

대체냉매 R-407C의 모세관 선정에 관한 연구

Investigation on the selection of capillary tube for the alternative refrigerant R-407C

김 용 환*, 김 창 년**, 박 영 무***
Y. H. Kim, C. N. Kim, Y. M. Park

Key words : Capillary tube(모세관), Mass flow rate(질량유량), Roughness(조도), Alternative refrigerant R-407C(대체냉매 R-407C), Degree of subcooling(과냉도), Roughness factor(조도계수), Flow factor(유동계수)

Abstract

In this paper, experimental investigation of capillary tube performance for R-407C is performed. The experimental setup is made of real vapor-compression refrigerating system. In this study, mass flow rate is measured for capillary tubes of various diameter and length as inlet pressure and degree of subcooling are changed. These data are compared with the results of a numerical model. The mass flow rates of the numerical model are less than by 14 % compared with the measured mass flow rates. It is found that mass flow rate and length for R-407c are less than those of R-22 under the same condition. Also based on this experimental study and the numerical model, a set of capillary tube selection charts for R-407C is constructed.

기 호 설 명

A : 모세관 단면적(m^2)
D : 모세관 내경(m)
f : 마찰계수
G : 질량유속($kg/s \cdot m^2$)
h : 엔탈피(J/kg)
 \dot{m} : 질량유량(kg/s)

P : 압력(Pa)
V : 유동속도(m/s)
Re : 레이놀즈수
z : 모세관 길이(m)

하첨자

f : 포화액
g : 포화증기
w : 벽면

* 정회원, 아주대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 아주대학교 대학원 기계공학과
*** 정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학과

그리스 문자

- ϵ : 모세관 절대조도(m)
- μ : 점성계수(Pa · s)
- π : 원주율
- τ : 마찰응력(N.m²)

1. 서 론

공조기 등의 냉매로 사용해 오던 R-22의 사용규제에 따라 현재 대체냉매에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, R-22의 대체냉매로서 R-407C와 R-410A가 유력시 되고 있다.⁽¹⁾ 이에 따라 공조기 제조업체에서는 대체냉매 R-407C와 R-410A를 적용하기 위한 냉동시스템의 재설계가 진행중에 있다.

냉동 시스템 구성요소의 하나인 팽창장치는 냉매의 증발압력을 조절하고, 냉동부하에 따른 냉매유량을 적절히 조절하여 냉동 시스템이 최대 성능으로 운전되게 하는 중요한 역할을 한다. 냉동 시스템에 쓰이는 팽창장치에는 여러가지 종류가 있고 그 성능 특성도 다양하다. 팽창장치로 모세관을 사용하는 경우에는 특별한 부속품이 따로 필요없어 설치하기도 쉽고 가격 또한 저렴하다. 또한, 압축기가 정지되었을 때에는 냉매가 증발기로 흘러가도록 하여 고압측과 저압측의 압력 균형을 유지시켜 압축기 기동시 압축기에 과부하가 걸리지 않게 한다. 이러한 모세관의 장점 때문에 소규모 밀폐형 압축기를 사용하는 가정용 냉장고, 에어컨, 제습기 등에는 팽창장치로 모세관이 사용되고 있으며, 이용 범위도 점차 확대되어가고 있다. 반면에 모세관은 시스템의 용량 조절 폭이 다른 팽창장치에 비해 좁아 설계 조건 이외에서는 성능이 현저하게 떨어지는 단점이 있다. 따라서 냉동 시스템에서 적절한 모세관을 선정하고 설치하는 것은 매우 중요하다.

R-22를 냉매로 사용해오던 기존의 냉동 시스템에 시스템 변경 없이 대체냉매를 적용할 경우에는 시스템의 에너지 효율 감소는 물론이고, 시스템에 기계적 손실이 생길 수 있다. 따라서, 대체냉매의 특성에 맞게 시스템을 재설계할 필요가 있으며 시스템의 성능에 큰 영향을 주는 모세관의 재설계는

반드시 이루어져야 한다.

