

단열 모세관내 R600a의 유동 특성

구학근^{1*}

¹동명대학교 냉동공조공학과

Flow Characteristics of R600a in an Adiabatic Capillary Tube

Hak-Geun Ku^{1*}

¹Division of Refrigeration and Air-Conditioning Eng., TongMyong University

요약 본 논문은 균질유동모델을 적용하여 단열 모세관내 R600a의 유동 특성을 이론적으로 조사하였다. 이 모델은 시뮬레이션 해석에 필요한 기본적인 질량, 에너지, 운동량 방정식에 근거하고 있다. 또한 2개의 마찰인자와 점성계수 모델을 이용하여 유동특성을 조사하였다. R600a의 열역학 및 전달 물성치는 EES 물성치 코드를 이용하여 계산하였다. 작동변수들에 대한 기초 설계자료를 제공하고자 단열 모세관내 R600a의 유동 특성을 분석하였다. 본 연구의 작동 변수에는 응축온도, 증발온도, 과냉각도, 모세관의 직경이 있다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. R600a용 단열 모세관내 응축온도, 증발온도, 과냉각도, 관직경은 모세관 전체길이에 영향을 준다. 즉 R600a용 모세관 전체길이는 식 (15)와 같은 상관식으로 나타낸다.

Abstract In this paper, flow characteristics of R600a in an adiabatic capillary tube were investigated employing the homogeneous flow model. The model is based on fundamental equations of mass, energy and momentum which are solved simultaneously. Two friction factors(Churchill) and viscosity(McAdams) are comparatively used to investigate the flow characteristics. Thermodynamic and transport properties of R600a are calculated employing EES property code. Flow characteristics analysis of R600a in an adiabatic capillary tube is presented to offer the basic design data for the operating parameters. The operating parameters considered in this study include condensation temperature, evaporation temperature, subcooling degree and inner diameter tube of the adiabatic capillary tube. The main results were summarized as follows: condensation and evaporation temperature, inlet subcooling degree and inner diameter tube of an adiabatic capillary tube using R600a have an effect on length of an adiabatic capillary tube. The length of an adiabatic capillary tube using R600a is expressed to the correlation shown in Eq. (15).

Key Words : Adiabatic capillary tube, R600a, Flow characteristics, Vapor compression system

Nomenclature

A : Area, [m²]

d_i : Inner diameter, [m]

dP : Pressure drop, [kPa]

f : Friction factor

G : Mass flux, [kg/(m²s)]

h : Enthalpy, [kJ/kg]

M : Mass flowrate, [kg/s]

L : Length of capillary tube, [m]

P : Pressure, [kPa]

Re: Reynolds Number, [Gd/μ]

T : Temperature, [°C]

V : Velocity, [m/s]

v : Specific volume, [m³/kg]

x : Quality

dz : Length of subsection, [m]

*교신저자 : 구학근(hgkur@tu.ac.kr)

접수일 09년 12월 22일

수정일 (1차 10년 01월 18일, 2차 10년 02월 08일)

게재확정일 10년 02월 24일

Greek symbols

- μ : Viscosity, [kg/(ms)]
- ρ : Density, [kg/m³]
- ε : Roughness, [m]
- θ : Angle, [°]

Subscripts

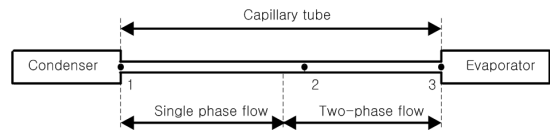
- c : Condensation
- cap : Capillary tube
- cr : Critical point
- e : Evaporation
- f : Friction
- g : Vapor
- in : Inlet
- l : Liquid
- lo : Liquid only
- re : Refrigerant
- sp : Single phase
- sub : Sub-cooling
- tp : Two-phase

