

일반화된 오리피스 유량예측 상관식 및 유량선도

최종민[†], 김용찬^{*}, 곽재수^{**}, 권병철

국립한밭대학교 기계공학부, ^{*}고려대학교 기계공학과, ^{**}한국항공우주연구원 항공추진그룹

A Generalized Flow Model and Flow Charts for Predicting Mass Flow Rate through Short Tube Orifices

Jong Min Choi[†], Yongchan Kim^{*}, Jae Su Kwak^{**}, Byong Cheol Kwon

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

*^{**}Aeropropulsion Department, KARI, Daejeon 305-333, Korea*

(Received June 19, 2004; revision received July 30, 2004)

ABSTRACT: With the phaseout of CFC and HCFC refrigerants, refrigeration and heat pump systems must be redesigned to match and improve system performance with alternative refrigerants. A generalized flow model for predicting mass flow rate through short tube orifices is derived from a power law form of dimensionless parameters generated by Pi-theorem. The database for developing the correlation includes extensive experimental data for R12, R22, R134a, R407C, R410A, and R502 from the open literature. The correlation yields an average deviation of 0.3% and a standard deviation of 6.1% based on the present database. In addition, rating charts for predicting refrigerant flow rate through short tube orifices are generated for R12, R22, R134a, R407C, R410A, and R502.

Key words: Short tube orifice(오리피스), Generalized flow model(일반화된 유량 모델), Flow chart(유량선도), Mass flow rate(유량), Heat pump(열펌프)

기호 설명

D : 오리피스 내경 [m]
 L : 모세관 길이 [m]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 P_c : 임계압력 [Pa]
 P_{down} : 하류압력 [Pa]
 P_{in} : 입구압력 [Pa]
 P_{sat} : 포화압력 [Pa]

T_c : 임계온도 [°C]

ΔT_{sc} : 과냉도 [°C]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m³]
 π : 무차원 변수
 σ : 표면장력 [N/m]
 μ : 점도 [Pa·s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1587

E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

하첨자

f : 포화액체

g : 포화기체
meas : 측정값
pred : 계산값

1. 서 론

지구 온난화와 오존층 파괴를 일으키는 CFC 및 HCFC 계열의 냉매는 환경적 측면에서 HFC 계열 또는 HFC 혼합냉매로 교체되고 있다.^(1,2) 새로운 대체냉매를 채용한 에어컨과 열펌프가 고효율의 최적상태로 운전되기 위해서는 시스템 각 요소기기의 정도 높은 성능 모델과 데이터가 필요하다. 오리피스 팽창장치는 간단한 구조, 저가, 높은 신뢰성 및 열펌프 시스템 적용시 체크밸브가 필요 없다는 등의 많은 장점을 가지고 있어서 에어컨과 열펌프 시스템의 팽창장치로 널리 사용되고 있다.⁽³⁻⁵⁾ 대체냉매의 사용에 따라 시스템을 설계 요구조건을 충족시키기 위해서 오리피스에 대한 유량예측 모델이 요구되고 있다.⁽³⁻⁵⁾

오리피스의 성능 및 유량 모델에 관한 많은 연구가 수행되었으나, 대부분 R12와 R22 냉매와 관련하여 수행되었으며, 여러 냉매에 적용 가능한 일반화된 유량예측 모델에 대한 연구는 매우 드물다.^(2,3) Aaron and Domanski⁽⁴⁾는 과냉의 입구조건에 대한 실험데이터를 이용하여 오리피스의 특성을 규명하고 유량예측 모델을 개발하였다. Kim and O'Neal⁽⁵⁾은 Aaron and Domanski⁽⁴⁾의 모델을 개선하여 R22 냉매에 대한 경험적 모델을 개발하였다. 최근에는 대체냉매를 적용한 여러 경험적 오리피스 유량예측 모델에 관한 연구가 수행되었다.^(2,3) Kim and O'Neal⁽⁵⁾은 단상의 오리피스 방정식을 수정하여 R134a의 유량예측 모델을 개발하고 성능을 고찰하였다. Payne and O'Neal⁽⁶⁾은 Kim and O'Neal⁽⁵⁾의 모델과 유사한 형태를 사용하여 HFC 혼합냉매에 대한 유량모델을 개발하였다.