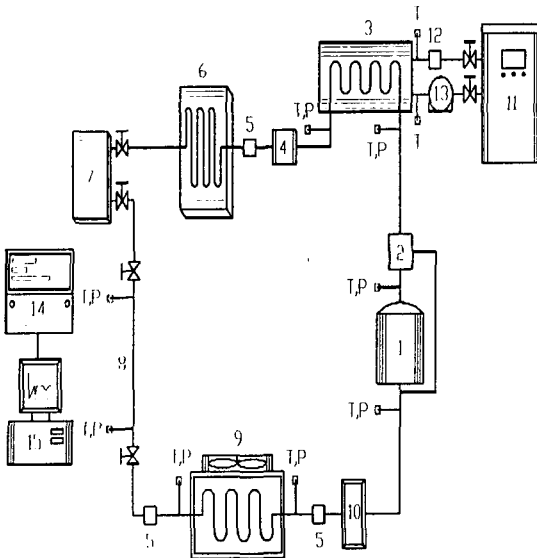
지금까지의 모세관에 대한 연구는 실험에 의한 연구와 수치해석에 의한 연구가 병행되어 왔다. Whitesel^(2,3)은 R-12와 R-22의 모세관 유동에 대해 임계 유동(critical flow)을 고려하여 실험과 수치해석을 수행한 후 모세관 선정선도를 제시하였다. Goldstein⁽⁴⁾은 모세관 내의 2상 유동을 수치해석하였다. Chen 등^(5,6)은 R-12에 대하여 준안정 유동(metastable flow)에 관점을 두고 실험을 수행하였으며 준안정 유동을 수치해석하여 실험과 비교하였다. 김 등⁽⁷⁾은 조도를 고려하여 R-22의 모세관 유동 실험과 수치해석을 수행한 후 모세관 선정선도를 제시하였다. 정 등⁽⁸⁾은 모세관 유동을 수치해석하여 R-22 대체냉매에 대한 성능을 예측하였으며, 김 등⁽⁹⁾은 R-407C에 대해 오일이 섞이지 않은 대체냉매만을 순환시키는 장치를 이용하여 모세관 성능실험을 수행하였다. 대체냉매의 모세관 유동에 대한 지금까지의 연구들은 실험보다는 수치해석 쪽의 비율이 높으며, R-407C의 모세관 유동에 대한 연구는 부족한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 R-22의 대체냉매인 R-407C에 대한 모세관 성능 실험과 함께 수치해석을 병행하여 R-407C를 사용하는 냉동 시스템의 모세관 설계시 필요한 모세관 성능자료를 수집하고 이를 바탕으로 R-407C 모세관 선정 선도를 제시하였다.

2. 실험 장치

본 연구에서는 실제 냉동 시스템의 중요한 구성요소인 모세관의 성능자료를 얻기 위해서 Fig.1과 같은 냉동 시스템을 구성하여 모세관의 성능 실험을 하였다. 실험장치는 증기압축식 냉동시스템과 마찬가지로 압축기, 응축기, 증발기 및 팽창장치인 모세관으로 구성되어 있다.

압축기는 3마력, 3상, 왕복동식이며 밀폐형이다. 시스템의 질량유량을 조절하기 위해서 압축기에 인버터를 연결하였으며, 인버터의 주파수를 조절함으로써 압축기 회전수를 조절하였다. 압축기 입구에는 어큐뮬레이터(accumulator)를 설치하여 냉매액이 압축기 내로 유입되어 압축기에 손상을 입히



1	Compressor	9	Evaporator
2	Oil Separator	10	Accumulator
3	Condenser	11	Constant Temperature Bath
4	Receiver	12	Turbine Flow Meter
5	Sight Glass	13	Pump
6	Subcooler	14	Data Acquisition System
7	Mass Flow Meter	15	Computer
8	Test Section		

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

는 것을 방지하였다. 압축기 출구에는 오일 분리기 (oil separator)를 설치하여 모세관으로 유입되는 오일의 양을 최소화하였다.

응축기는 쉘-관형, 수냉식으로 제작하였다. 응축기의 부하는 냉각수의 유량과 온도를 변화시켜 조절하였으며, 냉각수의 온도는 항온조(constant temperature bath)를 이용하여 조절하였다. 응축기 출구쪽 냉매의 상태가 과냉액이 되도록 응축기를 설계하였다.

증발기는 공냉식이며 증발기의 냉동능력은 2.15 ~ 3.29kJ/s이다.

각 구성품의 출구의 냉매의 상태를 육안으로 확인하기 위해서 관측경(sight glass)를 부착하였다.

본 연구에서는 모세관의 내경과 길이를 각각 3가지씩, 총 9가지 종류의 모세관 샘플을 제작하였고 이에 대하여 모세관 성능실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모세관의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of capillary tubes

	Inside diameter (mm)	Length (mm)	Roughness (μm)
Capillary tube	1.243	700	2.0514
		900	
		1,100	
Capillary tube	1.524	700	4.5478
		900	
		1,100	
Capillary tube	1.720	700	3.3355
		900	
		1,100	

모세관의 입구의 과냉도는 항온조(subcooler)를 이용하여 조절하였다. 시험부(test section)은 모세관을 쉽게 교체할 수 있도록 설계, 제작하였다.