1. 서론

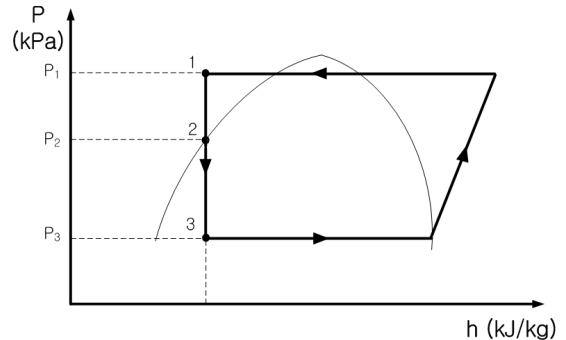
냉동공조장치에 사용되는 모세관은 고압에서 저압으로 냉매를 팽창시키는 역할을 하는 것으로, 주어진 운전 조건하에서 모세관의 길이와 직경은 모세관의 설계시에 매우 중요하다. 특히 지금까지 냉동공조장치의 모세관에 사용되고 있는 프레온계 냉매의 대체냉매로서, 최근에 각광받고 있는 탄화수소계 냉매인 R600a로 대체할 경우, R600a용 모세관 길이와 직경을 선정하는 것은 대단히 중요하다. 탄화수소계 냉매인 R600a용 단열 모세관내 유동 특성에 대한 종래의 연구를 살펴보면, 우선 Bansal & Rupasinghe[1]은 균질한 이상류 유동 모델을 적용하여 내경 0.5~1.2 mm이고 길이가 4.5~5.5 m인 R600a용 단열 모세관내 유동특성을 실험적으로 파악하였다. Melo 등 [2]은 단열 모세관내 R12, R134a, R600a에 대한 유동특성을 실험적으로 파악한 후, 모세관내의 유량과 길이를 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다. 이상의 종래연구에서도 알 수 있듯이, 지금까지 R600a를 적용한 단열 모세관내 유동특성을 파악한 사례가 거의 없으며, 또한 이에 대한 정확한 이론이 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 R600a 냉매를 적용한 단열 모세관의 성능에 미치는 인자들을 이론적으로 파악 및 분

석하고, 이를 통해 R600a를 적용한 모세관의 최적 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.



(a) 단열 모세관내 유체 유동영역



(b) P-h 선도

[그림 1] 단열 모세관내 유체 유동영역 및 P-h 선도

2. 수학적 모델

R600a용 모세관내 유동은 그림 1 (a)에서와 같이 크게 2가지 영역 즉, 1-2과정인 단상류영역(single phase flow region), 2-3과정인 이상류영역(two-phase flow region)으로 나눌 수 있다. 따라서 모세관의 전체길이(L_{cap})는 단상류 영역길이(L_{sp})와 이상류 영역길이(L_{tp})를 합한 것으로 나타낼 수 있다. 모세관내 1-3의 팽창과정을 그림 1 (b)의 압력과 엔탈피 선도에 나타내었다. 본 논문에서 사용되는 냉매의 열역학적 물성치와 분석은 EES(Engineering Equation Solver)[3] 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. R600a 냉매를 적용한 모세관의 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 모세관은 관직경이나 표면거칠기는 일정한 수평직관이다.
- 모세관을 통한 유동은 일차원이고 균질하다.
- 모세관내 유동은 단열 등엔탈피과정이고, 주위에 대한 일의 수수가 없다.
- 냉매는 오일이 혼합되어 있지 않는 순수 R600a이다.
- 모세관내 냉매 유동은 완전히 발달된 난류유동이다.
- 모세관 입구의 손실은 무시한다.

단열 모세관내 R600a의 유동특성을 조사하기 위해 질량, 에너지, 운동량 방정식을 기초로 하여 균질유동 모델을 적용하였다. 이는 R600a의 경우 프레온계 냉매에 비해 증발잠열이 높기 때문에 상대적으로 적은 양의 냉매를 충전하므로 인해 기상과 액상의 상대속도차가 작은 균질유동에 가깝기 때문이다.[4-5]

2.1 단상 유동영역

미소요소내 정상유동에 대한 질량보존의 법칙으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\left(\frac{AV}{v}\right)=0 \quad (1)$$

식(1)로부터 속도는 다음과 같다.

$$V = \frac{M}{A}v = Gv \quad (2)$$

수평관이므로 위치에너지를 무시하고($dz = 0$), 주위로부터 일의 수수가 없는 단열 정상유동에 대한 에너지 보존식과 식(2)로부터 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$dh + \frac{G^2}{2}dv^2 = 0 \quad (3)$$