Table 1 Database for the present correlation

Data source	Refrigerant	No. of data
Kim and O'Neal ⁽²⁾	R134a	205
Payne ⁽³⁾	R12, R502	70
Aaron and Domanski ⁽⁴⁾	R22	427
Kim and O'Neal ⁽⁵⁾	R22	247
Payne and O'Neal ⁽⁶⁾	R407C, R410A	208
Singh et al. ⁽⁷⁾	R134a	221

대부분의 오리피스 냉매유량 예측에 관한 경험적 모델은 단상의 오리피스 방정식을 변형한 형태로 개발되었으며, 대체냉매에 적용 가능한 일반화된 오리피스 유량예측 모델에 관한 연구는 매우 미미하다. 또한 개발된 유량예측 모델은 대부분 연구자 본인들의 실험 데이터만을 이용하여 신뢰성을 평가하였으며, 이에 따라 모델의 적용 범위가 매우 제한적이다. 본 연구에서는 기존 문헌으로부터 오리피스의 광범위한 운전영역과 형상변화에 따른 오리피스 성능평가 자료를 바탕으로 Pi-theorem을 적용하여 단순한 형태의 무차원 변수를 도출하고, CFC와 HCFC 및 HFC 냉매에 동시에 적용 가능한 일반화된 유량예측 모델을 개발하였다. 또한, 개발된 유량 모델을 실험데이터 및 기존에 개발된 유량 모델과 비교하여 모델의 신뢰성을 검증하고, 유량 모델을 이용하여 오리피스 선정용 유량선도를 제시하였다.

2. 일반화된 오리피스 유량예측 모델

2.1 데이터베이스

일반화된 오리피스 유량예측 모델을 개발하기 위하여 기존 문헌^(2,3,6,7)으로부터 R12와 R22의 대체냉매로 중요성이 증대되고 있는 냉매에 대한 데이터베이스를 구축하였다. Table 1은 본 연구에 사용한 데이터베이스를 요약한 것이다. 데이터는 광범위한 운전영역과 다양한 오리피스 형상에 대한 유량데이터를 포함하고 있다. 데이터는 R12, R22, R134a, R407C, R410A, R502의 6개 냉매를 포함하며, 총 1384개의 데이터로 구성되어 있다. 오리피스 유량은 운전조건과 형상뿐만 아니라 냉매 상태량의 영향을⁽²⁻⁶⁾ 받으므로 운전조건에 따른 상태량을 REFPROP⁽⁸⁾을 이용하여 계산하였다. Table 2는 본 연구에 사용한 오리피스 데이터의 운전조건 및 형상을 나타낸다.

Table 2 Range of the database

Parameter	Range
Length (mm)	9.5~25.4
Diameter (mm)	1.0~2.0
Condensing temp. (°C)	35~54
Evaporating temp. (°C)	-1.1~16.6
Inlet subcooling (°C)	0.1~20

2.2 유량예측 모델

일반화된 오리피스 유량예측 모델 개발을 위한 무차원 변수 생성을 위해 오리피스 유량에 관련된 변수들을 데이터 분석으로부터 도출하였다.^(2,3,6) 입구압력, 과냉도, 입구온도에 해당하는 포화압력과 하류압력을 오리피스 유량 관련 운전변수로 선정하였다. 오리피스 입구의 단상영역이 오리피스 유량에 큰 영향을 미치므로 포화압력은 오리피스 입·출구 관련 변수는 아니지만 유량 관련 변수로 고려하였다. 압력 관련 변수들은 동일한 응축온도에서의 냉매간 서로 다른 압력차이에 대한 보상을 위하여 각 냉매의 임계압력과의 차이를 압력 관련 변수로 수정하여 사용하였다.

오리피스 유동에서 준안정 평형(metastable) 영역은 유체의 밀도를 증가시켜 유량을 증가시키는 역할을 하며, 표면장력과 관내부의 압력강하 영향을 받는다.⁽⁹⁾ 그러므로 본 유량모델에 준안정 평형영역 및 마찰을 고려하기 위하여 유체의 밀도, 점도 및 표면장력을 변수로 고려하였다.

오리피스 유량에 영향을 미치는 형상변수로서 직경 및 길이를 변수로 선정하였다. 따라서, 오리피스 운전조건 및 형상변수와 유량은 식(1)로 표현된다.