냉동 시스템의 질량유량은 Coriolis 효과를 이용한 질량유량계로 측정하였으며, 질량유량계에 유입되는 냉매의 상태가 완전한 냉매액이 되도록 수액기(receiver)를 설치하였다.

시스템의 온도는 T형 열전대를 사용하여 측정하였고 DAS(data acquisition system)를 이용하여 측정된 자료를 컴퓨터로 전송하여 저장할 수 있게 구성하였다. 온도는 시스템 기본 구성장치의 입구와 출구에서 측정하였으며 모세관의 경우는 길이 방향으로 10~13개의 위치에서 측정하였다. 모세관 냉매 유동에 영향을 주지 않기 위하여 모세관 표면에 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 또한, 모세관의 유동특성상 모세관 출구로 갈수록 모세관 단위길이당 온도의 감소율이 커지므로 모세관 출구로 갈수록 T형 열전대 설치 간격을 줄여갔다. 즉 입구쪽에서는 등간격으로, 출구쪽에서는 조금씩 줄여가며 설치하였다.(예 : 100, 100, ..., 100, 80, 50, 30, 10mm)

시스템의 압력도 기본 구성장치의 입구와 출구에서 각각 측정하였고 모세관의 입구와 출구에는 정밀 압력계를 설치하여 압력을 측정하였다.

실험에 사용한 측정장비들의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Specifications of measuring equipment

Equipment	Specification
Micro motion mass flowmeter (Refrigerant)	Maker: OVAL Model: D012S-SS-200 Range: 0~300kg/h Accuracy: 0.1% of full scale
Data acquisition system	Maker: Yokogawa Model: 3890 Range: -200~400°C Accuracy: 0.1°C
Electronic digital flowmeter (Water)	Maker: Great Plains Industries, Inc. Model: 07S31GM Range: 10~190 l/min Accuracy: ±1.5% of full scale
Pressure gauge	Maker: Heise Range: 0~4Mpa, 0~1,500psig Resolution: 5kPa, 1 psi
Inverter	Maker: Goldstar Model: SV037GS-2 Capacity: 6kVA Current: 16A Frequency: 0.5~360Hz

3. 실험 방법

실험은 다음의 순서로 진행하였다.

가. 모세관을 교체한 후 약 2시간 동안 시스템을 진공시킨다.

나. 실험 대상 냉매를 냉동 시스템 내에 충전시킨다.

다. 항온조와 같은 주변장치를 원하는 조건이 되도록 작동시킨다.

라. 주변장치가 원하는 조건이 되면 압축기를 돌려 냉동 시스템을 가동시킨다.

마. 냉동 시스템이 정상상태가 될 때까지 충분히 가동시킨다.

바. 시스템이 정상상태가 되면 온도, 압력, 질량 유량 등을 측정한다.

사. 모세관의 입구조건과 모세관의 길이 및 내경을 바꾸어가며 반복, 실험한다.

4. 모세관 유동의 수치해석

본 연구에서는 R-407C에 대한 모세관 성능실험과 더불어 수치해석을 병행하였다. 모세관 유동을 크게 단상유동 영역과 2상유동 영역으로 나누었으며 준안정 영역에 대해서는 고려하지 않았다. 각 영역에 대하여 다음과 같은 가정을 적용하였다.

가. 모세관 내 유동은 1차원이고 정상유동이며 균일하다.

나. 단열 유동이다.

다. 모세관은 직선, 수평이며 단면적이 일정하다.

라. 모세관의 마찰계수는 일정하다.

또한 R-407C 냉매는 비공비 혼합 냉매로 같은 압력이라도 응축(이슬점) 온도와 증발(기포점) 온도가 다르다. 따라서 수치해석시 냉매의 상태를 알기 위해서는 어떤 온도를 사용할지를 결정하여야 한다. 본 논문에서는 기포점을 기준으로 하여 냉매의 성질을 냉매 물성 프로그램인 REFPROP⁽¹⁰⁾으로 구하였다.

4.1 단상유동 영역

단상유동 영역에서의 냉매는 액상태로 있기 때문에 냉매의 물성은 변하지 않으며 등온과 선형적인 압력강하의 특성을 보여준다. 단상유동 영역의 지배방정식은 다음과 같다.

