

## 대체냉매를 적용한 일반화된 모세관의 유량예측 상관식

최 중 민, 장 용 희, 김 용 찬<sup>†</sup>

고려대학교 기계공학과

### A Generalized Empirical Correlation on the Mass Flow Rate through Adiabatic Capillary Tubes with Alternative Refrigerants

Jong Min Choi, Yong Hee Jang, Yongchan Kim<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

(Received June 18, 2003; revision received August 7, 2003)

**ABSTRACT:** The performance of adiabatic capillary tubes are measured to provide the data-base for a generalized correlation. Test conditions and capillary tube geometries are selected to cover a wide range typically observed in air-conditioning and heat pump applications. Based on extensive experimental data for R22, R290, and R407C measured in this study, a generalized correlation for refrigerant flow rate in adiabatic capillary tubes is developed by implementing dimensionless parameters for tube inlet conditions, capillary tube geometry, and refrigerant properties. The correlation yields good agreement with the present data for R22, R290, and R407C with average and standard deviations of 0.9% and 5.0%, respectively. In addition, approximately 97% of the data for R12, R134a, R152a, R410A, and R600a obtained in the open literature are correlated within a relative deviation of  $\pm 15\%$ .

**Key words:** Capillary tube(모세관), Generalized correlation(일반화된 상관식), Mass flow rate(유량), Refrigerator(냉장고), Heat pump(열펌프)

#### 기 호 설 명

$D$  : 모세관 내경 [mm]  
 $h_{fg}$  : 증발잠열 [kJ/kg]  
 $L$  : 모세관 길이 [mm]  
 $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/h]  
 $P_c$  : 임계압력 [kPa]  
 $P_{down}$  : 하류압력 [kPa]  
 $P_{in}$  : 입구압력 [kPa]  
 $P_{sat}$  : 포화압력 [kPa]

$T_c$  : 입계온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta T_{sub}$  : 과냉도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

#### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $\pi$  : 무차원 변수  
 $\sigma$  : 표면장력 [N/m]  
 $\mu$  : 점도 [ $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]

#### 하첨자

$f$  : 포화액체  
 $g$  : 포화기체  
 $mea$  : 실험값

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax:+82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

*pred* : 계산값

### 1. 서 론

팽창장치는 냉매유량과 시스템의 압력을 조절하는 장치로써 냉동시스템의 성능 및 용량조절의 측면에서 매우 중요한 부품이다. 모세관은 신뢰성과 가격적 측면에서 장점을 가지고 있어 주로 소형 냉동기와 냉장고의 팽창장치로 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 기존 냉매인 R12와 R22에 대한 모세관의 설계자료 및 상관식은 비교적 정립이 잘되어 있으나, 오존층 파괴 및 지구온난화 등의 환경적인 문제로 인하여 이들 냉매의 사용규제가 가속화되고 있으므로<sup>(1,2)</sup> 새로운 대체냉매를 적용하여 모세관을 최적 설계할 수 있는 상관식에 대한 연구가 필요한 실정이다.

모세관의 성능특성에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으며, 여러 경험적 상관식이 제시되었다.<sup>(3-7)</sup> 하지만, 복잡한 운전특성으로 인하여 여러 대체냉매를 적용하여 모세관 유량을 예측할 수 있는 상관식 작성에 대한 연구는 비교적 미흡한 실정이다. Wolf et al.<sup>(6)</sup>은 R22, R134a 및 R410A 냉매에 대한 성능 데이터에 기초하여 모세관을 통과하는 냉매유량을 예측할 수 있는 일반화된 상관식을 개발하였다. Melo et al.<sup>(7)</sup>은 소형 시스템

에 적합한 모세관에 대한 경험적 유량모델을 R12, R134a, 및 R600a에 대하여 개발하였다.

대부분 모세관의 유량예측 상관식은 적용 대상 냉매가 매우 제한적이며, R12 및 R22 대체냉매를 모두 포함하는 상관식은 찾아보기 어렵다. 또한 Pi-theorem을 적용하여 상관식의 무차원 변수를 구하는 과정에서 반복변수(repeating variable)로 냉매의 물리적인 상태량을 사용하고 있으므로 상관식이 비교적 복잡한 형태를 나타내고 있다. 본 논문에서는 먼저 R22, R290 및 R407C 냉매에 대하여 운전조건 및 모세관의 형상을 변화시키면서 모세관을 통과하는 냉매유량을 측정한다. 실험에서 얻은 성능자료를 바탕으로 Pi-theorem을 적용하여 단순한 형태의 무차원 변수를 도출하고, 대체냉매에 적용 가능한 일반화된 상관식을 지수함수의 형태로 제시한다. 개발된 상관식을 기존 문헌에 있는 실험데이터 및 상관식과의 비교를 통하여 상관식의 타당성을 검증하고, 적용범위를 확장한다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