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

식(1)의 변수에 대하여 D, ρ_f, μ_f 와 T_c 를 반복 변수로 이용하여 Pi-theorem에 의해 9개의 무차원 변수들을 생성하였으며, 생성된 무차원 변수

Table 3 Dimensionless Pi-groups

Group	Parameter	Group	Parameter
π_1	$\frac{\dot{m}}{D^2 \sqrt{\rho_f P_{in}}}$	π_6	$\frac{L}{D}$
π_2	$\frac{P_c - P_{in}}{P_c}$	π_7	$\frac{\rho_f}{\rho_g}$
π_3	$\frac{P_c - P_{down}}{P_c}$	π_8	$\frac{\mu_f - \mu_g}{\mu_g}$
π_4	$\frac{P_c - P_{sat}}{P_c}$	π_9	$\frac{\sigma}{DP_{in}}$
π_5	$\frac{\Delta T_{sc}}{T_c}$		

들을 Table 3에 나타내었다.

냉매유량에 대한 무차원 변수인 π_1 을 다른 8개의 무차원 변수에 대하여 지수함수 형태로 유량 모델을 구성하였다. R12, R22, R134a, R407C, R410A, R502의 데이터베이스를 이용하여 비선형 회귀법을 적용하여 일반화된 오리피스 유량예측 모델의 계수 및 지수들을 결정하였다. 식(2)는 본 연구에서 얻은 일반화된 오리피스 유량예측 모델을 나타낸다.

$$\pi_1 = 0.1378 \times \pi_2^{-0.950} \times \pi_3^{0.033} \times \pi_4^{0.769} \times \pi_5^{0.082} \times \pi_6^{-0.099} \times \pi_7^{-0.104} \times \pi_8^{0.554} \times \pi_9^{-0.034} \quad (2)$$

3. 유량 모델의 검증 및 비교

일반화된 오리피스 유량예측 모델의 신뢰성을 평가하기 위하여 모델의 예측값을 본 연구의 데이터베이스 및 Payne⁽³⁾의 모델과 비교하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 식(2)의 오리피스 유량예측 모델의 예측값과 6종류의 냉매에 대한 실험데이터와의 비교를 나타낸다. 모델의 예측값은 순수냉매에 대해서는 -16.5%에서 15.3%의 상대 오차를 나타냈으며, 혼합냉매에 대해서는 -20.7%에서 17.9%의 상대오차를 나타냈다. 또한 모델은 모든 냉매의 실험값과 0.3%의 평균오차와 6.1%의 표준편차를 나타냈으며, 실험데이터의 약 91%가 모델의 예측값과 ±10% 내에서 일치하였다.

유량모델의 각 냉매계열별 예측의 정확성 평가를 위하여 예측값과 실험값을 CFC, HCFC, HFC 냉매그룹과 각각 비교하였다. Fig. 2는 본 연구에

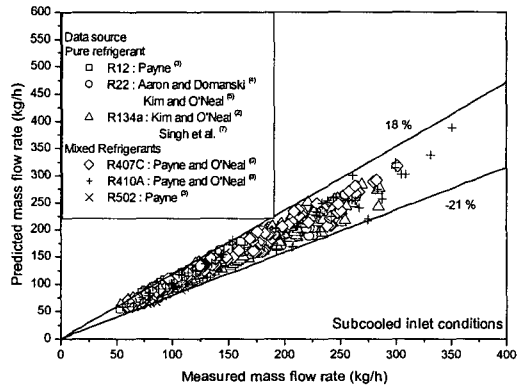


Fig. 1 Comparison of predicted mass flow rate with measured data.

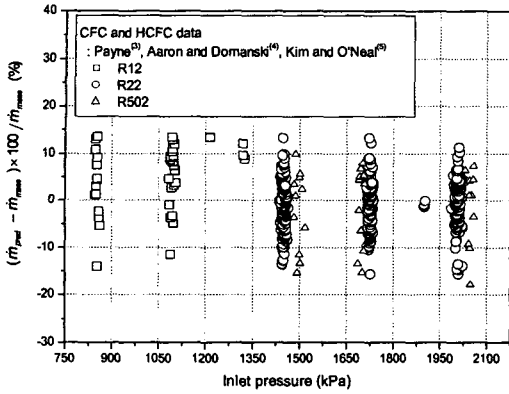


Fig. 2 Deviations of predicted mass flow rate from measured data for CFCs and HCFC.

