

< 논문 >

코일 형상을 고려한 모세관 냉매유량 예측 상관식

박차식* · 장용희* · 김용찬† · 이영수**
 (2006년 9월 26일 접수, 2006년 11월 10일 심사완료)

An Empirical Correlation of Refrigerant Flow Rate Through Coiled Capillary Tubes

Chasik Park, Yonghee Jang, Yongchan Kim and YoungSoo Lee

Key Words : Coiled Capillary Tube(코일형 모세관), Expansion Device(팽창장치), Mass Flow Rate(질량유량), Empirical Correlation(경험적 상관식)

Abstract

Air-conditioners use a spirally coiled capillary tube as an expansion device to enhance compactness of the unit. However, most empirical correlations in open literature were developed for straight capillary tubes without considering coiled effects on the mass flow rate. The objectives of this study are to investigate the flow characteristics of coiled capillary tubes and to develop a generalized correlation for mass flow rate through coiled capillary tubes. The mass flow rates through the coiled capillary tubes and straight capillary tubes were measured by varying operating conditions and tube geometry. The condensing temperatures varied at 40.5, 47.5 and 54.5°C, and subcoolings altered at 3.5, 6.5 and 11.5°C. The mass flow rates of the coiled capillary tubes decreased by 5 to 16% compared with those of the straight capillary tubes at the same operating conditions. An empirical correlation was developed by introducing equivalent length of capillary tube with non-dimensional parameters for coiled shape. The present correlation predicts the data with average and standard deviations of 0.33% and 3.24%, respectively.

기호설명

\dot{m} : 질량유량(kg/h)
 P_i : 입구압력(kPa)
 P_s : 포화압력(kPa)
 P_c : 임계압력(kPa)
 ΔT_{sc} : 과냉도(°C)
 h_{fg} : 증발잠열(kJ/kg)
 T_c : 임계온도(°C)
 L : 모세관 길이(mm)
 L_e : 모세관 등가길이(mm)

d : 모세관 직경(mm)
 D : 모세관 코일 직경(mm)
 C : 모세관 곡선부 길이(mm)
 Re : 레이놀즈수

그리스 문자

ρ : 밀도(kg/m³)
 π : 무차원항
 σ : 표면장력(N/m)
 ν : 동점성계수($\mu\text{m}^2/\text{s}$)

하첨자

f : 포화액체
 g : 포화증기
 $meas$: 측정값
 $pred$: 예측값
 tp : 이상상태

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과

E-mail : yongckim@korea.ac.kr
 TEL : (02)3290-3366 FAX : (02)921-5439

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한국에너지기술연구원 미활용지열연구센터

1. 서 론

현대인의 생활수준이 지속적으로 향상됨에 따라, 쾌적한 실내 공간에 대한 관심이 높아지면서 공조 기기의 보급도 증가하고 있다. 이에 따라 공조개발업체간의 제품에 대한 성능, 신뢰성 그리고 가격 경쟁력이 날로 심해지고 있다. 모세관은 냉동 시스템에서 팽창장치로 사용되는 가장 간단하고 저렴한 구성부품이다. 최근에는 멀티에어컨의 보급으로 전자팽창밸브(EEV)를 팽창장치로서 적용하기도 하지만, 일반적으로 가정용 패키지 에어컨이나 룸에어컨에 모세관이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 모세관은 패키지 에어컨에는 실내기에 위치하고 작은 사이즈의 실내기를 가진 룸에어컨은 실외기에 위치한다. 최근의 가정용 에어컨은 다양한 디자인과 함께 실내기는 슬림화되고, 실외기는 건물 외부로 노출되므로 주요 부품의 성능 향상과 더불어 소형화되고 있는 추세이다. 이에 모세관이 위치할 수 있는 공간은 점차 협소해짐으로 코일 형태로 감아서 공간을 최소화하여 장착하고 있는 실정이다. 그러나, 지금까지 모세관 유동에 대한 많은 연구가 수행되어왔지만 대부분 직선형 모세관에 국한되어 연구가 진행되었다. 모세관은 시스템 용량 조절폭이 다른 팽창장치에 비하여 매우 작으므로 모세관을 사용하는 시스템은 설계점 이외에서는 성능이 떨어지는 단점이 있다.

