

모세관과 오리피스 팽창장치의 냉매유량 조절특성의 비교

Comparison of refrigerant flow through capillary with short tube orifice

김 용 찬*, 최 종 민**
Y. C. Kim, J. M. Choi

Key words : Capillary(모세관), Short tube orifice(오리피스), Expansion device(팽창장치), Flow control(유량조절)

Abstract

Capillary and short tube orifice have been widely used as an expansion device in refrigeration and air-conditioning system. To improve the system performance, expansion devices need to be optimized with the components of a refrigeration system. In the present study, a numerical model for a capillary, which can predict properties along a tube and flow rate through a tube, was developed by assuming homogeneous two-phase flow. A semi-empirical flow model that can be used to evaluate the flow rate through a short tube orifice was also developed by summarizing the experimental data. Finally, the results of the numerical model for capillaries were compared with those of the semi-empirical model for short tube orifices to verify dominant flow factors for the expansion devices.

기 호 설 명

A_s : 모세관/오리피스 단면적, m^2	L : 모세관/오리피스 길이, mm
C_{ip} : 이상조건외의 수정계수	\dot{m} : 질량유량, kg/h
D : 모세관/오리피스 직경, mm	P : 압력, kPa
DR : D/D_{ref}	P_{down} : 증발압력, kPa
D_{ref} : 오리피스 표준직경(1.524mm)	P_j : 조정된 증발압력, kPa
$EVAP$: $(P_c - P_{down})/P_c$	PRA : P_u/P_c
f : 마찰계수	P_{up} : 응축압력, kPa
G : 질량유속, $kg/(h \cdot m^2)$	P_v : 증발압력, kPa
h : 엔탈피, kJ/kg	SUB : $(T_{sat} - T_{up})/T_c$
	T : 온도, C, K
	x : 건도
	v : 비체적, m^3/kg
	z : 길이방향의 좌표, mm

* 고려대학교 공과대학 기계공학과

** 고려대학교 공과대학 기계공학과 대학원

그리스 문자

- ϵ : 조도, mm
- ρ : 밀도, kg/m³
- τ_w : 벽면 전단응력, kPa
- σ : 표면장력, N/m
- μ : 점성, Pa · s

하첨자

- c : 임계상태
- down : 하류
- f : 포화액체상태
- g : 포화기체상태
- sat : 포화상태
- tp : 2상영역
- up : 상류

1. 서 론

냉동장치의 주요 구성기기의 하나인 팽창장치는 압력을 감소시켜 저온을 얻으며, 시스템을 흐르는 냉매유량을 조절한다. 기존에 사용되고 있는 팽창장치 중에서 모세관은 가격 및 신뢰도의 장점 때문에 냉장고 및 소형 에어컨의 팽창장치로 널리 쓰이고 있다. 오리피스 또는 TXV(thermostatic expansion valve)는 열펌프 및 에어컨에 주로 사용되고 있는데, 오리피스의 경우는, 생산가격 절감, 팽창장치의 검사 및 교체의 용이성, 대용량 시스템에의 적용 가능성, 부가적인 체크밸브의 불필요성(열펌프에 적용할 때)등 여러 장점때문에 최근 사용이 증대되고 있다.

모세관 및 오리피스 팽창장치에 관한 연구는 주로 R-12, R-22등 기존의 냉매에 국한되었으며, 최근 CFC 및 HCFC 사용규제와 더불어 HFC계 순수냉매 및 혼합냉매에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. Bolstad와 Jordan⁽¹⁾은 모세관의 단열조건에서 임계유동의 존재를 검증하였으며, Dudley⁽²⁾는 초기 비등점이 이론적인 계산에 의한 비등점보다 상당히 지연된 위치에서 발생하는 것을 관찰하였다. Kuehl과 Goldschmidt⁽³⁾는 이상유동을 균질유

동으로 가정하여 모세관에서의 R-22의 유동을 해석하였다. 김 등⁽⁴⁾은 모세관의 조도를 고려하여 모세관의 성능을 예측할 수 있는 수치모델을 세웠으며, 장 등⁽⁵⁾은 HFC계열 순수냉매 및 혼합냉매의 모세관내의 유동실험을 실시하여 모세관내 유동의 비등지연을 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

Aaron과 Domanski⁽⁶⁾는 R-22를 사용하여 오리피스의 성능시험을 실시하였으며, 오리피스 입구 조건이 과냉액체상태인 경우 유량을 예측할 수 있는 실험적 모델을 개발하였다. Kim 및 O'Neal^(7,8)은 HFC계 순수냉매 및 혼합냉매를 적용한 오리피스 팽창장치의 이상유동에 대하여 실험적 연구를 수행하였으며 팽창장치 입구 및 출구의 조건이 주어졌을 때 성능을 예측할 수 있는 경험모델을 제시하였다.