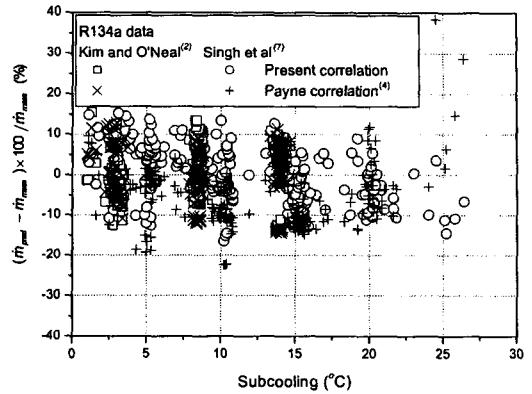


Fig. 4 Comparison of the present correlation with the Payne correlation for R134a.

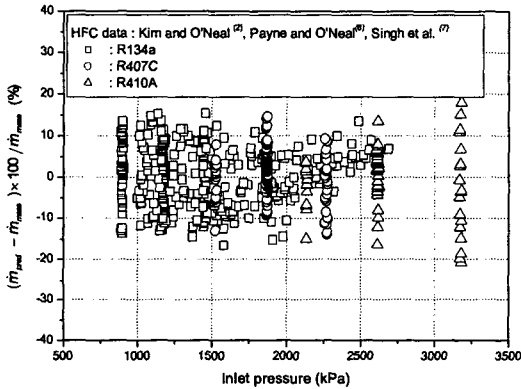


Fig. 3 Deviations of predicted mass flow rate from measured data for HFCs.

서 개발한 유량모델과 CFC 및 HCFC 냉매 실험값과의 상대오차를 나타낸다. 예측값과 실험값과는 -17.9% 에서 $+13.5\%$ 의 상대오차를 나타냈으며, 평균오차와 표준편차는 각각 -0.0% 와 5.0%

였다. Fig. 3은 HFC 냉매에 대한 유량 모델의 예측값과 실험값과의 비교를 나타낸다. 상대오차는 -20.7% 에서 $+17.9\%$ 를 나타냈으며, 평균오차와 상대오차는 각각 0.7% 와 7.1% 를 나타냈다. Figs. 1~3에 나타낸 바와 같이 일반화된 오리피스 유량모델의 냉매유량 예측값은 모든 냉매계열에 대하여 우수한 예측성능을 나타냈으며, 이는 본 유량 모델에 사용한 오리피스 유량에 영향을 미치는 무차원 변수가 적절히 선정되었기 때문이다.

본 연구에서 개발한 일반화된 유량예측 모델을 Payne⁽³⁾의 유량모델과 비교하였다. Table 4는 본 연구에서 개발한 모델과 Payne⁽³⁾의 유량 모델의 예측값과 각 냉매종류에 대한 측정값에 대한 상대오차를 나타낸다. Payne⁽³⁾의 유량 모델은 R12, R22, R407C, R410A 및 R502에 대하여 매우 우수한 예측성능을 나타냈으나, R134a 냉매에 대해서는 측정값과 매우 큰 오차를 나타냈다. Fig. 4는 R134a 냉매에 대한 본 모델과 Payne 모델의

Table 4 Comparison of the flow model with experimental data

Data		Correlation	
		Payne ⁽³⁾	Present
CFC	R12	Payne ⁽³⁾	$-13.9 \sim 19.5$
	R502	Payne ⁽³⁾	$-14.4 \sim 8.2$
HCFC	R22	Aaron and Domanski ⁽⁴⁾	$-8.9 \sim 10.4$
		Kim and O'Neal ⁽⁵⁾	$-10.1 \sim 12.4$
HFC	R134a	Kim and O'Neal ⁽²⁾	$-14.4 \sim 12.9$
		Singh et al. ⁽⁷⁾	$-22.4 \sim 38.3$
	R407C	Payne and O'Neal ⁽⁶⁾	$-13.3 \sim 11.4$
	R410A	Payne and O'Neal ⁽⁶⁾	$-5.5 \sim 16.6$