모세관 관련 연구들은 크게 이론적 모델링과 실험에 의한 경험적 상관식으로 연구가 진행되었다. 이론적 모델링은 연속방정식, 에너지 방정식, 그리고 운동량 방정식을 기본으로 모세관 출구 방향으로의 상변화에 따른 점성과 마찰계수의 영향을 고려하여 지배방정식을 구하였다. Erth⁽¹⁾는 처음으로 냉매 물성치와 지배 방정식으로 부터 모세관 유동을 해석하였고, Goldstein⁽²⁾은 모세관 내의 이상유동에 관한 시뮬레이션 방법을 제시하였다. 그는 모세관 입, 출구에서의 급격속으로 인한 압력강하, 단상영역과 이상영역에서의 압력강하를 각각 계산하였다. Li et al.⁽³⁾ 그리고 Kuehl 과 Goldschmidt⁽⁴⁾은 모세관내 증발지연현상을 고려하여 준안정평형영역을 고려한 유동 시뮬레이션을 실시하였다. Yufeng et al.⁽⁵⁾은 모세관내에서 적용 가능한 점성계수와 마찰계수 여러 모델을 적용하여 비교 해석하였는데, 이 중에는 단상과 이상영역에서 코일된 경우에 적용 가능한 마찰계수도 포함되었다.

모세관내 유동에 대한 실험적 연구는 Bolstad 와 Jordan⁽⁶⁾에 의해 시작되어 단일조건하에서 실험을 수행하여 임계유동의 존재를 검증하였다. Wolf et al.⁽⁷⁾은 R22, R134a 및 R410A 냉매에 대한 성능 데이터에 기초하여 모세관을 통과하는 냉매유량을 예측할 수 있는 경험적 상관식을 개발하였다. Melo et al.⁽⁸⁾은 R12, R134a, 및 R600a에 대하여 무차원 상관식을 이용한 경험적 유량모델을 개발하였다. Kim et al.⁽⁹⁾은 R22, R407C, 및 R410A에 대하여 경험적 상관식을 도출하였으며, 모세관을 한번 감아서 코일된 경우에 대하여 실험을 수행하여 직관형 대비 최대 9%까지 냉매유량 감소를 확인하였다. 하지만 이론적 모델링과 실험에 의한 경험적 상관식은 주로 직선형 모세관에 대해서 연구가 수행되었고 실제 제품에 장착되는 모세관 형상은 고려하지 않아 냉매유량 예측에 있어 오차의 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해서 다양한 형상의 코일형 모세관에 대한 실험을 수행하여 냉매유량 특성을 비교하였고, 실험결과를 바탕으로 코일형상을 고려한 일반적인 냉매유량 예측 상관식을 개발하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 모세관 성능특성을 측정하기 위한 실험장치 개략도이다. 실험장치는 모세관 시험부의 입구과냉도, 응축압력, 그리고 증발압력을 쉽게 조절할 수 있도록, 세 가지 유동 루프로 구성되어 있다. 첫 번째는 팽창장치 시험부를 포함한 냉매 유동루프이고, 두 번째는 증발 열교환기를 포함한 온수 유동루프, 마지막으로 응축 열교환기를 포함한 물/에틸렌글리콜 유동루프이다.

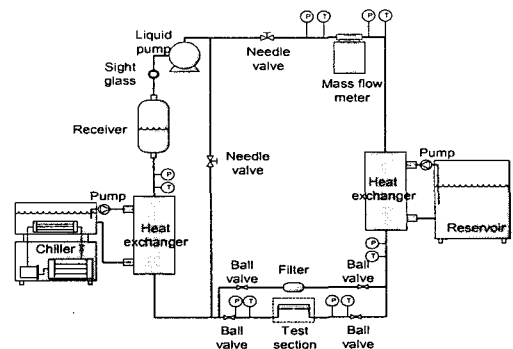







Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

Table 1 Test conditions and specifications

Specifications	Capillary tube length : 1000 mm Capillary tube inner diameter : 1.2 mm, 1.5 mm				
Test conditions	Condensing temperature : 40.5 °C , 47.5 °C , 54.5 °C Evaporating temperature : 7 °C Subcooling : 3.5 °C , 6.5 °C , 11.5 °C				
Capillary shapes	Straight	Circular #1	Circular #2	Circular #3	Circular #4
	-	Coiled no. = 1 D = 40 mm	Coiled no. = 2 D = 80 mm	Coiled no. = 4 D = 60 mm	Coiled no. = 6 D = 40 mm
					