본 연구에서는 모세관의 수치모델을 통하여 유동 특성 및 유량을 계산하였으며, 계산결과를 오리피스 팽창장치에 대한 실험 및 경험모델의 결과와 비교하였다. 하지만, 실제 시스템에서 사용하고 있는 모세관 및 오리피스 팽창장치의 유량 범위가 서로 다르고 크기(직경 및 길이)를 동일하게 하여 특성을 비교하기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 다른 유량 범위를 갖는 팽창장치에 대하여 주요 운전변수인 응축압력, 증발압력과 과냉도 또는 건도등을 변화시키면서 유량곡선의 기울기 및 압력변화 등의 경향에 대한 정성적인 비교를 실시하여 두 팽창장치의 유량조절 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

모세관 수치해석 결과를 검증하고 오리피스 팽창장치의 모델 개발을 위한 데이터를 측정하기 위한 팽창장치 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 팽창장치 시험부의 입구과냉도, 상류압력 및 하류압력을 쉽게 조절할 수 있도록 시험부를 포함하는 냉매 순환 회로, 가열기를 포함한 온수 순환 회로, 냉각기(chiller)를 포함한 물/글리콜 순환회로로 구성하였다. 액체펌프를 사용하여 냉매를 순환시키며, 펌프의 회전수를 제어하여 팽창장치 입구의 압력을 조절하였다. 팽창장치 입구의 온도조건은 온수기 및 가열선(heat tape)의 열량을 제어하여 조절하

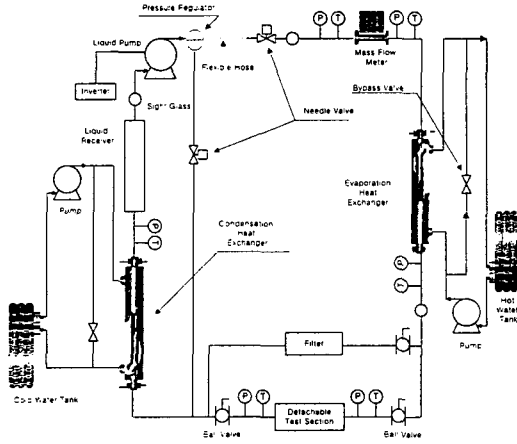


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

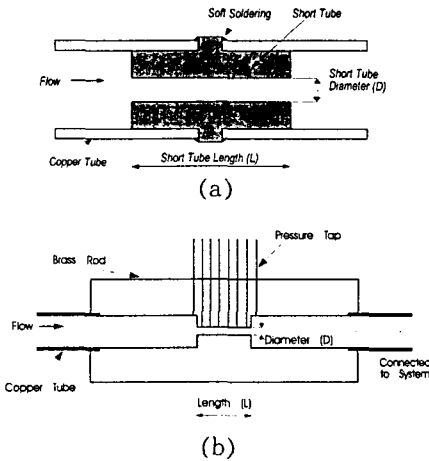


Fig.2 Test section of short tube orifice

며, 출구의 압력 및 온도조건은 냉각기와 응축 열교환기의 유량과 온도를 따라 조절하였다. Fig.1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

오리피스 시험부는 Fig.2(a)와 같은 형상을 갖도록 설계하였으며, 입구 챔퍼링(inlet chamfering)이 없는 직선형 오리피스에 대하여 시험을 실시하였다. 입구 챔퍼링이 있는 경우 챔퍼링의 각도에 따라 유량이 크게 변하므로 가공 및 측정에 어

려움이 있다. 또한 오리피스 내부에 5개의 압력 측정 구멍을 가공하고 압력계를 설치한 오리피스 시험부를 제작하여 유동조건에 따른 내부의 압력분포를 측정하였다.(Fig.2(b))

모세관 또는 오리피스 시험부는 가열기측 열교환기와 냉각기측 열교환기 사이에 설치하였으며, 응축압력(상류압력), 증발압력(하류압력) 및 입구과 냉도 등을 변화시키며 실험을 수행하였다. 시험조건은 모세관과 오리피스 모두 동일하게, 입구압력은 38℃, 45℃ 및 52℃의 응축온도에 해당하는 포화압력으로, 입구과냉도는 1℃, 4℃, 9℃ 및 14℃로 변화시키고, 출구압력은 7℃의 포화압력으로 고정하여 실험을 실시하였다. 오리피스의 경우에는 입구조건을 0%에서 최대 10%까지 변화시키며 오리피스를 통과하는 유량을 측정하였다.

본 실험에서 측정한 데이터는 온도, 압력 및 유량 등으로 계측기의 보정을 통하여 데이터의 신뢰성을 확보하였다. 온도는 열전대를 사용하여 측정하였으며, 열전대의 정확도는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이다. 압력변환계는 고압용과 저압용의 2종류를 사용하였는데, 고압용 압력변환계의 정확도는 전범위(full scale : 3447kPa)의 0.4%이며, 저압용 압력변환계는 전범위(full scale : 1724kPa)의 0.5%의 정확도를 가지고 있다. 냉매유량은 질량유량계를 사용하여 측정하였으며 물을 이용하여 유량계의 보정을 실시하였다. 유량계의 정확도는 $\pm 0.6\%$ 를 나타내었다. 상류압력이 $\pm 12\text{kPa}$, 하류압력이 $\pm 20\text{kPa}$, 입구과냉도는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이내일 때 운전변수가 정상상태에 도달하였다고 가정하고 데이터를 수집하였다.