모세관내 운동량 보존식으로부터 운동량 변화량은 위치변화에 따른 힘을 무시하면($\sin\theta=0$), 모세관내 마찰에 의한 항과 압력차에 의한 항으로 나타낼 수 있다.

$$-dP - f_{sp} \frac{dz}{d_i} \frac{V}{2} G = GdV \quad (4)$$

따라서 식 (4)를 모세관 길이에 대한 식으로 정리할 수 있다.

$$dz = \frac{2d_i}{f_{sp}} \left\{ -\left(\frac{\rho}{G^2}\right)dP - \left(\frac{dV}{V}\right) \right\} \quad (5)$$

식(5)에서 단상류 마찰인자, f_{sp} 는 Churchill[6]의 식으로 다음과 같다.

$$f_{sp} = 8 \left[\left(\frac{8}{Re}\right)^{12} + (A^{16} + B^{16})^{-3/2} \right]^{1/12} \quad (6)$$

여기서,

$$A = 2.457 \ln \frac{1}{(7/Re)^{0.9} + 0.27\epsilon/d_i}, \quad B = \frac{37530}{Re}, \quad Re = \frac{Gd_i}{\mu} \quad (7)$$

2.2 이상 유동영역

단상 영역의 에너지 보존식인 (1)과 같이 위치에너지와 일의 수수가 없다고 가정하면 다음과 같다.

$$dh + \frac{G^2}{2}dv^2 = 0 \quad (8)$$

이상류의 엔탈피와 비체적은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$h = h_l(1-x) + h_g x, \quad v = v_l(1-x) + v_g x \quad (9)$$

위의 식(8)과 (9)로부터 이상류 영역의 모세관 길이는 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$dz = \frac{2d_i}{f_{tp}} \left\{ \frac{d\rho}{\rho} - \frac{\rho}{G^2} dP \right\} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 이상류 마찰인자는 Churchill[6]식을 적용하여 계산하였다.

$$f_{tp} = \Phi_{lo}^2 f_{lo} \left(\frac{v_l}{v_{tp}} \right) \quad (11)$$

여기서,

$$\Phi_{tp} = \left[\frac{8 \left[(8/Re_{tp})^{12} + (A_{tp}^{16} + B_{tp}^{16})^{-3/2} \right]^{1/12}}{8 \left[(8/Re_{lo})^{12} + (A_{lo}^{16} + B_{lo}^{16})^{-3/2} \right]^{1/12}} \right] \times \left[1 + x \left(\frac{v_g}{v_l} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

균질유동에 대한 이상류 점성계수는 비교적 손쉽게 적용가능한 McAdam[7]의 모델을 적용하였다.

$$\frac{1}{\mu_{tp}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad (13)$$

위에서 언급한 식 (1)~(13)들은 EES 프로그램을 이용하여 계산하고, 모세관 입구인 응축압력(P_1)에서 모세관 출구인 증발압력(P_3)까지 모세관의 미소요소 길이를 1 mm씩 증가시켜 가면서 각 미소구간 출구에서의 압력과 온도를 계산한다. 이렇게 구한 미소요소의 입출구 온도와 압력의 평균값으로부터 밀도, 점성계수, 비체적 등의 물성치를 구한다.

[표 1] R600a용 단일 모세관내 성능 분석 범위

Refrigerant	R600a(iso-butane)
T_c , [°C]	20 ~ 50
d_i , [mm]	0.6 ~ 1
T_e , [°C]	-30 ~ 10
M_{cap} , [g/s]	0.0005 ~ 0.0008
T_{sub} , [°C]	5 ~ 20
ϵ , [mm]	0.15×10^{-4}

표 1에는 본 연구에서 사용되는 냉동시스템의 성능 분석 범위를 나타낸 것으로 R600a용 냉동사이클의 일반적인 운전조건이다. 표 1의 분석조건으로부터 수식과 열물성치를 계산하고 이렇게 나온 결과값을 이용하여 R600a용 모세관의 성능에 영향을 미치는 모세관내 응축온도, 증발온도, 과냉각도, 관경 등의 변수들에 대해서 살펴보았다.