모세관 시험부의 입구압력을 제어하기 위하여 가압식 액체펌프를 사용하였고, 인버터로 속도를 조절하였다. 액체펌프는 펌프 자체의 펄스 때문에 시스템의 압력이 맥동하고 관을 타고 진동이 전파되어 시스템이 불안정해질 수 있으므로 맥동 방지를 위한 소음기를 펌프출구에 설치하였다. 팽창장치 입구 과냉도는 정밀한 온도조절이 가능한 항온조를 포함한 온수 유동루프와 판형열교환기를 통하여 냉매와 열교환이 이루어지도록 하였다. 팽창장치 출구의 이상상태 냉매는 물/에틸렌글리콜 유동루프와 판형 열교환기에서 응축되도록 하여 과냉상태의 액냉매가 펌프로 흡입되도록 하였다. 시험부 전후에는 압력계와 열전대를 설치하여 압력과 온도를 측정하였다. 압력계와 열전대의 정확도는 각각 전범위의 $\pm 0.13\%$ 와 $\pm 0.5\%$ 이다. 냉매유량은 질량유량계를 액체펌프 출구에 설치하여 측정하였으며, 정확도는 측정치의 $\pm 0.2\%$ 이다.

시험용 모세관은 2종의 모세관 내경에 대하여 직선형 1종과 코일형 4종을 포함하여 총 10종의 모델을 냉매 R22로 실험하였다. Table 1은 본 연구에 사용한 모세관 형상 및 실험조건을 나타낸다. 모세관은 내경 1.2 mm와 1.5 mm의 2종류에 대하여 모세관 코일의 직경과 감은 횟수를 변화시켰고, 모세관 입구측 압력과 과냉도를 조절하여 운전조건을 변화시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 모세관 직경 1.5 mm와 1.2 mm에서 입구 과냉도 변화에 따른 냉매유량 특성을 나타낸다.

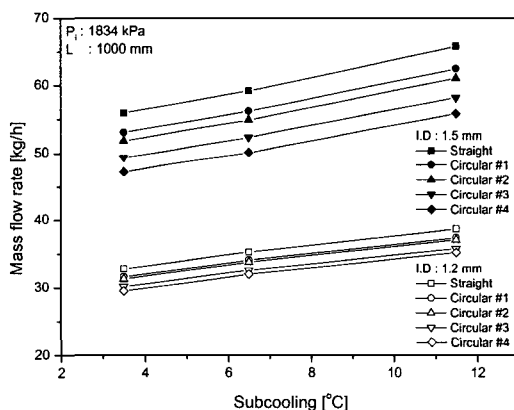


Fig. 2 Variation of mass flow rate with subcooling

과냉도 증가에 따라 냉매유량은 선형적으로 증가하였다. 이것은 과냉도가 증가함에 따라 과냉액체의 온도가 낮아지므로 밀도는 증가하게 되며, 단위 체적당의 질량 증가로 유량을 증가시킨다. 또한, 과냉도 증가에 따라 모세관 내부에서 증발이 발생하기 전까지의 단상영역의 압력강하가 증가하게 되므로 유량을 증가시키게 된다. 즉, 입구 과냉도가 증가하면 밀도와 단상 압력강하의 증가로 유량은 증가한다. 이러한 경향은 직관형이나 코일형에 대하여 동일하게 나타났다. 코일형의 냉매유량 감소는 코일의 직경이 작거나 모세관 전체길이에 대하여 곡선부가 차지하는 비율이 증가할수록 냉매유량 감소량은 증가하였다. 따라서, 코일형 모세관의 냉매유량에 영향을 미치는 인자로서 코일의 직경과 코일 감긴수에 의해 결정되는 직선 대 곡선영역의 비를 고려해야 한다.