3. 모세관의 수치모델

모세관의 구조는 간단하지만 관의 급격확대 및 축소, 관의 내부에서의 상변화 및 비등지연으로 인한 준안정평형유동(metastable flow), 초킹(choking)현상 등으로 인하여 유동현상이 복잡하여 완전한 수학적 모델로 해석하기 어렵다. 본 연구에서는 입구온도에 해당하는 포화압력이 증발압력보다 낮은 경우 모세관의 출구면에서 초킹이 발생한다는 기본적인 가정하에서 1차원, 정상상태 단일유동에 대한 모세관의 수치해석을 실시하였다. 모세관 유

동은 크게 액상영역, 이상영역 및 준안정평형유동 영역으로 구분하였으며, 모세관의 길이를 미소길이로 나누어 길이방향으로 상태량을 구하고 출구면에서의 임계조건으로 수렴을 판단하였다. 본 계산에서는 모세관의 조도의 변화에 따른 유량의 변화를 고찰할 수 있도록 상대 조도의 개념을 수치해석에서 고려하였다.

3.1 모세관 유동의 지배방정식

1) 액상영역

액상영역은 비압축성유동으로 가정할 수 있으며, 연속방정식 및 운동방정식으로 부터 액상상태의 압력분포를 구할 수 있다.

$$dz = \frac{-dP}{fG^2/(2\rho_p D)} \tag{1}$$

마찰계수 f 는 단상상태의 마찰계수를 공식화한 Colebrook⁽⁹⁾식을 이용하여 모세관 내부조도(ϵ)의 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

$$f = \frac{0.25}{[\log(\epsilon/(3.7D) + 2.51/(\text{Re}\sqrt{f}))]^2} \tag{2}$$

2) 이상영역

이상상태의 압력강하는 액상영역과는 달리 비선형의 압력강하를 나타내고 있으므로 모세관의 출구부분으로 갈수록 길이당 압력강하가 증가된다. 본 연구에서는 이상유동을 균질 평형유동으로 가정하고 지배방정식을 유도한다. 균질 평형의 이상유동에 대한 에너지방정식 및 운동량방정식으로부터 길이에 따른 건도의 변화를 식(3)와 같이 구한다.

$$\frac{dx}{dz} = -\frac{A}{B} \left(\frac{dP}{dz} \right)_{\text{up}} \tag{3}$$

이상상태의 압력강하는 모세관 벽의 마찰에 의한 압력강하 및 가속에 의한 압력강하의 합으로 계산한다.⁽¹⁰⁾

$$-\left(\frac{dP}{dz} \right)_{\text{up}} = \frac{-\left(\frac{dP}{dz} \right)_{\text{F}} + C \frac{dx}{dz}}{E} \tag{4}$$

여기서,

$$A = x \frac{dh_g}{dP} + (1-x) \frac{dh_l}{dP} + G^2 v_m \left[x \frac{dv_g}{dP} + (1-x) \frac{dv_l}{dP} \right]$$

$$B = h_{fg} + G^2 v_m v_{fg}$$

$$C = G^2 v_{fg}$$

$$E = 1 + G^2 \left[x \frac{dv_g}{dP} + (1-x) \frac{dv_l}{dP} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{\text{F}} = -\frac{fG^2 v_m}{2D}$$

그런데 건도 및 압력변화에 대한 식(3) 및 (4)가 서로 연계된 방정식(coupled equation)이므로 4계의 Runge-Kutta법을 적용하여 계산한다.

이상영역에서의 마찰계수는 이상의 균질유동에 대한 레이놀즈수(Re_m) 및 Colebrook식(식(2))을 적용하여 계산한다.

$$\text{Re}_m = \frac{V_m D}{\mu_p v_m} \tag{5}$$

여기서, 이상유동의 점성계수는 McAdams식을 사용한다.

$$\frac{1}{\mu_p} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_l} \tag{6}$$

3) 준안정평형유동

준안정평형영역은 입구에서의 압력강하로 인하여 유체의 압력은 포화압력 이하로 감소되지만 유동은 액체상태로 존재하는 과열액체의 유동영역을 나타낸다. 포화압력과 냉매의 비등점과의 차이를 비등지연 압력으로 나타내며 Chen 등⁽¹¹⁾이 개발한 다음 식을 사용하여 계산한다.

$$\frac{(P_s - P_v) \sqrt{kT_s}}{\sigma^{3/2}} = 0.679 \frac{v_g}{v_g - v_l}$$

$$\text{Re}^{0.914} \left(\frac{\Delta T_{sc}}{T_c} \right)^{-0.208} \left(\frac{D}{D} \right)^{-3.18} \tag{7}$$

여기서, $D = \sqrt{kT_s/\sigma} \times 10^4$, k 는 Boltzman상수, σ 는 표면장력(N/m), T_s 는 포화온도(K), P_s 는 포

화압력(Pa), P_c 는 비등압력(Pa)을 각각 나타내고 있다.