Fig.1은 모세관의 성능특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 모세관 시험부의 과냉도, 응축압력, 증발압력을 쉽게 조절할

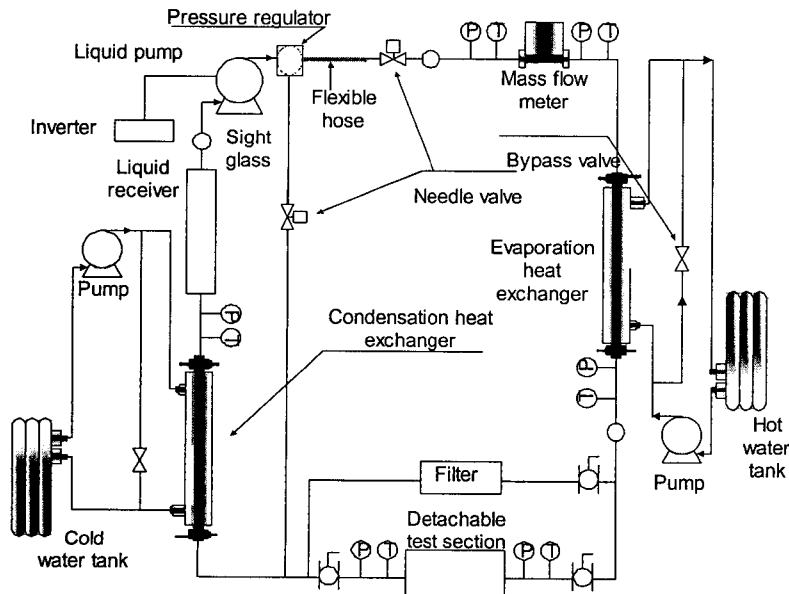


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

Table 1 Test conditions of the present study

Refrigerants		R22, R290, R407C
Capillary tube (mm)	Length	700, 1000, 1300
	Diameter	0.96, 1.21, 1.36
Operating temperature (°C)	Condensing	38, 45, 52
	Evaporating	7
	Subcooling	1, 4, 9, 14

수 있도록 구성하였다. 액체펌프를 이용하여 냉매유량을 조절하였으며, 펌프의 입구와 시험부의 출구에 바이패스라인을 설치하여 정밀한 운전조건 형성 및 시스템 안정성을 확보하였다. 모세관의 입구압력은 액체펌프의 회전수 변화로 조절하였으며, 과냉도는 모세관의 입구에 설치한 열교환기를 이용하여 조절하였다. 모세관에서 토출되는 2상상태의 냉매는 칠러 및 펌프로 구성된 응축 열교환기를 통과하면서 냉각되어 액체펌프로 순환되도록 구성하였다.

냉매유량은 질량유량계를 액체펌프 출구에 설치하여 측정하였으며, 정확도는 측정치의  $\pm 0.2\%$ 이다. 시험부의 입출구에서 온도와 압력은 각각 T형 열전대와 압력계를 이용하여 측정하였으며, 정확도는 각각  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  및  $\pm 6.9\text{ kPa}$ 로 나타났다.

Table 1은 본 연구에 사용한 모세관의 형상 및 실험조건을 나타내며, 변수의 모든 조합에 대한 실험을 수행하였다. 냉매 R22, R290 및 R407C에 대하여 각각의 운전조건에서 모세관을 통과하는 냉매유량을 측정하였다. 모세관의 입구압력은 Table 1에 나타난 응축온도에 해당하는 포화압력으로 설정하였다. 비공비 혼합냉매인 R407C에 대해서는 비등점의 온도를 기준으로 과냉도를 계산하였다. 출구압력은  $7^\circ\text{C}$ 에 해당하는 냉매의 포화압력으로 설정하였다.

### 3. 일반화된 유량예측 상관식의 개발

일반적으로 모세관의 유량예측 상관식은 모세관의 운전조건과 형상변수의 조합으로 구성된다.<sup>(3,6,7)</sup> 모세관의 운전조건은 상류압력, 과냉도, 하류압력을 포함하며, 모세관의 형상은 모세관의 직경 및 길이로 표현된다. 모세관의 하류압력이 입구온도에 해당되는 포화압력보다 낮은 경우 일반적으로 초킹현상이 발생하여 모세관을 통과하는 냉매유량은 하류압력의 영향을 받지 않으므로 본 유량

예측 상관식에서는 하류압력을 고려하지 않았다.