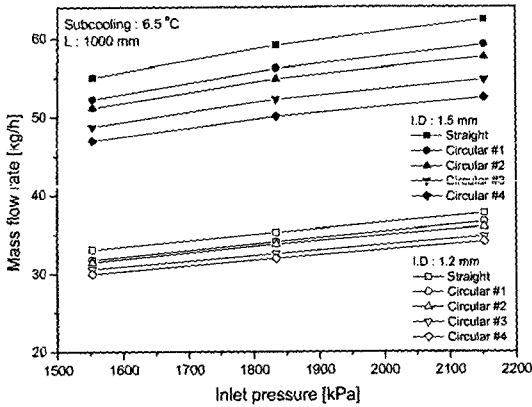


Fig. 3 Variation of mass flow rate with inlet pressure

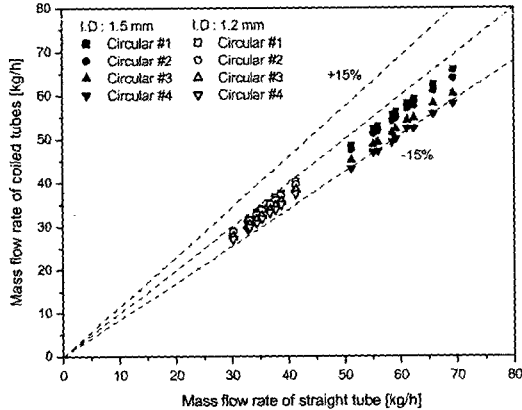


Fig. 4 Effect of coiled shape

Fig. 3은 모세관 직경 1.5 mm와 1.2 mm 에서 입구 압력변화에 대한 유량변화를 나타낸다. 유량은 상류압력 변화에 대하여 거의 선형적으로 비례 증가하였다. 과냉도가 일정한 상태에서 상류압력이 증가하면 온도의 증가로 밀도는 감소한다. 액체의 밀도 감소는 모세관을 흐르는 유량을 감소시킨다. 그러나, 일정한 과냉도에서 상류압력이 증가함에 따라 모세관 내부에서 증발하기 전까지의 단상영역의 압력강하가 증가하고 이로 인해 모세관을 흐르는 냉매유량을 증가시키는 역할을 한다. 즉, 압력증가에 따른 온도상승으로 인한 액체 밀도 감소보다는 모세관 내부에서 증발 전까지 단상영역의 압력강하가 유량에 더 큰 영향을 줌으로 냉매유량은 증가한다.

Fig. 4는 운전조건이 동일한 경우 직관형 모세관과 코일형 모세관의 냉매유량 차이를 나타낸다. 직관형 모세관에 비하여 코일형 모세관의 냉매유

량은 모세관 직경이 1.5 mm와 1.2 mm인 경우 각각 5~15%와 4~10%의 유량 감소를 나타냈다. 모세관 직경이 증가하면 코일에 의한 유량감소 효과가 증가하였다. 이것은 일반적인 곡관유동에서 나타나는 2차유동에 의한 손실이 코일된 모세관내에서 발생하였기 때문이다. 곡관부의 내부 유동에서 2차 유동의 손실효과를 나타내는 Dean Number, $De = Re\sqrt{d/D}$ 에서도 동일한 결과를 유추할 수 있다. 즉, 동일한 코일직경에서는 모세관 직경이 클수록, 유속이 증가할수록 2차 유동의 손실효과가 크게 작용하기 때문이다.

4. 코일형 모세관 모델링

본 연구에서는 모세관내 유동특성을 알아보기 위해서 모세관의 형상을 반영한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션을 위한 모세관 출구방향으로의 기하학적 조건은 실험에 사용된 모세관과 동일하게 주었다. 즉, 주어진 입구 상태의 온도, 압력과 임의의 질량유량에서 모세관내 유동의 지배방정식인 연속방정식, 운동량방정식 그리고 에너지방정식을 이용하여 모세관 출구방향으로의 미세 온도차(ΔT)에 따른 하류지점의 냉매물성치를 계산한다. 이 때의 압력강하에 해당하는 미소구간 길이(ΔL)를 구하면서 계속해서 모세관 출구온도를 하강시킨다. 이 과정을 반복하면서 미소구간 길이의 합인 전체 모세관길이($\Sigma\Delta L$)를 구하도록 하였다. 시뮬레이션의 수렴조건은 모세관 출구에서 엔트로피 구배가 0이 되어 쇼킹이 발생할 때까지 계산을 수행하도록 하였고 이 조건을 만족하면 계산된 모세관길이($\Sigma\Delta L$)가 주어진 모세관길이(L)와 일치하면 시뮬레이션이 종료되도록 하였다. 수렴조건을 만족하지 않으면 질량유량을 다시 가정하고 반복 계산을 하였다.