3.2 모세관의 수치계산

본 수치모델에서는 모세관의 입구조건 및 모세관의 형상을 입력으로 모세관을 통과하는 냉매유량, 내부의 압력 및 온도분포를 구한다. 액상 및 이상상태의 압력분포를 구하는 식들이 냉매의 질량유속을 포함하고 있기 때문에 먼저 질량유량을 가정하여 계산을 시작하며 반복계산을 통하여 임계조건(초킹조건)을 만족하고 계산된 모세관의 길이가 주어진 모세관의 길이와 일치하는 질량유량을 구한다.

일정면적 팽창장치는 시스템의 적절한 운전을 위하여 초킹조건을 만족하여야 한다. 본 수치계산에서는 모세관의 출구면에서 초킹을 가정하였으며, 초킹조건이 발생하는 임계압력을 Fanno유동을 이용하여 계산하였다. 액상영역은 압력이 선형적으로 감소하기 때문에 길이방향의 미소구간의 크기가 계산의 수렴에 영향을 주지 않으므로 구간의 길이를 일정하게 하였으나, 이상영역에서는 압력강하가 비선형적으로 나타나게 되며 구간이 크면 계산이 발산하기 쉽기 때문에 각 구간에서 처음 가정한 구간을 나누어가면서 구간의 수렴을 검사한 후 계산을 진행하였다.

Fig.3는 수치계산을 통하여 얻는 결과를 측정데이터와 비교한 그림으로, 본 연구의 측정범위 내에서는 수치모델이 ±5% 이내에서 실측자료와 잘 일치하였다.

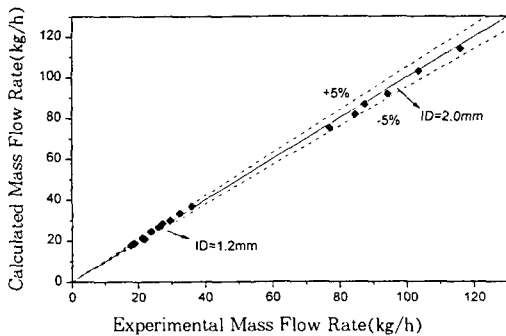


Fig.3 Comparison of experimental results with numerical results for capillary tubes

4. 오리피스 팽창장치 유량예측 모델

4.1 오리피스 유량예측 경험모델

냉동시스템에서 오리피스 출구의 유동조건은 이상상태로 존재하며 출구에서의 압력이 포화압력보다 낮을 경우 초킹조건을 만족하고 있으므로 단상의 오리피스 방정식을 이상의 오리피스 유동에 맞도록 변형하여 오리피스 냉매유량 예측모델(식(8))을 개발하였다.^(7,8)

$$\dot{m} = C_{ip} A_c \sqrt{2g_c \rho (P_{up} - P)} \quad (8)$$

여기서 P 는 초킹조건을 만족하도록 출구압력을 조정한 가상의 압력항이며 C_{ip} 는 이상상태의 입구조건을 고려한 수정계수이다.

식(8)에 도입된 수정계수는 실험결과를 토대로 유량에 대한 각 변수간의 영향을 고찰하여 주요 변수를 결정한 후, 무차원화하고 비선형 회귀곡선점합을 통하여 오차를 최소화할 수 있는 계수들을 결정하였다. Table 1은 R-134a, R-22 및 R407c (R32/125/134a(23/25/52)) 냉매에 대한 수정계수를 나타내고 있다.

$$P_f = P_{sat} \left[\begin{aligned} & b_1 + b_2 \cdot PRA^{b_3} \cdot LD^{b_4} \cdot SUB^{b_5} + b_6 \cdot PRA^{b_7} \\ & + b_8 \cdot EXP(b_9 \cdot DR \cdot LD^{b_{10}}) + b_{11} \cdot EVAP \end{aligned} \right] \quad (9)$$

$$C_{ip} = \frac{1}{(1 + a_1 x_{up}) \cdot (1 + a_2 (LD)^{a_3} Y^{a_4 n(LD)})} \quad (10)$$

$$Y = \frac{x_{up}}{1 - x_{up}} \cdot \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } DR &= D/D_{ref} & LD &= L/D \\ EVAP &= (P_c - P_{down})/P_c & PRA &= P_{up}/P_c \\ SUB &= (T_{sat} - T_{up})/T_c \end{aligned}$$

식(9)에서 PRA , SUB , DR 및 $EVAP$ 는 각각 입구압력, 과냉도, 직경 및 출구압력에 대한 무차원변수들이다. 식(10)은 이상조건에 대한 수정계수로 단상의 입구조건에서는 $x_{up}=0$ 이므로 $C_{ip}=1.0$ 로 되어 유량에 영향을 미치지 않지만 이상의 입구조건에서는 $x_{up}>0$ 이므로 C_{ip} 는 1보다 작은 값을 갖게 되어 유량에 영향을 미치게 된다.