예측값과 측정값과의 비교를 나타낸다. Payne⁽³⁾의 유량 모델은 과냉도가 작은 영역에서는 좋은 예측성능을 나타냈으나, 과냉도가 높은 영역에서는 매우 큰 오차를 나타냈다. 이는 Payne⁽³⁾의 유량 모델은 0℃에서 13.9℃의 과냉도 영역에서 본인의 실험데이터만을 이용하여 개발되어 실험영역 이외의 운전조건에서는 유량 모델의 신뢰성이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서 개발한 유량 모델은 모든 냉매에 대하여 실험값과 비교하여 우수한 예측성능을 나타냈다. Payne⁽³⁾ 모델의 모든 냉매에 대한 예측값은 측정값과 -22%에서 38%의 상대오차를 나타냈으며, 본 연구에서 개발한 모델은 -20.7%에서 17.9%의 상대오차를 나타냈다.

본 연구에서 개발한 일반화된 오리피스스 유량 모델은 데이터베이스의 운전조건과 형상 범위 이

외에서도 적용은 가능하지만 유량 모델의 예측 정확도의 신뢰성은 보장할 수 없다. 그러므로 일반화된 오리피스스 유량 모델은 Table 2에 나타난 데이터베이스의 운전조건과 오리피스스 형상 내에서 신뢰성을 갖고 적용 가능하다.

4. 유량선도

본 연구에서 개발한 일반화된 오리피스스 유량예측 모델을 이용하여 쉽게 오리피스스의 냉매유량을 예측하기 위한 유량선도를 제시하였다. 유량선도는 Aaron and Domanski⁽⁴⁾가 제시한 방법과 동일한 방법을 적용하여 개발하였다. 기준 오리피스스의 냉매유량(\dot{m}_r)과 형상수정계수(Φ_1)을 이용하여 식(3)에 의해 오리피스스의 형상과 운전조건에 따라 냉매유량을 예측하도록 하였다.

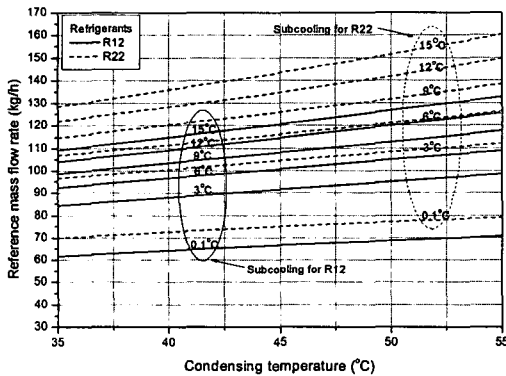


Fig. 5 Reference mass flow rate for R12 and R22 ($L=12.7$ mm, $D=1.35$ mm).

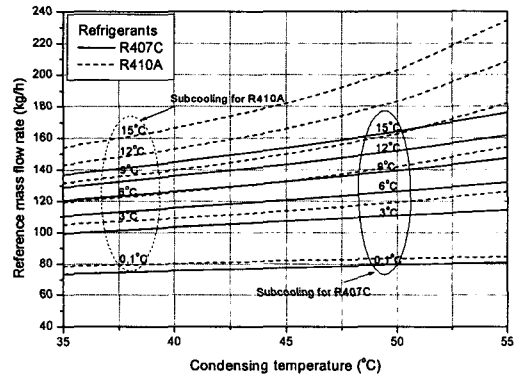


Fig. 7 Reference mass flow rate for R407C and R410A ($L=12.7$ mm, $D=1.35$ mm).

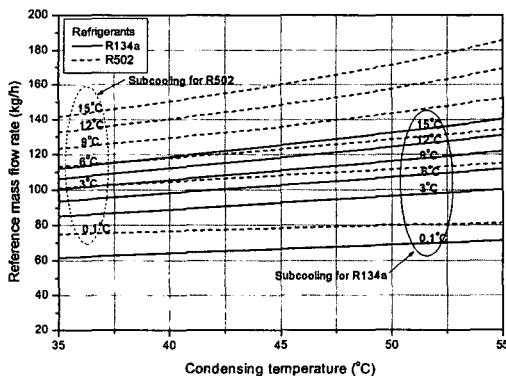


Fig. 6 Reference mass flow rate for R134a and R502 ($L=12.7$ mm, $D=1.35$ mm).