가. 연속 방정식

$$\frac{\dot{m}}{A} = G = \rho V = const. \tag{1}$$

나. 운동 방정식

$$-AdP - \tau_w(\pi d)dz = 0 \tag{2}$$

다. 에너지 방정식

$$h = const. \tag{3}$$

4.2 2상영역

2상유동 영역에서는 액상과 기상이 공존하며 모세관 출구쪽으로 갈수록 압력강하와 온도강하가 크게 일어나는 특성을 보여준다. 2상유동 영역의 지배방정식은 다음과 같다.

가. 연속 방정식

$$\dot{m} = \dot{m}_I + \dot{m}_E \quad (4)$$

나. 운동 방정식

$$-AdP - \tau_m(\pi d)dz = d(\dot{m}V)_I + d(\dot{m}V)_E \quad (5)$$

다. 에너지 방정식

$$(\dot{m}h)_I + (\dot{m}h)_E + \frac{(\dot{m}V^2)_I + (\dot{m}V^2)_E}{2} = 0 \quad (6)$$

4.3 마찰계수와 점성계수

모세관 유동에 관한 수치해석에서 중요한 변수는 모세관의 마찰계수와 2상 유동 영역에서의 점성계수이다.

마찰계수는 모세관 조도의 영향을 받으므로 본 연구에서는 조도를 고려한 다음의 관계식⁽¹¹⁾을 이용하였다.

$$f = \left[1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (7)$$

여기서 ϵ 은 모세관의 조도, D 는 모세관의 내경 그리고 Re 는 레이놀즈 수이다.

이 식은 마찰계수를 명시적(explicit)으로 표현한 근사식이지만 Moody 선도를 묵시적(implicit)으로 나타낸 Colebrook-White식과 비교하여 0.5%의 오차를 가진다.

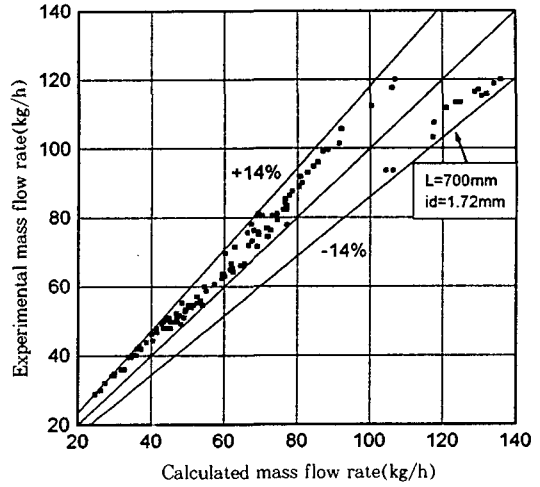
2상 유동 영역에서의 점성계수는 많은 모델 가운데 다음의 Cicchitti 모델⁽¹²⁾을 이용하여 계산하였다.

$$\mu = x\mu_g + (1-x)\mu_l \quad (8)$$

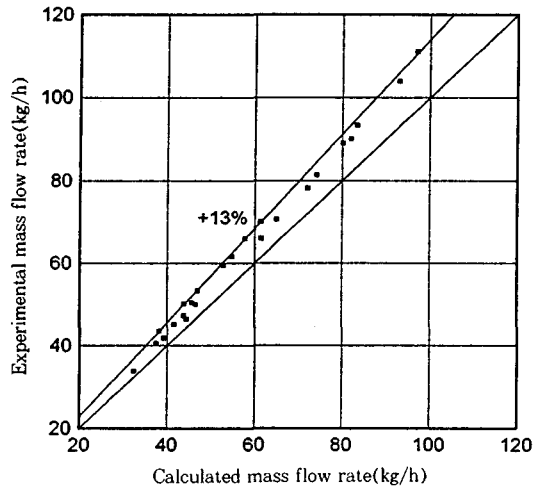
여기서 x 는 냉매의 전도이다.

5. 결과 및 토론

R-22의 유력한 대체냉매인 R-407C의 모세관 성능을 알아보기 위하여 실험 장치를 구성하여 실험을 수행하였다. 실험은 내경과 길이가 서로 다른 총 9가지 종류의 모세관에 대하여 수행하였다. 또한 수치해석 모델의 타당성과 실험의 오류를 알아보기 위하여 실험을 한 후 수치해석에 의한 값과



(a) R-407C



(b) R-22

Fig.2 Comparison of measured mass flow rates with calculated mass flow rates for R-407C and R-22

비교하였다.