Table 1 Coefficients of correction factors in the flow model

Eq.	Coefficient	R-134a	R-22	R407c
Eq.(9)	b_1	1.016	1.005	0.963
	b_2	10.061	5.737	4.286
	b_3	-0.330	-0.485	-0.278
	b_4	-0.176	-0.179	-0.043
	b_5	1.083	0.995	0.916
	b_6	0.000	0.268	0.072
	b_7	0.000	2.716	0.499
	b_8	-0.180	-0.226	-0.208
	b_9	-0.002	-0.021	-0.035
	b_{10}	2.960	2.000	1.844
	b_{11}	-0.075	-0.092	-0.091
Eq.(10)	a_1	-2.652	-5.870	-4.460
	a_2	5.771	3.317	10.695
	a_3	-0.447	0.231	-0.553
	a_4	0.382	0.511	0.394
Const	Unit	R-134a	R-22	R-407c
P_c	SI	4,056kPa	4,997.4kPa	4,619.1kPa
T_c	SI	374.21K	369.17K	359.89K

4.2 오리피스 유동특성선도

오리피스 팽창장치의 길이와 직경의 선정 또는 냉매유량의 계산을 위한 유동특성선도를 경험식에 기초하여 R-22 냉매에 대하여 작성하였다. 오리피스를 통과하는 냉매유량은 식(12) 및 Fig.4~Fig.6을 이용하여 예측할 수 있다.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_s \Phi_1 \Phi_2 \tag{12}$$

여기서, \dot{m}_a 는 특정형상의 오리피스에 대한 실제 냉매유량, \dot{m}_s 은 표준 오리피스에 대한 냉매유량 (Fig.4)을 각각 나타내며, Φ_1 (Fig.5)와 Φ_2 (Fig.6)은 각각 오리피스 형상과 과냉도/건도에 대한 수정계수이다.

표준 오리피스는 길이 12.7mm, 직경 1.35mm을 갖는 팽창장치이다. 표준 오리피스에 대한 냉매유량은 입구압력 및 과냉도/건도를 입력으로 Fig.4을 이용하여 결정한다. Fig.5는 표준 오리피스와 직경 및 길이가 다른 비표준 오리피스의 경우 냉매유량을 보정하기 유동계수이다. Fig.6은 냉매유량

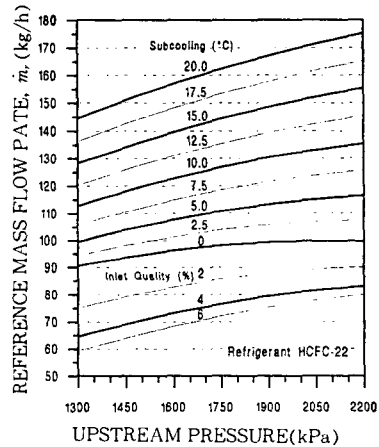


Fig.4 Reference mass flow rate for the standard short tube with $L=12.70\text{mm}$, $D=1.35\text{mm}$

에 대한 과냉도/건도의 영향이 길이와 직경의 비 (L/D)에 따라 다르게 나타나므로 이를 보정하기 위한 선도이다.

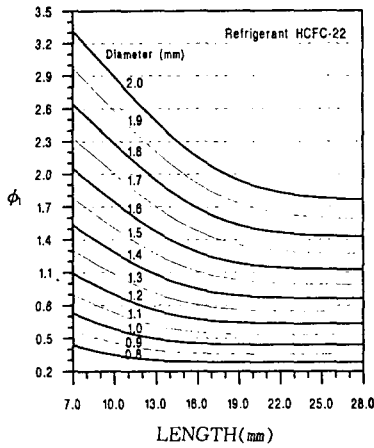


Fig.5 Correction factor for the short tube geometry

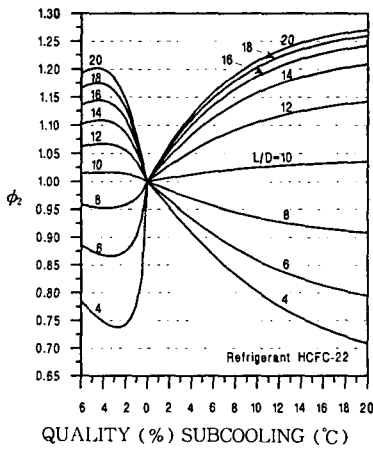


Fig.6 Correction factor for inlet subcooling or quality of short tube orifice

5. 모세관 및 오리피스 유동특성의 비교 및 고찰

모세관과 오리피스는 일정면적 팽창장치이므로 초킹, 준안정평형유동등 서로 유사한 유동특성을 나타내고 있지만 모세관의 길이가 오리피스에 비하여 최소 50배이상 길기 때문에 내부에서의 압력변화 및 냉매유량에 영향을 미치는 주요인자가 서로 다르다. 모세관은 입구조건이 과냉액체인 경우 관의 내부에서 비등(flashing)이 시작된 후 유동이

준안정평형 이상상태에서 평형 이상상태로 변하여 비선형의 압력강하를 하게 되며 출구면 직전에서 큰 압력강하를 나타낸다. 하지만, 오리피스의 경우 길이가 최대 25.4mm이므로 입구에서의 관의 급격 축소로 인한 압력강하가 크며 내부에서의 유동은 전 길이에 걸쳐 과냉 또는 이상상태의 준안정평형 상태로 존재한다.