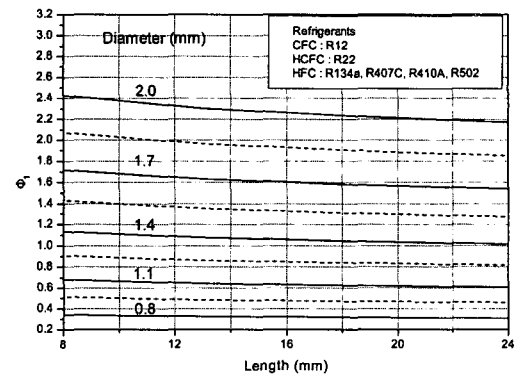


Fig. 8 Correction factor for short tube geometry for R12, R22, R134a, R407C, R410A, R502.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_r \cdot \Phi_1 \quad (3)$$

Figs. 5~7은 각각 R12/R22, R134a/R502, R407C/R410A 냉매의 기준 오리피스($D=1.35$ mm, $L=12.7$ mm)에 대한 응축온도와 입구 과냉도에 따른 오리피스의 유량선도를 나타낸다. 이때, 응축온도는 유량을 구하고자 하는 오리피스의 입구압력에 대한 포화온도이며, 과냉도와 응축온도를 이용하여 유량선도에서 기준 유량을 구한다. Fig. 8은 본 연구에 사용된 6개의 냉매에 대한 주어진 오리피스 형상 변화에 따른 수정계수를 나타낸다. 운전조건에 따라 Figs. 5~7로부터 냉매에 따른 기준 유량을 구한 후 오리피스 형상에 따라 Fig. 8의 수정계수를 이용하여 식(3)에 의하여 실제 오리피스 유량을 구한다.

5. 결 론

Pi-theorem을 이용하여 과냉의 입구 조건을 갖는 오리피스에 대한 일반화된 유량예측 모델을 개발하였다. 유량 모델은 운전조건, 오리피스 형상 및 냉매의 상태량으로 구성된 무차원 변수를 이용하여 지수함수 형태로 구성하였다. 유량 모델의 계수와 지수는 문헌으로부터 얻은 6개의 냉매(R12, R22, R134a, R407C, R410A, R502)에 대한 성능데이터를 이용하여 비선형 회귀법으로 결정하였다. 여러 냉매에 적용 가능한 일반화된 오리피스 유량예측 모델은 측정값과 비교하여 0.3%의 평균오차와 6.1%의 표준편차로 우수한 예측성을 나타냈으며, 모든 데이터에 대하여 -21%에서 18%의 상대오차를 나타냈다. 본 모델은 Payne의 모델보다 데이터의 범위가 넓어 높은 과냉도 조건에서의 정확도가 상대적으로 우수하게 나타났다. 또한, 오리피스에서의 R12, R22, R134a, R407C, R410A 및 R502 냉매의 유량을 쉽게 선정할 수 있는 유량선도를 제시하였다. 오리피스를 흐르는 실제 냉매유량은 기준 오리피스 형상에 대하여 운전조건에 따른 기준 유량과, 오리피스 형상 변화에 대한 형상수정계수를 선도로부터 각각 구하고, 이들을 곱하여 계산하였다.

후 기

본 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세

기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone, *Nature*, Vol. 249, pp. 810-812.
2. Kim, Y. C. and O'Neal, D. L., 1994, A semi-empirical model of two-phase flow of refrigerant-134a through short tube orifices, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, No. 4, pp. 426-436.
3. Payne, W. V., 1997, A universal mass flow-rate correlation for refrigerants and refrigerant/oil mixtures. Ph.D Thesis, Texas A&M Univ., USA.
4. Aaron, A. A. and Domanski, P. A., 1989, An experimental investigation and modeling of the flow rate of refrigerant 22 through the short tube restrictor, NIST-IR 89-4120, US Department of Commerce, NIST.
5. Kim, Y. C. and O'Neal, D. L., 1994, Two-phase flow of R-22 through short tube orifices, *ASHRAE Trans.*, Vol. 100, No. 1, pp. 323-334.
6. Payne, W. V. and O'Neal, D. L., 1995, Two-phase flow of two HFC refrigerant mixtures through short tube orifices, EPA-600/R-95-168, USA.
7. Singh, G. M., Hrnjak, P. S. and Bullard, C. W., 2001, Flow of refrigerant 134a through orifices tubes, *HVAC&R Research*, Vol. 9, No. 7, pp. 245-262.
8. 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.
9. 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.