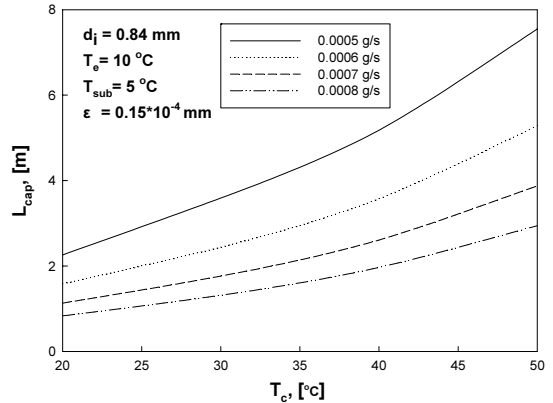
3. 계산결과 및 고찰

3.1 응축온도의 영향

내경(d_i) 0.84 mm, 응축기 출구 과냉각도(T_{sub}) 30°C, 증발온도(T_e) 10°C, 모세관내 표면거칠기(ϵ) 0.15×10^{-4} 인 조건에서 응축온도를 20°C에서 50°C 까지 그리고 냉매유량(M_{re})를 0.0005 g/s에서 0.0008 g/s까지 변화시켜가면서 모세관의 길이 변화를 살펴보았고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있는 것처럼, 냉매유량이 일정한 경우 응축온도(T_c)가 증가할수록 모세관 길이(L_{cap})는 증가한다. 이는 응축온도(압력)가 증가할수록 그림 1(b)에서 P_1 과 P_3 사이의 압력차(dP)가 증가하기 때문에 식 (5)와 (10)에서 알 수 있듯이 모세관 길이가 증가한다.

그림 2에서 응축온도가 일정한 경우, 냉매유량이 감소할수록 모세관 길이는 증가한다. 그 이유는 모세관 입구 압력이 일정하다는 것은 그림 1에서 P_1 과 P_3 사이의 압력차(dP)가 일정하다는 것을 의미하는 것으로, 결국 식(5)

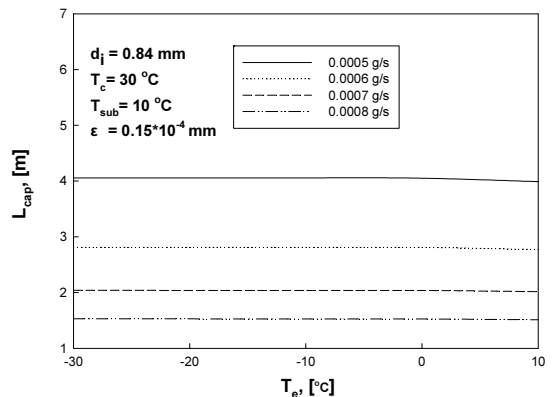
와 (10)로부터 냉매유량이 감소할수록 모세관 길이는 증가하게 된다. 위의 이러한 결과는 일반적인 프레온계 냉매를 적용한 모세관에서도 살펴볼 수 있는 것으로 Bansal & Rupasinghe[1]의 연구결과와 일치한다.



[그림 2] 응축온도 변화에 따른 R600a용 단일 모세관의 길이

3.2 증발온도의 영향

R600a용 단일모세관내 유동 특성에 대한 증발온도의 영향을 살펴보고자 관경(d_i), 응축온도(T_c), 모세관 입구 과냉각도(T_{sub}), 모세관 표면거칠기(ϵ) 등은 일정하게 유지한 상태에서 증발온도(T_e)를 10°C에서 -30°C까지 변화시켰고, 그 결과는 그림 3에 나타내었다.



[그림 3] 증발온도 변화에 따른 R600a용 단일 모세관의 길이

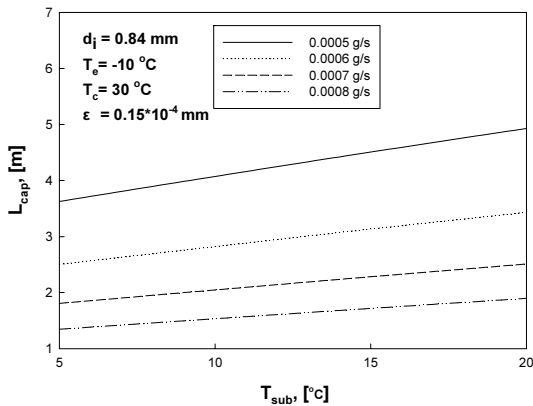
그림 3에서 단일모세관내 냉매유량이 일정하면 증발온도가 증가할수록 모세관 길이는 일정하다. 이는 단상류와 이상류 영역에서의 모세관 길이가 일정하다는 것을 의미한다. 즉, 그림 1(b)에서 알 수 있듯이, 단상영역의 모