Fig.2의 (a)와 (b)는 각각 R-407C, R-22에 대한 측정된 질량유량과 수치해석에 의한 질량유량을 비교한 것이다. R-22에 대한 측정 질량유량은 김등⁽⁷⁾이 수행한 실험 자료를 이용하였다. Fig.2에서 수치해석에 의한 질량유량은 측정 질량유량과 비교하여 R-407C의 경우 $\pm 14\%$, R-22의 경우 $+13\%$ 이내의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. R-22의 경우에는 측정 질량유량이 수치해석한 질량유량보

다 크게 나타났으며 R-407C의 경우에도 R-22와 마찬가지로 측정질량유량이 크게 나타났다. 하지만 R-407C의 경우 한가지 모세관(내경 1.72mm, 길이 700mm)인 경우에는 그 반대의 경향이 나타났다. 실험의 오류여부를 검사하기 위하여 몇차례의 재실험을 하였지만 그 결과는 변하지 않았다. 이것은 모세관 제작시에 생기는 입구 형상의 문제라고 보여진다. 즉 모세관 제작시 모세관은 돌연확대와 돌연축소시 수평이 되어야 하고 일정한 단면적을 유지하여야 하지만 반대의 경향을 보이는 모세관은 잘못 제작되어 실제 입구쪽의 압력강하가 더 크게 일어나게 되는 것이다.

수치해석으로 구한 질량유량이 측정한 질량유량보다 적은 이유는 실제 냉매에 나타나는 현상, 즉 질량유량을 증가시키는 비등 지연과 오일이 냉매와 섞이는 현상 등을 고려하지 않았기 때문이라고 판단된다. 비등 지연은 모세관 내로 냉매가 흐르면서 압력이 증기압 이하로 떨어지게 되더라도 증발이 일어나지 않고 얼마간의 압력이 더 떨어질 때까지 계속 액 상태로 존재하는 것을 말한다. 이런 현상을 준안정 유동이라 하며, 단상 영역이 늘어나게 되어 질량유량이 커지는 효과를 가져온다. 그리고 오일이 냉매에 섞여 냉동 시스템을 흐르게 되면 순수 냉매만 흐르는 경우보다 질량유량이 증가한다. 이러한 현상은 오일이 냉매에 섞이게 되면 증기압이 떨어지게 되어 단상 영역이 역시 늘어나기 때문이다.

본 실험에서는 오일의 효과를 최소한으로 줄이기 위해서 오일 분리기를 설치하였지만 완전히 오일을 분리할 수는 없다. 또한 오일은 사용 냉매와 상호 용해성, 친화성 그리고 혼화성 등이 좋아야 하기 때문에 냉매에 맞게 오일을 바꿔야 한다. 하지만 R-22와 대체냉매인 R-407C의 비교를 위해서 오일을 바꾸지 않고 R-22 냉매의 오일인 광물성 오일을 그대로 사용하였고 수치해석에 의한 값과 실제 질량유량의 오차가 R-22나 R-407C의 경우 오차의 차이가 1% 정도로 비슷하게 나타나는 것으로 보아 오일에 의한 문제는 적다고 여겨진다.

따라서 모세관 제작시 문제가 발생하지 않는다면 위에서 살펴본 바와 같이 수치해석 모델을 이용하여 모세관을 흐르는 냉매의 실제 질량유량을 +14%

오차 이내로 예측할 수 있다. 또한 그 예측 오차의 평균은 8.8%이고 편차는 2.9%이므로 이것은 오차의 변화가 크지 않다는 것을 의미한다. 즉 실험 자료를 피팅하게 되면 실험의 질량유량 = $1.08 \times$ 계산의 질량유량 + 0.25라는 직선식을 얻는데 이 식을 이용하면 오차의 평균은 0.1%이며 편차는 3.2%를 가지게 되어, 실험값과 계산값이 잘 맞는 걸 보여준다. 본 논문에서 수정계수를 사용하지 않는 이유는 수정계수를 사용한 수치해석의 모델이 다른 대체냉매에서도 같은 결과로 나올지 의심스럽기 때문이다. 따라서, 본 논문에서 사용된 수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위해서는 다른 대체냉매의 모세관 성능 실험 연구가 필요하리라 생각된다.

모세관의 성능을 결정하는 주요 변수는 모세관의 길이, 내경, 조도, 그리고 냉매의 질량유량, 과냉도, 입구압력이다. 따라서 모세관 특성을 다음의 5가지 방법으로 표현하였다.