모세관내 냉매유동의 점성과 마찰계수는 액상영역과 이상영역으로 나누어 기존 문헌의 유동 모델을 사용하였다. 점성모델은 액상의 경우 온도와 압력으로부터 REFPROP7.0을 이용하여 구하였고, 이상영역은 식 (1)의 McAdam's et al. 모델을 사용하였다. 직관부의 마찰계수는 액상과 이상영역에서 식 (2)의 Churchill 상관식을 적용하였고, 코일부의 마찰계수는 액상영역의 경우에는 Ito⁽¹¹⁾ 모델을 이용하여 식 (3)과 같이 적용하였다. 이상영역에서는 식 (4)의 Yufeng⁽⁵⁾이 언급한 Giri 모델을 적용하였다.

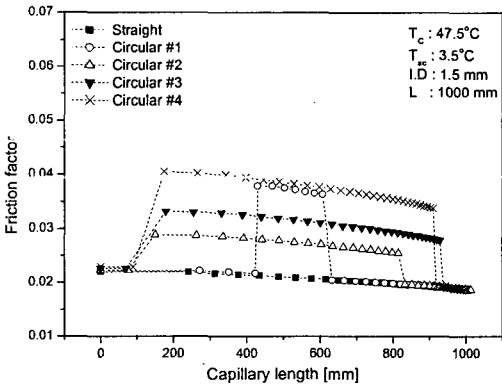


Fig. 5 Variation of friction factor

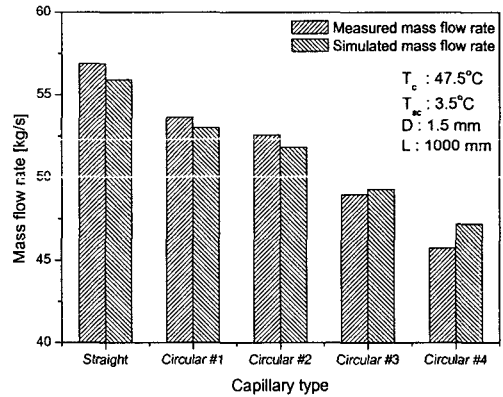


Fig. 7 Comparison of simulated mass flow rate with measured mass flow rate

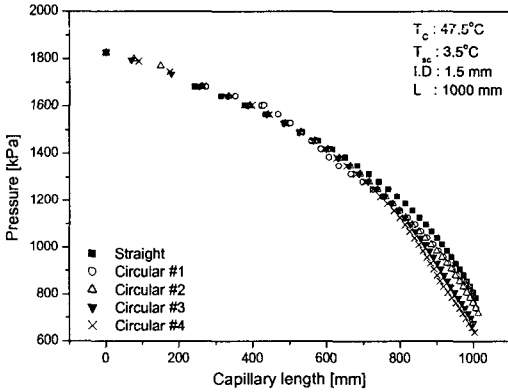


Fig. 6 Variation of pressure along the tube

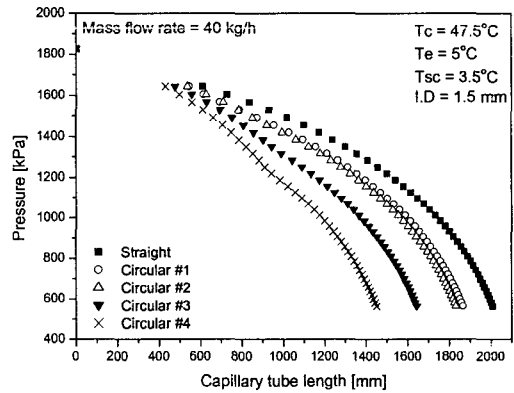


Fig. 8 Variation of capillary length with coiled shape

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_f} \quad (1)$$

$$f = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right]^{1/12} \quad (2)$$

$$A = \left\{ 2.457 \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\epsilon}{D}} \right] \right\}^{16}, \quad B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

$$f_{sc} = \left(\frac{d}{D} \right)^{0.5} \left\{ 0.0725 + 0.076 \left[Re \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^{-0.25} \right\} \quad (3)$$

$$f_{fp} = \frac{1.1258}{Re^{0.1938} \left(\frac{D}{d} \right)^{0.5391}} \quad (4)$$

Fig. 5는 모세관출구 방향에 따른 모세관내 마찰 계수 변화를 나타낸다. 코일된 곡관부에서는 마찰 계수값이 증가하고, 모세관 기하학적 형상에 따른 구간별 마찰계수값의 차이가 압력강하와 냉매유량에 영향을 주는 요인임을 알 수 있다. Fig. 6은 모세관의 기하학적 형상조건에 따라 동일한 모세관 길이에서의 압력분포를 나타낸다. 코일 직경이 작을수록, 곡관부 구간이 길수록 더 큰 압력강하를 나타내었다.