초킹현상이란 모세관을 흐르는 냉매유량이 모세관 내부의 액상 영역과 깊은 관계가 있다는 것을 의미하므로 본 모델은 입구온도에 해당하는 포화압력을 변수에 포함시켜 액상 영역에 대한 압력차이를 주요 운전변수로 고려하였다. 이론상으로 입구온도에 해당하는 포화압력에서 단상의 냉매가 2상의 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.<sup>(8)</sup> 준안정평형 영역 및 관내부 마찰계수의 영향은 냉매의 점도, 밀도, 표면장력을 모델의 변수로 도입하여 고려하였다. 그 밖에 임계온도 및 증발잠열은 각각 과냉도의 무차원화 및 기포의 형성/성장에 대한 영향을 고려하기 위하여 변수로 포함되었다. 모세관의 표면조도는 냉매유량에 영향을 미치지만, 기존 상용 모세관의 조도 범위 ( $0.09\sim 0.15\ \mu\text{m}$ )가 매우 제한되어 있어 본 상관식에는 고려하지 않았다. 또한, 냉매에 혼합되어 냉동시스템을 순환하고 있는 오일도 냉매유량에 영향을 미치지만 본 연구에서는 오일이 포함되지 않는 순수냉매를 작동유체로 고려하였다. 따라서 이상의 변수들을 함수형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{m} = f((P_{in} - P_{sat}), \Delta T_{sub}, L, D, \mu_f, \mu_g, \rho_f, \rho_g, \sigma, h_{fg}, T_c) \quad (1)$$

식(1)에 포함된 변수 중에서  $D$ ,  $\rho_f$ ,  $\mu_f$  및  $T_c$ 를 반복변수로 Buckingham Pi theorem<sup>(9)</sup>을 적용하여 상관식을 구성하기 위한 8개의 무차원 변수

Table 2 Dimensionless Pi-groups

Group	Parameter	Group	Parameter
$\pi_1$	$\frac{\dot{m}}{D^2 \sqrt{\rho_f P_{in}}}$	$\pi_5$	$\frac{\rho_f}{\rho_g}$
$\pi_2$	$\frac{P_{in} - P_{sat}}{P_c}$	$\pi_6$	$\frac{\mu_f - \mu_g}{\mu_g}$
$\pi_3$	$\frac{\Delta T_{sub}}{T_c}$	$\pi_7$	$\frac{\sigma}{DP_{in}}$
$\pi_4$	$\frac{L}{D}$	$\pi_8$	$\frac{\rho_f h_{fg}}{P_{sat}}$

를 유도하였다. 유도된 무차원 변수를 사용의 편리성을 위하여 단순화시켰으며, 최종적으로 본 연구에서 얻은 무차원 변수를 Table 2에 나타내었다. 냉매유량에 대한 무차원 변수인  $\pi_1$ 을 다른 7개의 무차원 변수에 대하여 지수함수 형태로 나타내었다. 본 연구에서 측정한 R22, R407C, R290의 실험 데이터에 기초하여 비선형 회귀법을 적용하여 일반화된 모세관 유량예측 상관식의 계수 및 지수들을 결정하였다. 식(2)는 본 연구에서 얻은 일반화된 모세관의 유량예측 상관식을 나타내며, 이때 무차원 변수들에 포함된 냉매의 모든 상태량은 REFPROP<sup>(10)</sup>을 이용하여 계산하였다.

$$\pi_1 = 0.1495 \times 10^{-3} \pi_2^{-0.087} \pi_3^{0.188} \pi_4^{-0.412} \times \pi_5^{-0.834} \pi_6^{0.199} \pi_7^{-0.368} \pi_8^{0.992} \quad (2)$$

4. 일반화된 상관식의 검증 및 비교

4.1 상관식과 R-22, R-290 및 R-407C에 대한 실험 데이터의 비교

일반화된 상관식의 정확성을 평가하기 위하여 상관식의 예측값을 본 연구에서 측정한 R22, R290, R407C에 대한 데이터와 비교하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실험 데이터의 97%가 예측값과  $\pm 10\%$  이내에서 잘 일치하였으며, 평균오차는 0.9%, 표준편차는 5.0%로 나타났다. 또한 상관식의 예측값을 본 모델의 데이터베이스에 포함되지 않은 Wolf et al.<sup>(6)</sup>의 R22 데이터와 비교하여 Fig. 3