모세관과 오리피스의 성능특성은 유동특성선도를 통하여 전체적인 경향을 쉽게 살펴볼 수 있다. 김 등⁽⁴⁾이 제시한 모세관의 유동특성선도와 본 연구에서 제시한 오리피스의 유동특성선도인 Fig.4 ~ Fig.6을 비교해보면 냉매유량에 대한 상류압력(응축압력) 및 팽창장치 형상의 영향은 서로 동일한 경향을 보여주고 있다. 하지만, 오리피스의 경우 냉매유량에 대한 입구 과냉도 및 건도의 영향은 모세관과는 달리 길이와 직경의 비(L/D)에 크게 의존하고 있다(Fig.6). 오리피스는 모세관에 비하여 길이가 짧아 유동저항이 작기 때문에 동일 직경의 경우 오리피스를 통과하는 냉매유량은 모세관에 비하여 대략 2배이상(오리피스 길이 25mm, 모세관 길이 2m 기준) 크게 나타났다. 그러므로 오리피스는 모세관에 비하여 용량이 큰 시스템(1RT 이상) 적합하다. 소용량의 경우에는 모세관에 비하여 오리피스의 직경이 너무 작아지므로 유량의 안정적 공급 측면에서 불리하다.

일정 면적팽창장치인 오리피스 및 모세관의 출구 압력(증발압력)이 입구온도의 포화압력보다 낮을 때는 증발압력의 변화에 따른 냉매유량의 변화는 일반적으로 5% 이내로 나타났다. 본 연구에서 고찰한 모세관 및 오리피스의 형상조건에서 유동은 이상적인 초킹유동조건은 만족하지 않지만 냉매유량은 증발압력의 변화에 매우 적은 영향을 받았다. 이러한 연구결과는 기존 연구에서 보고된 내용과 일치하고 있다.^(1,6,7) 여기에서 초킹현상은 증발압력을 포화압력이하로 감소시켜도 냉매유량이 일정하게 유지되는 상태로서 이때의 최대 냉매유량이 임계유량이 된다.

Fig.7와 Fig.8는 각각 모세관과 오리피스의 입구 과냉도 및 건도의 변화에 따른 압력분포를 보여주고 있다. Fig.7는 수치계산, Fig.8는 측정을 통하여 얻은 결과로 특정형상의 팽창장치에 대하여 입

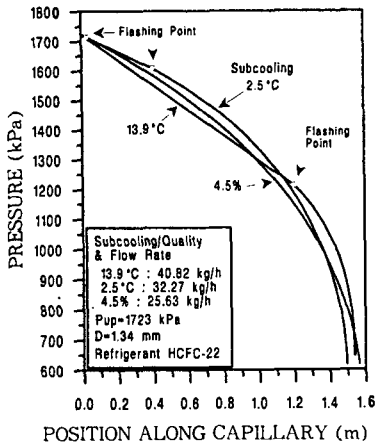


Fig.7 Pressure variation along capillary tubes

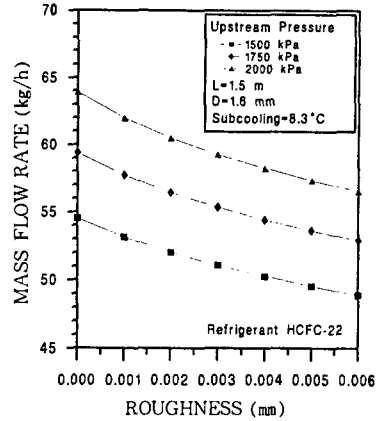


Fig.9 Flow dependency on roughness of a capillary tube

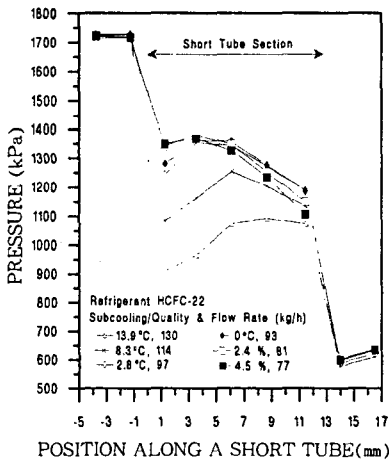


Fig.8 Pressure variation for the short tube with $L=12.83\text{mm}$ and $D=1.33\text{mm}$

구압력 및 출구압력을 일정하게 유지하면서 과냉도 또는 건도를 변화시켰다. 오리피스의 경우(Fig.8) 입구에서 관의 급격축소로 인한 큰 압력강하가 존재하며 입구부분에서 최소 압력점이 발생하며 최소 점은 vena contracta의 존재를 의미한다. 입구부분의 압력은 포화압력보다 낮지만 과열액체상태로 존재하므로 준안정평형 유동영역이며 압력이 포화압력 가까이 회복한 후 압력의 최대점 부근에서 비등이 발생한다. 입구과냉도가 감소함에 따라 관내부의 압력분포는 전체적으로 증가하며 입구에서의 압력강하는 감소하며 유량은 감소한다. 그러므로

오리피스의 경우 과냉조건에서 유량을 결정하는 주요인자는 입구 압력강하임을 알 수 있다. 입구조건이 이상상태인 경우, 건도가 증가하여도 입구압력강하는 동일하게 유지되며 관내부의 압력강하가 증가한다. 관내부의 압력강하 증가로 출구면에서 건도는 증가하며 임계유량을 감소시킨다.