Fig. 7은 모세관의 기하학적 형상조건에 따라 모세관을 통과하는 냉매의 질량유량을 실험조건과 동일한 조건에서 시뮬레이션한 결과를 실험값과 비교하였다. 직관형 모세관에서는 실험값이 1.8% 높게 나왔으나 코일형상이 많아질수록 시뮬레이션 값이 3.2% 높게 나타났다. 이러한 경향은 다른 운전조건에서도 나타났다. 이것은 코일부에 적용된 마찰계수와 2차유동 영향에 대한 연구가 더 필요함을 나타낸다.

Fig. 8은 동일한 냉매유량을 얻기 위해서 모세관

출구에서 초킹과 주어진 온도조건을 만족하면 수렴하도록 모델링한 결과를 나타낸다. 코일형의 경우 모세관 길이를 직관형에 비하여 짧게 선정해야 함을 알 수 있다.

5. 모세관 유량 예측 상관식

5.1 코일형상을 고려한 유량 상관식 개발

본 연구에서 모세관 유량예측 모델을 개발하기 위하여 실험 데이터와 기존 문헌^(7,10)의 실험 운전 조건과 모세관 형상으로부터 데이터 베이스를 구축하였다. Table 2는 본 연구에 사용한 데이터베이스를 요약한 것이다. 기존 문헌으로부터 모세관의 다양한 형상과 운전조건을 반영하여 더 넓은 범위에 적용가능한 상관식을 개발하였다.

본 연구에서는 주어진 조건에서 모세관을 통과하는 냉매유량을 예측할 수 있는 경험적 유량 모델을 개발하기 위하여 모세관의 유량에 영향을 미치는 요소들에 대한 변수를 고찰하였다. 일반적으로 모세관의 유량예측 상관식은 모세관의 운전조건과 형상 변수의 조합으로 구성된다. 모세관의 운전조건은 상류압력, 과냉도, 하류압력을 포함하며, 모세관의 형상은 모세관의 직경 및 길이로 표현된다. 모세관의 하류압력이 입구 온도에 해당되는 포화압력보다 낮은 경우 일반적으로 초킹현상이 발생하여 모세관을 통과하는 냉매유량은 하류압력의 영향을 받지 않으므로 본 유량예측 상관식에서는 하류압력을 고려하지 않았다. 본 모델은 입구 온도에 해당하는 포화온도를 변수에 포함시켜 액상 영역에 대한 압력 차이를 주요 운전 변수로 고려하였다.

이론상으로 입구 온도에 해당하는 포화압력에서 단상의 냉매가 이상의 냉매로 변화되지만, 실제로는 냉매의 증발이 열역학적으로 포화상태인 지점에서 보다 하류 지점에서 시작되어 모세관 내부에는 준안정평형 영역이 존재한다. 준안정평형 영역은 표면장력, 압력강하, 냉매의 상태량 등의 영향을 받는다. 준안정평형 영역 및 관내부 마찰계수의 영향은 냉매의 동점성계수와 표면장력을 모델의 변수로 도입하여 고려하였다. 그 밖에 임계온도 및 증발잠열은 각각 과냉도의 무차원화 및 기포의 형성/성장에 대한 영향을 고려하기 위하여 변수로 포함되었다. 따라서 이상의 변수들을 함수 형태로 표현하면 식 (5)와 같다.

Table 2 Range of the database

Items	Present	Wolf et al ⁽⁷⁾	Hong ⁽¹⁰⁾
Length [mm]	1,000	508 ~ 2,032	1,000 ~ 2,000
Diameter [mm]	1.2 ~ 1.5	1.3 ~ 2.3	1.1 ~ 1.7
Condensing pressure [kPa]	1,553 ~ 2,152	1,093 ~ 2,067	1,439 ~ 1,930
Subcooling [°C]	3.5 ~ 11.5	3 ~ 30	3 ~ 18
Capillary shape	Coiled / Straight	Straight	Straight

$$\dot{m} = f(P_i, P_s, \Delta T_{sc}, L, D, v_f, v_g, \rho_f, \sigma, h_{fg}, T_c) \quad (5)$$

식 (5)에 포함된 변수를 Buckingham Pi 이론을 적용하여 7 개의 무차원 변수를 유도하였다. 유도된 무차원 변수를 사용의 편리성을 위하여 단순화시켰으며, 최종적으로 본 연구에서 얻은 무차원 변수를 Table 3에 나타내었다.