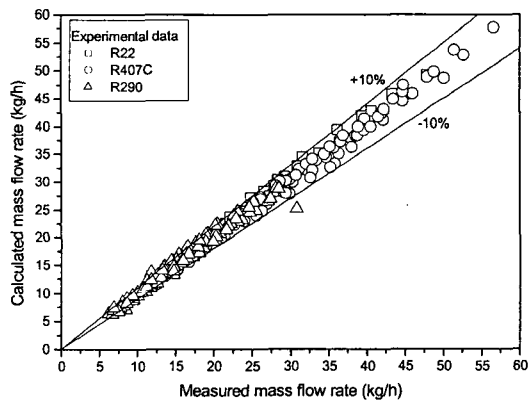


Fig. 2 Comparison of predicted mass flow rate with measured data in this study.

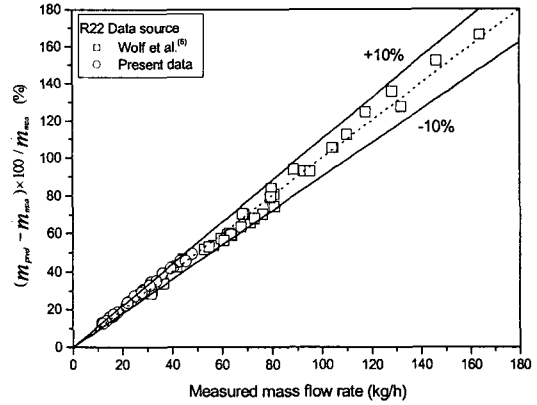


Fig. 3 Comparison of predicted mass flow rate with measured data for R-22.

에 나타내었다. Wolf et al.<sup>(6)</sup> 데이터의 98%가 본 상관식의 예측값과  $\pm 10\%$  이내에서 잘 일치하였다. 일반적으로 Wolf et al.<sup>(6)</sup>의 냉매유량은 본 연구에서 얻은 실험결과보다 비교적 높은 범위를 나타내고 있지만, 본 상관식은 Wolf et al.<sup>(6)</sup>가 측정한 유량범위에 대해서도 냉매유량을 비교적 잘 예측하고 있으며, 평균오차와 표준편차는 각각 0.88% 및 5.70%를 나타냈다.

4.2 상관식과 새로운 냉매 데이터의 비교

모세관 상관식의 데이터베이스로 이용된 R22, R290 및 R407C 냉매 이외의 새로운 냉매에 대한 상관식의 적용 가능성을 평가하기 위하여 기존 연구자들<sup>(4,6,7)</sup>의 R12, R134a, R152a, R410A 및 R600a

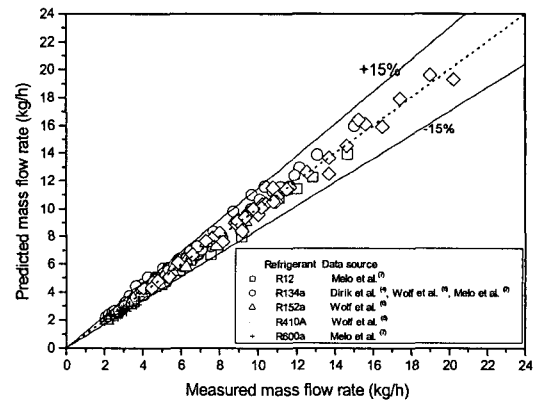


Fig. 4 Comparison of predicted mass flow rate with measured data in open literature.

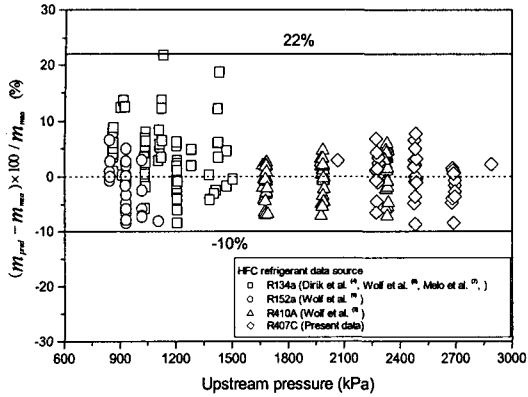


Fig. 5 Deviations of predicted mass flow rate from measured data for HFCs.