모세관의 경우(Fig.7) 입구에서의 압력강하는 거의 무시할 만하며 관내부에서의 압력강하에 의하여 유량이 결정된다. 입구과냉도가 13.9°C인 경우, 1.2m 부근에서 증발이 일어나며 그 이후 영역에서는 이상상태의 큰 압력강하가 존재한다. 입구과냉도가 감소할수록 비등점은 점차 입구로 이동하고 유량이 감소하므로 이상상태 압력강하의 기울기는 점차 감소한다. 모세관에서 비등은 이론적으로 포화압력에서 발생하지만 실제로 비등은 이보다 낮은 압력인 하류에서 발생한다. 이러한 현상이 비등 지연이며, 비등 지연은 비등점을 모세관 출구쪽으로 이동시켜 액상영역을 넓히므로 냉매유량을 증가시킨다.

모세관의 냉매유량을 결정하는 주요 인자가 관내부의 압력강하이므로 이에 큰 영향을 미치는 모세관 내면 거칠기의 영향은 입구 압력강하에 따라 유량이 결정되는 오리피스의 경우보다 크게 나타나는 것으로 보인다. 본 연구에서는 수치모델을 이용하여 모세관의 조도를 변화시키면서 계산을 수행하였으며, 계산결과를 Fig.9에 나타내었다. 전체적으로

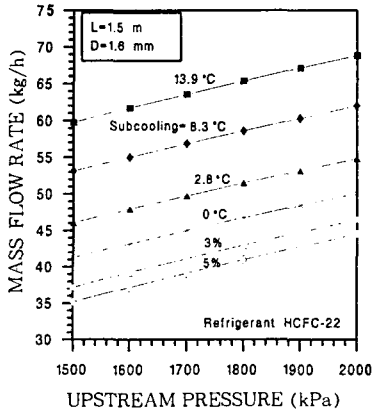


Fig.10 Flow dependency on upstream pressure for a capillary tube

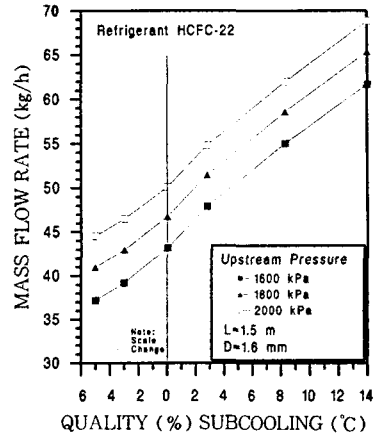


Fig.12 Flow dependency on upstream subcooling and quality for a capillary tube

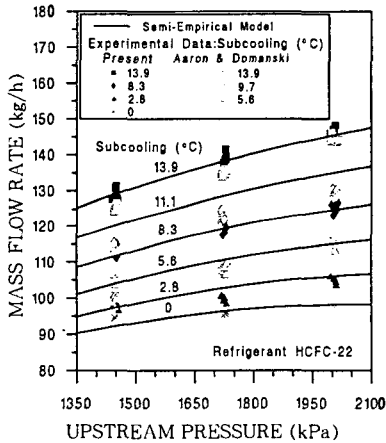


Fig.11 Flow dependency on upstream pressure for the standard short tube, $L=12.70\text{mm}$ and $D=1.35\text{mm}$

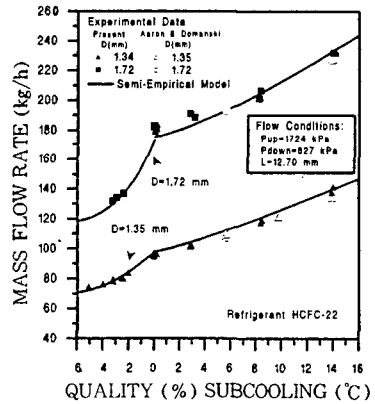


Fig.13 Flow dependency on upstream subcooling and quality for short tubes

모세관 내면의 거칠기가 증가할수록 냉매유량은 감소하며, 매끈한 면(거칠기=0mm)에 비하여 최대 12%까지 감소하고 있다. 김 등⁽⁴⁾은 직경 1.72mm, 길이 760mm의 모세관에 대하여 절대조도를 0에서 0.006mm로 증가하였을 때 냉매유량이 18% 감소한다고 보고하였다. 본 연구결과와 약간의 차이가 존재하지만 조도의 영향이 직경의 크기에 따라 다르게 나타나므로 두 결과의 오차는 기준 직경의 차이에 기인하는 것으로 보인다.