- 가. 모세관의 조도에 따른 질량유량의 변화
- 나. 모세관의 길이에 따른 질량유량의 변화
- 다. 모세관의 내경에 따른 질량유량의 변화
- 라. 모세관의 입구압력에 따른 질량유량의 변화
- 마. 모세관의 입구의 과냉도에 따른 질량유량의 변화

길이와 내경 등의 기하학적 상태가 결정된 모세관의 성능은 2가지의 입구조건, 즉 입구압력과 과냉도에 의해 결정된다. 그러므로 모세관에 따른 성능을 비교하려면 반드시 입구압력과 과냉도가 일치하여야 한다. 하지만 실험을 통해서 두가지 조건을 동시에 만족시키기 위해서는 많은 양의 자료가 필요하게 되고 많은 시간이 소요되기 때문에 실험적 비교는 매우 어렵다. 따라서 R-22 냉매와 유력한 대체냉매인 R-407C를 비교하기 위해서 수치해석을 이용하여 결과를 알아보았다.

Fig.3은 모세관의 조도에 따른 질량유량의 변화이다. 조도가 클수록, 즉 표면의 거칠기가 커질수록 질량유량이 감소하는 것을 알 수 있다. 모세관의 조도에 따른 R-22와 R-407C의 냉매의 질량유량의 차는 거의 일정하여 R-407C의 질량유량이 R-22보다 4% 정도 적음을 알 수 있다.

Fig.4는 모세관의 길이에 따른 질량유량의 변화를 나타낸 것이며 길이가 늘어날수록 질량유량이

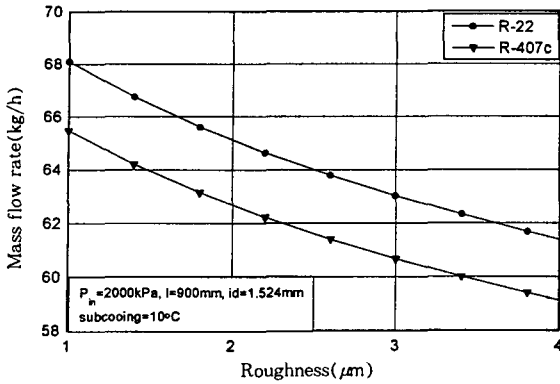


Fig.3 Variation of mass flow rate with roughness

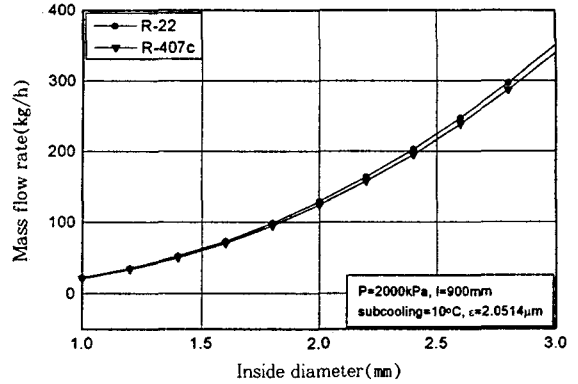


Fig.5 Variation of mass flow rate with inside diameter

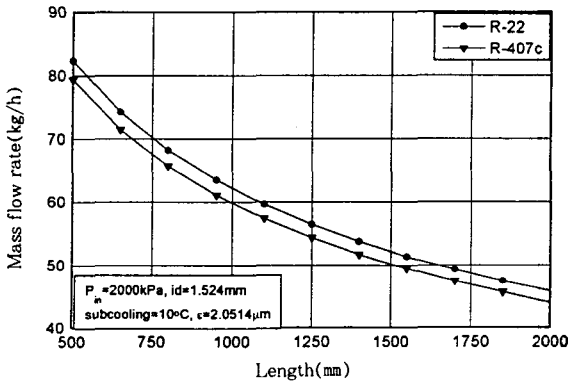


Fig.4 Variation of mass flow rate with length

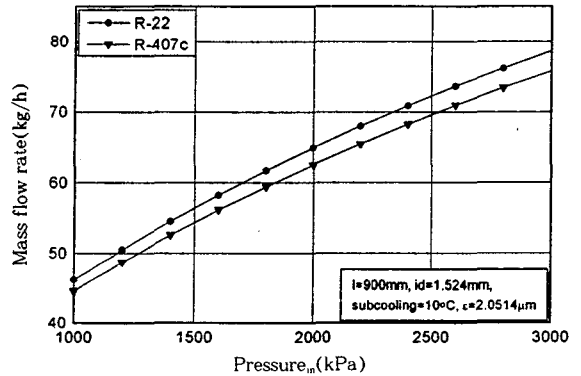


Fig.6 Variation of mass flow rate with inlet pressure

감소함을 알 수 있다. 모세관의 길이에 따른 R-22와 R-407C의 질량유량의 차는 거의 일정하며 R-407C의 질량유량이 Fig.3와 같이 4% 정도 적음을 알 수 있다. 또한 같은 질량유량이 흐를 때 R-22에 대한 길이보다 R-407C의 길이가 약 10% 정도 짧음을 알 수 있다.

