml]

Suction \ Hz	45	58	63
0°C	0.8971	0.9010	0.9024
5°C	0.8987	0.9031	0.9057
10°C	0.8989	0.9044	0.9063
15°C	0.9003	0.9051	0.9097

Table 3 Distributions of CO₂/Oil mixture density for Model B[g/ml]

Suction \ Hz	45	50	58	63
0°C	0.9173	0.9185	0.9198	0.9175
5°C	0.9172	0.9188	0.9200	0.9192
10°C	0.9173	0.9193	0.9208	0.9208
15°C	0.9175	0.9211	0.9216	0.9216

3.2 압축기의 흡입온도에 따른 오일토출량 변화

압축기 운전주파수를 45 Hz~63 Hz범위에서 일정하게 유지하면서 압축기의 흡입온도를 변화시켰을 때 냉동시스템 내에서 순환하고 있는 오일/냉매 혼합물의 밀도를 Fig. 4에 나타내고 있다. 흡입온도가 증가함에 따라 오일토출량이 증가하는 경향을 나타내었고, 압축기의 유량이 비교적 적은 A 모델의 경우에는 토출되는 오일의 양이 온도에 따라 더욱 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 운전주파수를 45 Hz~63 Hz범위에서 일정하게 유지하고, 압축기의 흡입온도를 변화시켰을 때의 오일토출량을 나타낸다. A 모델의 경우 운전주파수가 58 Hz로 유지되었을 때 오일토출량을 분석해보면 흡입온도가 0°C일 때 0.87%, 흡입온도가 5°C일 때 1.09%, 흡입온도가 10°C일 때 1.24%, 흡입온도가 15°C일 때 1.31%로 측정되었다. B 모델의 경우 운전주파수가 63 Hz로 유지되었을 때의 오일토출량을 분석해본 결과, 흡입온도를 0°C~15°C로 변화시키기에 따라 오일순환율도 3.01%에서 3.22%까지 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 압축기의 흡입온도에 따른 압축기 토출가스의 온도를 측정해본 결과, 압축기의 흡입온도가 증가함에 따라 토출가스의 온도는 100°C~128°C까지 선형적으로

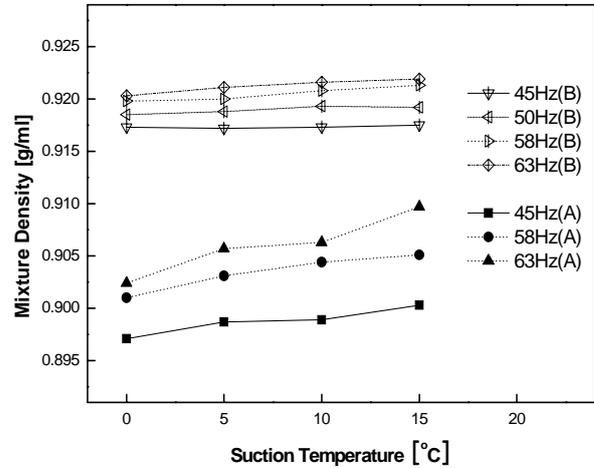


Fig. 4 Effect of suction temperature on mixture density for various frequencies.

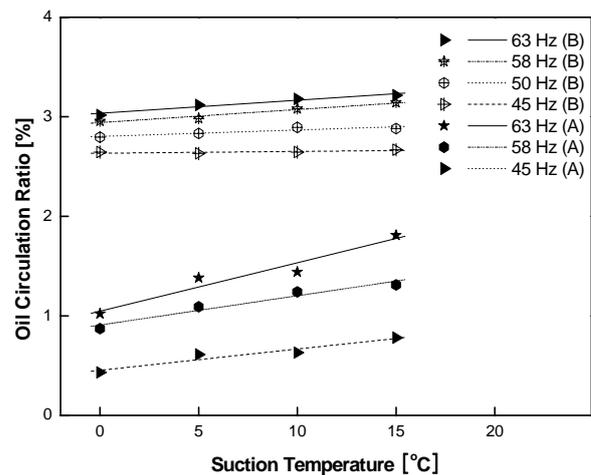


Fig. 5 Effect of suction temperature on OCR for various frequencies.

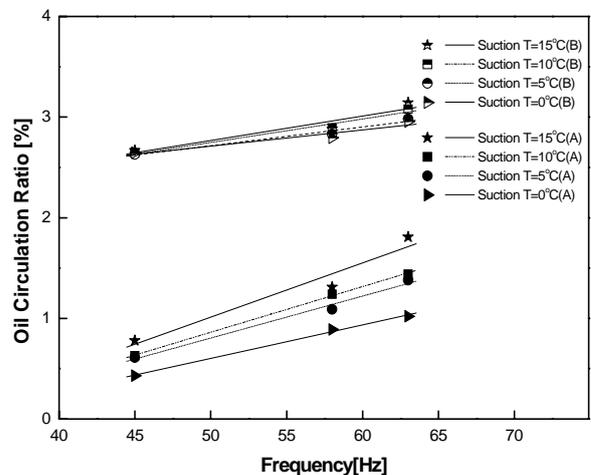


Fig. 6 Linear curve fit of OCR with compressor frequencies.