식(6)에 나타난 바와 같이 모세관의 코일직경(D)과 코일된 부분의 길이(C)를 고려하여 모세관 길이(L)를 등가길이의 개념을 도입하여 보정하도록 하였다. 코일직경이 작을수록, 코일감긴수가 많을수록 모세관내 유동저항이 증가하므로 직관형의 상당 길이로 모세관 길이를 계산하여 무차원상관식에 대입하도록 하였다. 즉, 1,000 mm 모세관의 코일직경(D)이 60 mm 이고 4 회 감긴 경우에 직관형 모세관길이를 환산하면 1,236 mm 로 24% 증가한 것과 같다. 이것은 모세관 형상을 반영한 Fig. 8의 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있다.

$$L_e = L \cdot e^{-0.0816 \left(\frac{d}{D}\right)} \cdot \left(1 + 0.2876 \left(\frac{C}{L}\right)^{1.4607}\right) \quad (6)$$

본 연구에서 유도한 무차원 변수와 데이터베이스를 이용하여 얻은 일반화된 모세관의 유량예측 상관식을 식 (7)과 같이 개발하였다. 이 때 무차원 변수들에 포함된 냉매의 모든 상태량은 REFPROP 7.0을 이용하여 계산하였다.

$$\pi_7 = 0.2553 \pi_1^{0.122} \pi_2^{0.0103} \pi_3^{-0.393} \pi_4^{-0.262} \pi_5^{-0.0727} \pi_6^{0.270} \quad (7)$$

Table 3 Dimensionless Pi-groups

Group	Parameter	Group	Parameter
π_1	$\frac{P_i - P_s}{P_c}$	π_5	$\frac{\sigma}{DP_i}$
π_2	$\frac{\Delta T_{sc}}{T_c}$	π_6	$\frac{\rho_f h_{fg}}{P_s}$
π_3	$\frac{L_e}{d}$	π_7	$\frac{\dot{m}}{D^2 \sqrt{\rho_f P_i}}$
π_4	$\frac{v_f - v_g}{v_g}$		

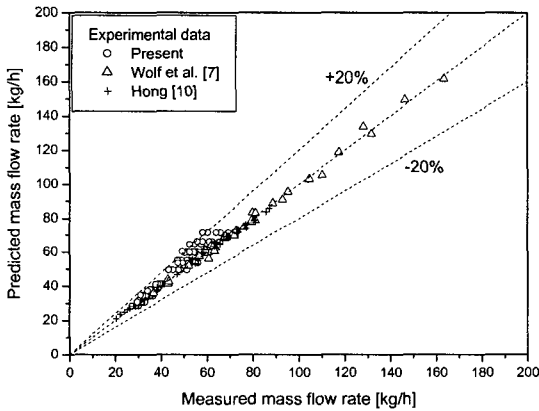


Fig. 9 Comparison of the predicted mass flow rate with database

5.2 상관식과 실험데이터의 비교

본 연구에서 개발한 일반화된 상관식의 정확성을 평가하기 위하여 상관식의 예측값을 측정값과 비교하였다. 본 연구에서 구한 상관식은 코일의 영향을 등가길이의 개념을 도입하여 유도하였다. 하지만 대부분 기존의 상관식은 코일효과를 고려하지 않고 실제 모세관의 길이만 고려하고 있다. 따라서 기존 상관식과 같이 코일의 영향을 고려하지 않고 모세관 길이만 고려한 경우 예측치와 실험치를 비교하면 Fig. 9와 같이 20% 정도로 코일형상 모세관에서 오차가 매우 크게 나타났다. Fig. 10은 본 연구에서 개발한 코일형상에 대한 모세관 등가길이(L_e)의 개념을 적용하여 예측치를 구하고 측정치와 비교한 것이다. 모든 실험데이터에 대하여 실험값과 예측값의 상대오차는 $\pm 6\%$ 이내였고, 평균편차는 0.33%, 표준편차는 3.24%로 실험값과 잘 일치하였다. 따라서, 본 상관식은 직관형이나 코일형에 모두 적용 가능한 모델이다.