Fig.5는 모세관의 내경에 따른 질량유량의 변화이다. 내경이 증가할수록 질량유량이 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 모세관 내경이 1.0~3.0mm이 변화할 때 질량유량이 약 30~350kg/h의 변화를 보여주며 이것은 내경의 변화에 따른 질량유량의 변화가 다른 조건의 변화보다 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 R-22의 질량유량과 비교하여 R-407C의 질량유량이 적다는 것을 알 수 있다.

Fig.6은 입구압력에 따른 질량유량의 변화이며 입구압력의 증가는 질량유량의 증가를 가져오는 것을 확인할 수 있다. 위와 마찬가지로 R-22의 질량유량과 비교해서 R-407C가 3~4% 적음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig.7은 과냉도에 따른 질량유량의 변화이다. 모세관 입구의 과냉도가 증가할수록 냉매의 질량유량이 증가한다는 것을 알 수 있다. R-407C의 질량유량이 역시 R-22보다 3~4% 적다. 이처럼 R-22와 R-407C를 비교하였을 때, 서로 같은 조건일 때 R-407C는 질량유량의 경우 4% 정도, 길이의 경우에는 10% 정도 짧음을 알 수 있다.

Fig.8,9 및 10은 R-407C의 모세관 선정 선도가

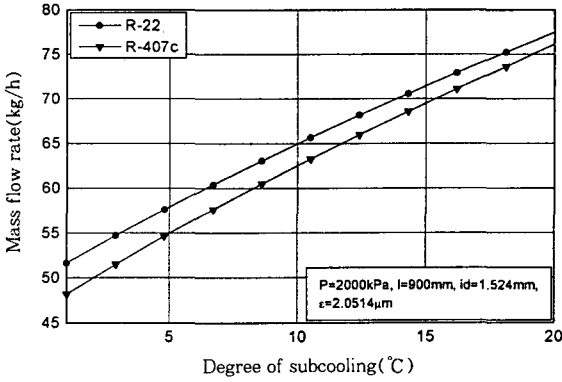


Fig.7 Variation of mass flow rate with degree of subcooling

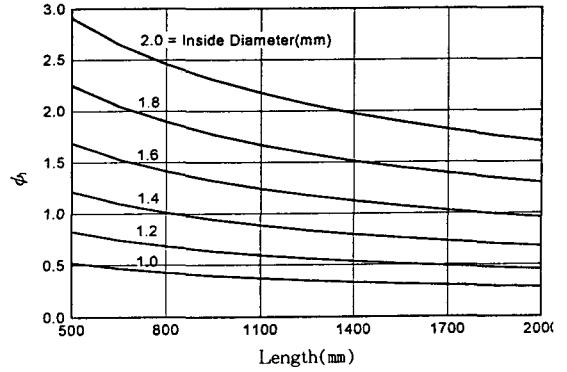


Fig.9 Capillary tube flow factor of R-407C

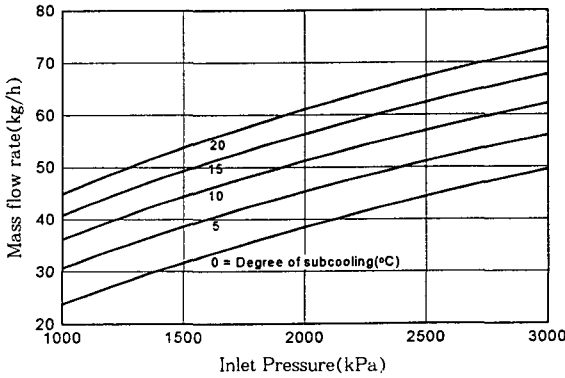


Fig.8 Variation of mass flow rate as a function of inlet pressure for various subcoolings for a standard capillary tube of R-407C