로 증가하는 것으로 측정되었다. 이는 압축기의 토출가스의 온도가 증가함에 따라 토출가스에 포함되어 있는 오일의 점성이 줄어들고, 오일의 증발성으로 인해 미립자 상태의 오일이 형성되어 시스템 내부로 유입되는 오일의 양이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 더불어 운전주파수의 제어범위가 목적주파수 부근, 비교적 좁은 범위에서 이루어졌기 때문에 특정 운전주파수에서의 급격한 변화는 보이지 않았다.

3.3 압축기의 오일토출량 상관관계식

두 종류의 압축기에 대한 오일토출량 측정 실험을 수행하였으며, 운전조건과 오일토출량의 상관관계식을 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 A 모델과 B 모델의 오일토출량을 예측할 수 있는 상관관계식을 제시하고자 한다. 압축기의 오일토출량은 운전주파수의 변화와 온도에 따라 대체로 선형적인 변화를 하기 때문에 OCR은 압축기의 운전주파수와 흡입온도에 관한 함수로 표현할 수 있고, 압축기의 흡입온도와 운전주파수를 독립변수로 하는 다음과 같은 1차 선형관계식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} OCR &= f(f, T) \\ OCR &= a_0 + a_1f + a_2T + a_3fT \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 OCR은 압축기의 오일순환율(%)이고, f는 압축기의 운전주파수(Hz)이며 T는 압축기의 흡입온도(K)이다.

Table 4는 본 연구에서 수행한 압축기의 오일토출량, 압축기의 흡입온도와 운전주파수의 상관관계식에 대한 계수 값들을 나타내고 있다. A 모델의 상관식은 3.5 kW급에 적용될 수 있으며 B 모델의 상관식은 10.4 kW급에 적용 가능하다. A 모델의 결정계수(r^2)는 0.988로 나타났으며 B 모델의 결정계수(r^2)는 0.935로 나타났다. 선형관계식을 적용한 1차 곡선 맞춤의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Table 4 Correlation coefficients

Coefficients	Model A	Model B
a ₀	-0.6510	-0.2420
a ₁	-0.0556	0.1213
a ₂	-0.0050	0.0042
a ₃	0.0004	-0.0003

4. 결 론

본 연구에서는 압축기의 운전주파수와 흡입온도에 따른 오일토출량을 분석하였다. 압축기에서 토출되는 오일/냉매 혼합물의 밀도를 U-tube 밀도계를 이용하여 측정하고, 밀도관계식을 이용하여 시스템 내의 오일순환율을 계산하였다. 압축기의 운전주파수와 흡입온도가 증가할수록 시스템 내를 순환하는 오일/냉매 혼합물의 밀도는 증가하는 것으로 측정되었고, 밀도관계식에 의해 압축기의 오일토출량도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 측정된 오일/냉매 혼합물의 밀도를 이용하여 압축기의 오일토출량을 계산하였으며, 압축기의 운전조건에 따른 오일토출량을 예측할 수 있는 상관관계식을 제안하였다. 본 상관식의 결정계수는 A 모델은 0.988로 나타났으며 B 모델은 0.935로 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 차세대 신기술 개발사업 중 “환경친화적 자연냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발” 과제와 국민대학교 2010년도 교내 연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Kim, S. H., Kim, C. N. and Park, Y. M., 1999, An investigation on the in-situ measurement of the oil-concentration with densimeter, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 11, pp. 31-37.
- Min, M. K., Hong, K. S., Hwang, Y. J., Hwang, I. N., Kim, C. M., and Cho, K. S., 2000, An experimental study on the oil circulation in an inverter-driven heat pump, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 12, pp. 717-724.
- Cho, P. J., Lee, S. K., Youn, Y., and Ko, H. S., 2005, Analysis of oil behavior inside upper part of rotary compressor using visualization technique, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 17, No. 8, pp. 772-779.
- Toyama, T., Matsuura, H. and Yoshiaki Yoshi-

- da, Y., 2006, Visual techniques to quantify behavior of oil droplets in a scroll compressor, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C026, pp. 1-7.
5. Dreimen, N. and Bunch, R., 2006, Development of carbon dioxide rotary compressor, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C014, pp. 1-8.
 6. Navarro, E., Urchueguia, J. F., Gonzalez, J., and Corberan, J. K., 2005, Test result of performance and oil circulation rate of commercial reciprocating compressors of different capacities working with propane(R290) as refrigerant, International Journal of Refrigeration, Vol. 28, pp. 881-888.
 7. Ogata, T., Hasegawa, H., Okaichi, A., and Nishiwaki, F., 2006, Reduction of oil discharge for rolling piston compressor using CO₂ refrigerant, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C095, pp. 1-7.
 8. Christen, T., Hubacher, B., Bertsch, S. S., and Groll, E., 2006, Experimental performance of prototype carbon dioxide compressors, The 18th International Compressor Engineering Conference at Purdue, C131, pp. 1-10.
 9. Lemmon, E. W., McLinden, L. O., and Friend, D. G., in Linstrom, P. J. and Mallad, W. G. (Ed.), 2001, NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, NIST, Gaithersburg, MD, <http://webbook.nist.gov>.