Fig.10과 Fig.11은 각각 모세관과 오리피스에

대하여 응축압력의 변화에 따른 냉매유량의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 모세관과 오리피스 모두에서 냉매유량은 응축압력의 증가에 따라 거의 직선적으로 변하고 있으며, 입구조건이 이상상태인 경우의 냉매유량은 과냉의 경우에 비하여 현저히 감소하였다. 오리피스 경우 유량변화에 관한 각선의 경사도는 과냉도의 증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig.12과 Fig.13은 각각 모세관과 오리피스에 대하여 과냉도 또는 건도의 변화에 따른 냉매유량

의 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 과냉도가 증가하거나 입구건도가 감소함에 따라 냉매유량은 증가하였다. 모세관의 경우 과냉도의 증가는 비등점을 출구쪽으로 이동시키며 밀도를 증가시키기 때문에 유량을 증가시키며, 건도의 증가는 보이드율의 증가로 인하여 유량의 감소를 가져온다. 오리피스의 경우 입구건도의 증가에(포화조건에서 건도 4%) 따른 급격한 유량감소가 모세관보다 현저히 나타나고 있다. 그리고 건도가 5%보다 높은 영역에서 모세관을 통과하는 냉매유량은 건도의 증가에 따라 선형적으로 감소하고 있지만 오리피스의 경우 유량의 감소는 미소하였다. 오리피스의 경우 보이드율의 급격한 증가로 인한 유량의 감소로 이러한 경향이 타당해 보이거나 모세관의 경우 실험결과가 없어 수치결과를 검증하지 못하였다. 그리고 오리피스의 경우(Fig. 13) 냉매유량에 대한 과냉도 또는 건도의 영향은 직경 및 길이의 비(L/D)에 따라 다르게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

수치적 및 실험적 연구를 통하여 모세관 및 오리피스 팽창장치의 선정 및 성능특성을 예측하기 위한 수치해석 프로그램 또는 경험모델을 제시하였다. 계산 또는 실험결과와의 비교를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

모세관에서는 출구부분에서 평형상태의 이상유동이 존재하지만 오리피스의 경우 길이가 너무 짧아 유동이 평형상태에 도달할 수 있는 충분한 시간이 존재하지 않으며 준안정평형상태가 유동을 지배하였다. 오리피스의 유량은 과냉조건에서는 입구압력강하에 의하여 결정되었으며 이상유동조건에서는 입구의 보이드율 및 관내의 압력강하에 의하여 결정되었다. 모세관의 경우 입구의 압력강하는 무시할 만하며 냉매유량은 내부압력강하에 의하여 결정되며 과냉도가 감소할수록 비등점이 입구쪽으로 이동하고 이상상태압력강하의 기울기가 점차 감소하였다.

모세관과 오리피스 팽창장치를 통과하는 냉매유량은 응축압력, 과냉도 또는 건도, 팽창장치의 형

상에 의존하였으며 초킹조건으로 인하여 증발압력에 대한 의존도는 거의 무시할 만하였다. 냉매유량은 응축압력이 증가할수록, 과냉도가 커질수록 증가하며, 입구건도의 증가에 따라 감소하였다. 포화액체조건에서 이상상태로 입구조건이 변할 때 유량의 감소가 현저하였으며, 유량의 감소는 오리피스의 경우 더 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구비(96-0200-12-03-3) 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bolstad, N. M., and R. C. Jordan., 1948, "Theory and use of the capillary tube expansion device", Refrigerating Engineering, Vol. 56, No. 6, pp. 519~523.
2. Dudley, J. K., 1962, A photographic study of the two-phase flow of Freon in small bore tubes, M. S. Thesis, Univ. of Wisconsin.
3. Kuehl, S. J., and Goldschmidt, V. W., 1991, "Modeling of steady flows of R-22 through capillary tube", ASHRAE Trans., Vol. 97, Part 1, pp. 139~148.
4. 김창년, 황의필, 박영무, 1995, "조도를 고려한 모세관 성능", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 283~289.
5. 장세동, 노승탁, 1995, "HFC계열 순수냉매 및 혼합냉매의 모세관내의 유동", 공기조화 냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 263~268.
6. Aaron, A. A, and Domanski, P. A., 1989, "An experimental investigating and modeling of the flow rate of refrigerant 22 through the short tube restrictor", NISTIR-89-4120, US Department of Commerce.
7. Kim, Y. and O'Neal D. L., 1994, "Two-phase flow of R-22 through short tube orifices", ASHRAE Trans., Vol 100, Part 1,

- pp. 323~334.
8. 김용찬, 1996, "R32/125/134a를 사용한 오리피스 팽창장치의 성능실험 및 모델링", 공기조화 냉동공학회 논문집, pp. 45~54.
 9. Gerhart, P. M., Gross, R., and Hochstein, J., 1992, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 2nd ed., Addison Wesley.
 10. Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*, Taylor and Francis.
 11. Chen, Z., Li, R., Lin, S., Chen, Z. Y., 1990, "A correlation for metastable flow of refrigerant 12 through capillary tubes", *ASHRAE Trans.*, Vol. 96, Part 1, pp. 550~554.