에 대한 실험 데이터와 상관식을 비교하였다. Fig. 4는 상관식의 예측값과 R12, R134a, R152a, R410A 및 R600a에 대한 실험 데이터를 비교하여 나타내고 있다. 대략 96%의 데이터가 상관식의 예측값과 ±15% 이내에서 일치하였다. Figs. 5 및 6은 상류압력 변화시켰을 때, 각각 HFC 및 HC 계열 냉매에 대한 실험 데이터와 예측값의 상대오차를 나타낸다. 모든 운전조건에 대하여 상관식과 실험 데이터는 HFC 냉매에 대하여 -10%에서 +22% 내에서 일치하였으며, HC 냉매에 대해서는 -19%

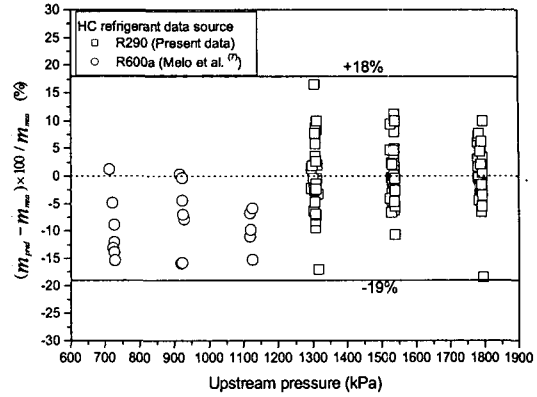


Fig. 6 Deviations of predicted mass flow rate from measured data for HCs.

와 +18% 내에서 일치하였다. 다른 냉매와 비교하여 R290 냉매에 대해서 상관식의 예측치가 실험값과 다소 큰 오차를 나타냈다.

4.3 기존 모델과의 비교

본 연구에서 개발한 일반화된 모세관의 상관식, Wolf et al.<sup>(6)</sup> 및 Melo et al.<sup>(7)</sup>의 일반화된 모세관 모델과 8종류의 냉매 데이터와의 평균오차와 표준편차를 Table 3에 나타내었다. Wolf et al.<sup>(6)</sup>의

Table 3 Comparison of the correlations with experimental data

Data source			Correlations					
			Wolf et al. <sup>(6)</sup>		Melo et al. <sup>(7)</sup>		Present	
			Ave. dev.*	Stan. dev.**	Ave. dev.*	Stan. dev.**	Ave. dev.*	Stan. dev.**
CFC	Melo et al.	R12	16.24	5.12	-0.36	3.93	-4.40	3.51
HCFC	Present	R22	6.90	11.41	2.96	9.32	0.88	5.70
	Wolf et al.	R22						
HFC	Present	R407C	10.02	16.80	-0.14	12.29	0.98	4.87
	Wolf et al.	R134a R152a R410A						
	Melo et al.	R134a						
	Dirik et al.	R134a						
HC	Present	R290	25.22	8.63	16.38	10.12	-1.11	6.61
	Melo et al.	R600a						

\*Ave. dev. =  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\dot{m}_{pred} - \dot{m}_{meas}) \times 100 / \dot{m}_{meas}]$

\*\*Stan. dev. =  $\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\dot{m}_{pred} - \dot{m}_{meas}) \times 100 / \dot{m}_{meas}]^2 - \text{Ave. dev.}^2 \right)^{0.5}$

Table 4 Limitations of the present correlation

Parameter		Max.	Min.
Capillary tube (mm)	Length	508	5080
	Diameter	0.66	3.05
Operating conditions	$P_{in}$ (kPa)	532	2990
	$\Delta T_{sub}$ (°C)	0.7	18.9
	$P_{down}$ (kPa)	Below $P_{sat}$ according to inlet temperature	

모델은 모든 냉매에 대하여 높은 평균오차와 표준편차를 나타냈다. Wolf et al.<sup>(6)</sup>의 모델은 HCFC 계열 냉매에 대해서는 각각 6.9%와 11.41%의 평균오차와 표준편차를 나타내고, CFC 및 HC 계열 냉매에 대해서는 각각 16.24%와 25.22%의 평균오차를 나타냈다. 일반적으로 Wolf et al.<sup>(6)</sup>의 모델은 다른 연구자들의 데이터와는 큰 차이를 나타냈다. Melo et al.<sup>(7)</sup>의 모델은 HCFC 및 HFC 계열에 대한 데이터와는 비교적 잘 일치하여 각 냉매계열에 대하여 2.96%와 -0.14%의 평균오차를 나타냈으나, HC 계열 냉매에 대해서는 유량을 높게 예측하여 16.38%의 평균오차를 나타냈다. 본 연구에서 개발한 상관식은 모든 냉매족의 실험 데이터와 비교적 잘 일치하여 CFC 및 HC 계열 냉매에 대해서도 각각 -4.4%와 6.61%의 평균오차와 표준편차를 나타냈다. 특히, Wolf et al.<sup>(6)</sup> 및 Melo et al.<sup>(7)</sup>의 모델과 비교하여 유량범위가 작은 HC 계열 냉매인 R290과 R600a 냉매에 대해서 매우 우수한 예측성능을 나타냈다.