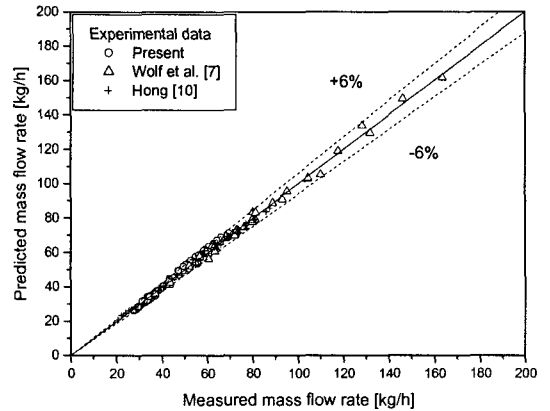


Fig. 10 Comparison of the predicted mass flow rate with database considering coiled effect

6. 결론

본 연구에서는 다양한 형상의 코일형 모세관 유동 특성을 평가할 수 있는 실험과 코일 형상을 반영한 시뮬레이션을 실시하였다. 실험 데이터를 이용하여 코일의 영향을 고려한 냉매유량 예측 상관식을 개발하였다.

(1) 냉매 질량유량은 모세관 입구의 과냉도, 압력 그리고 모세관 직경 커질수록 증가하였다. 코일의 형상에 따라 직관형 대비 최대 16% 정도의 유량 감소를 나타내었다.

(2) 코일형 모세관 형상을 반영한 시뮬레이션을 실시하여 모세관내 유동 특성을 확인하였다. 코일형 모세관을 시스템에 적용시에는 코일직경이 작을수록, 곡관부 구간이 길수록 냉매유량이 감소하므로 이를 고려하여 직관형 대비 짧게 선정해야 한다.

(3) 평가한 데이터와 기존의 문헌 데이터를 베이스로 무차원상관식을 개발하였다. 본 연구에서는 모세관 등가길이(L_e) 개념을 도입하여 코일의 영향을 고려한 일반적인 모세관 유량예측 상관식을 개발하였다.

(4) 본 연구에서 개발한 상관식은 실험값과 예측값의 상대오차는 $\pm 6\%$ 이내였고, 평균편차는 0.33%, 표준편차는 3.24%로 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부의 21 세기 프론티어 연구 개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술개발 사

업단의 연구비 지원(BB2-101-1-0-1)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Erth, R. A., 1970, "Two-Phase Flow in Refrigeration Capillary Tube : Analysis and Prediction," Ph. D. Thesis., The Univ. of Purdue.
- (2) Goldstein, S. D., 1981, "A Computer Simulation Method for Describing Two-Phase Flashing Flow in Small Diameter Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol. 87, pp. 51~60.
- (3) Li, R. Y., Lin, S. and Chen, Z. H., 1990, "Numerical Modeling of Thermodynamic Non-Equilibrium Flow of Refrigerant Through Capillary Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol. 96, Part 1, pp. 542~549.
- (4) Kuehl, S. J. and Goldschmidt, V. W., 1991, "Modeling of Steady Flows of R-22 Through Capillary Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol. 97, Part 1, pp. 139~148.
- (5) Yufeng, Z., Guobing, Z., Hui, X. and Jing, C., 2005, "An Assessment of Friction Factor and Viscosity Correlations for Model Prediction of Refrigerant Flow in Capillary Tubes," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 29, pp. 233~248.
- (6) Bolstad, M. and Jordan, R. C., 1948, "Theory and use of the Capillary Tube Expansion Devices," *Refrigerating Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 519~523.
- (7) Wolf, D. A., Bittle, R. R. and Pate, M. B., 1995, "Adiabatic Capillary Tube Performance with Alternative Refrigerants," ASHRAE Final Report No. RP-762.
- (8) Melo, C., Ferreira, R. T. S., Neto, C. B., Goncalves, J. M. and Mezvial, M. M., 1999, "An Experimental Analysis of Adiabatic Capillary Tubes," *Applied Thermal Eng.*, Vol. 19, pp. 669~694.
- (9) Kim, S. G., Kim, M. S. and Ro, S. T., 2002, "Experimental Investigation of the Performance of R22, R407C and R410A in Several Capillary Tubes for Air-Conditioners," *Int. J. of Ref.*, Vol. 25, pp. 521~531.
- (10) Hong, G. S., 2000, "An Experimental Study on the Effects of Oil on Refrigerant Flow Through Capillary Tubes," Ph. D Thesis, Korea Univ., Korea.
- (11) Ito, H., 1959, "Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes," *Transactions of ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 81, pp. 123~134.