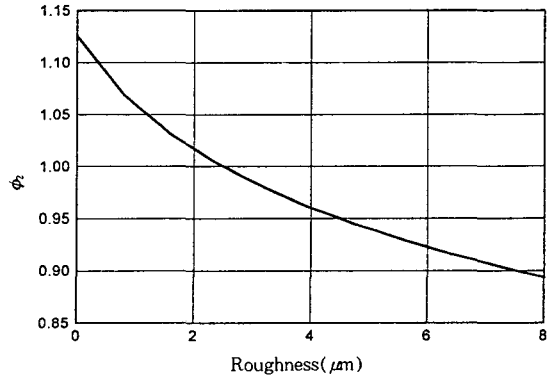


Fig.10 Capillary tube roughness factor of R-407C

다. Fig.8은 ASHRAE 표준 모세관(길이 2,030mm, 내경 1.63mm)에 대한 입구압력과 과냉도에 따른 질량유량을 나타낸다. Fig.9는 유동계수(ϕ)를 나타내며 표준 모세관에 대한 질량유량과 길이, 내경에 따른 비표준 모세관의 질량유량비를 나타낸다. Fig.10은 조도계수(ϕ_2)를 나타내며 표준 모세관에 대한 질량유량과 조도에 따른 비표준 모세관의 질량유량비를 나타낸다. 사용된 ASHRAE 표준 모세관과 사용된 기준점은 Table 3과 같다. 김 등⁽⁷⁾이 제시한 방법으로 Fig.8,9 및 10을 이용하여 비표준 모세관에 대한 질량유량을 구할 수 있다.

$$\dot{m} = \phi_1 \phi_2 \dot{m}_{standard} \quad (9)$$

$$\phi_1 = \frac{\dot{m}(L, d, \epsilon_{standard})}{\dot{m}(L_{standard}, d_{standard}, \epsilon_{standard})} \quad (10)$$

$$\phi_2 = \frac{\dot{m}(L_{standard}, d_{standard}, \epsilon_{standard})}{\dot{m}(L_{standard}, d_{standard}, \epsilon_{standard})} \quad (11)$$

Fig.11은 수치해석, 모세관 선정 선도를 이용하여 계산한 질량유량과 측정된 질량유량과 비교한 것이다. 수치해석을 이용하면 14% 이내로 질량유량을 예측할 수 있으며 모세관 선정 선도를 이용하면 15% 이내로 질량유량을 예측할 수 있다. 수치해석과 모세관 선정 선도를 이용한 질량유량의 계산은 차이가 1%이다. 그러므로 컴퓨터를 이용하여 수치해석을 할 수 없는 경우에 모세관 선정 선

모세관 선정”, 공기조화 냉동공학 논문집, 7권, 3호, pp. 435-449.

9. 김성구, 김민수, 1996, “R-22 대체냉매의 모세관 성능특성”, 공기조화 냉동공학 동계학술 발표 논문집, pp. 77-81.
10. 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, U.S.A.
11. Robert D. Blevins, 1984, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York, p. 50.
12. Cicchitti, A., C. Lombardi, M. Silvestri, G. Soldaini, and R. Zavattarelli, 1960, “Two-phase cooling experiments-Pressure drop, heat transfer, and burnout measurements”, Energia Nucleare, Vol. 7, No. 6, p. 407-425.

A. 부 록

조도를 고려한 모세관 선정 선도의 이용 방법은 다음과 같다.

예제 1. 길이 900mm, 내경 1.72mm, 조도 3.3355 μ m 인 모세관이 있다. 모세관의 입구압력 1,836.4kPa, 과냉도 2°C인 입구조건을 가진 냉동 시스템에서 R-407C 냉매의 질량유량은 얼마인가?

(풀이) Fig.9에서 입구압력과 과냉도의 표준 모세관에 대한 질량유량($\dot{m}_{standard}$)은 39.3kg/h이다. Fig.10에서 길이 900mm, 내경 1.72mm의 비표준 모세관의 유동계수(ϕ)는 1.62이고 Fig.11에서 조도 3.3355 μ m의 비표준 모세관의 조도계수(ϕ_2)는 0.98이다. 따라서 모세관을 흐르는 R-407C의 질량유량은 $39.3 \times 1.62 \times 0.98 = 62.4\text{kg/h}$ 이다.

예제 2. 입구압력 2,000kPa, 과냉도 5°C의 입구 조건을 가진 냉동시스템에서 모세관의 내경 1.4mm, 조도가 3.0 μ m이다. R-407C의 질량유량이 40kg/h으로 흐르도록 하려면 모세관의 길이는 얼마나 되어야 하는가?

(풀이) Fig.9에서 표준 모세관의 질량유량은 45.4kg/h이다. Fig.11에서 비표준 모세관의 조도계수는 0.985이다. 그러므로 비표준 모세관의 유동계수는 $40.0 / (45.4 \times 0.985) = 0.89$ 이다. 따라서 Fig.9에서 내경 1.4mm이고 유동계수 0.89인 길이는 1,060mm이다.