본 상관식의 개발에 사용된 무차원 변수들은 모든 냉매족에 대하여 적용 가능할 것으로 판단된다. 그러나 본 상관식의 검증에 사용한 냉매 이외의 작동유체, 운전조건 및 모세관 형상에 대해서 적용할 경우 정확도가 변화될 수 있다. 따라서 본 상관식은 본 연구 및 기존 연구자들의 실험 데이터와 비교한 범위인 Table 4에 명시된 제한조건에서 R12, R22, R134a, R152a, R407C, R410A, R290, R600a의 8개 냉매에 대하여만 신뢰성을 보장할 수 있다.

5. 결 론

R22, R290 및 R407C에 대하여 모세관의 형상과 입구조건을 변화시키면서 모세관의 성능을 측정하였다. 실험에서 얻은 데이터를 바탕으로 Pi-

theorem을 적용하여 단순한 형태의 무차원 변수를 도출하고, 대체냉매에 적용 가능한 일반화된 상관식을 지수함수의 형태로 제시하였다.

본 연구에서 측정한 실험결과, 문헌에 있는 데이터 및 상관식과의 비교를 통하여 상관식의 타당성을 검증하고 적용범위를 확장하였다. 개발된 상관식은 데이터베이스로 이용된 R22, R290 및 R407C 데이터에 대하여 각각 0.9% 및 5.0%의 평균오차와 표준편차를 나타냈다. 본 연구에서 얻은 상관식은 문헌에 나타난 R12, R134a, R152a, R410A 및 R600a 데이터와 비교하여 각각 0.73% 및 6.16%의 평균오차와 표준편차를 나타냈다. 또한, 본 연구에서 개발한 일반화된 모세관 상관식은 Wolf et al.<sup>(6)</sup> 및 Melo et al.<sup>(7)</sup>의 모델보다 여러 대체냉매에 대하여 우수한 예측 성능을 나타냈다.

후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bansal, P.K. and Rupasinghe, A.S., 1996, An empirical correlation for sizing capillary tubes, International Journal of Refrigeration, Vol. 19, No. 8, pp. 497-505.
2. Park, T. J., Lee, M. K., Jeong, J. H. and Chang, K. S., 2003, Comparison of performance variation between R-22 and R-410A refrigeration systems, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 166-176.

3. Kuehl, S. J. and Goldschmidt, V. W., 1991, Modeling of steady flow of R-22 through capillary tubes, ASHRAE Trans., Vol. 97, No. 1, pp. 139-148.
4. Dirik, E., Inan, C. and Tanes, M. Y., 1994, Numerical and experimental studies on adiabatic and non-adiabatic capillary tubes with HFC-134a, Proceedings, IIR-Purdue Refrigeration Conference, West Lafayette, U.S.A.
5. Lathrop, H. F., 1948, Application and characteristics of capillary tubes, Refrigerating Engineering, Vol. 56, No. 2, pp. 1-33.
6. Wolf, D. A., Bittle, R. R. and Pate, M. B., 1995, Adiabatic capillary tube performance with alternative refrigerants, ASHRAE Final Report No. RP-762.
7. Melo, C., Ferreira, R. T. S., Neto, C. B., Gonçalves, J. M. and Mezavila, M. M., 1999, An experimental analysis of adiabatic capillary tubes, Applied Thermal Eng., Vol. 19, pp. 669-694.
8. Chen, Z. H., Li, R. Y., Lin, S. and Chen, Z. Y., 1990, A correlation for metastable flow of refrigerant 12 through capillary tubes, ASHRAE Trans., Vol. 96, No. 1, pp. 550-554.
9. Buckingham, E., 1914, On physically similar systems: Illustrations of the use of dimensional equations, Physical Review, Vol. 4, No. 4, pp. 345-376.
10. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, REFPROP: Thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures, NIST Standard Reference Database 23. Version 6.01.