세관길이는 증발온도가 증가하더라도 변화가 없다. 또한, 이상영역의 모세관 길이는 식(10)에서 알 수 있듯이, 증발온도가 증가할수록 압력차는 감소하게 되지만, 이에 반해 모세관 출구의 건도 감소로 인해 밀도차가 증가하게 된다. 따라서, 압력차 감소와 밀도차 증가의 상쇄현상으로 인해 이상류 영역의 모세관 길이도 일정하게 된다. 이러한 결과에 대해서 Melo 등[2]도 동일한 결과를 발표하였다.

또한, 그림 3에서 알 수 있듯이 증발온도가 일정한 경우 냉매유량은 감소할수록 모세관 길이는 증가한다. 이는 앞절에서도 언급한 것처럼 일정한 압력차에서 냉매유량이 증가할수록 모세관 길이는 증가하게 된다.

3.3 과냉각도의 영향

관경, 증발온도, 응축온도, 표면거칠기 등은 일정한 조건하에서 5℃에서 20℃까지 R600a용 단열모세관 입구의 냉매 과냉각도(응축기 출구와 모세관 입구 온도차)와 냉매유량을 변화시켜가면서 모세관의 길이 변화를 살펴보았다.



[그림 4] 과냉각도 변화에 따른 R600a용 단열 모세관의 길이

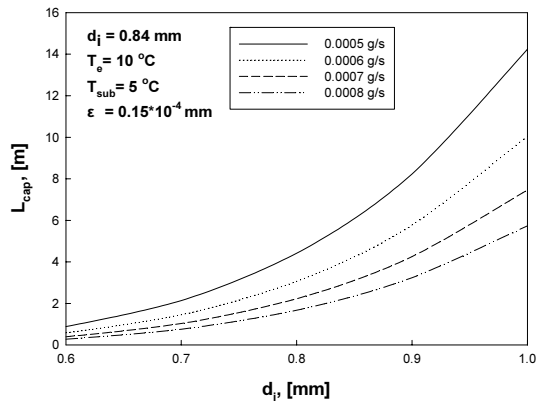
그림 4에서 냉매유량이 일정하다면, 과냉각도가 증가할수록 모세관 길이는 증가한다. 여기서 모세관 입구의 과냉각도가 증가하다는 것은 모세관 입구온도가 감소하는 것을 의미한다. 따라서 모세관 입구온도가 감소할수록 그림 1 (b)에서 알 수 있듯이 선도상의 점 1이 왼쪽(수평방향)으로 이동하게 되고 이로 인해 P₁과 P₂사이의 압력차(dp)가 증가하고 단상영역의 모세관 길이(L_{sp})는 증가하게 된다. 반면에 P₂과 P₃사이의 압력차(dp)는 감소하고 이상영역의 모세관 길이(L_{tp})는 감소하게 된다. 결국 이러한 결과로부터 단상영역의 모세관 길이 증가비율이 이상

영역의 모세관 길이 감소비율보다 더 크기 때문에 모세관 전체 길이는 증가하게 된다. 이러한 결과는 Bansal & Rupasinghe[1]의 연구결과와 일치하는데, 이들은 프레온계 냉매를 사용하여 단열모세관에 대한 과냉각도의 영향을 실험적으로 분석하였다. 여기서 프레온계 냉매의 과냉각도는 과냉각도가 감소한다는 것은 모세관내 냉매 입구온도가 감소하다는 것이므로 과냉각도가 감소할수록 모세관 길이는 증가한다고 보고하였다.

그림 4에서 과냉각도가 일정하면 냉매유량이 감소할수록 모세관 길이는 증가하는데, 이는 앞절에서도 살펴본 바와 같이 모세관 길이와 냉매유량은 반비례 관계에 있기 때문에 냉매유량이 감소할수록 모세관 길이가 증가하게 된다.

3.4 관경의 영향

R600a용 단열모세관의 관경 변화에 따른 유동특성에 대한 영향을 알아보기 위해 0.6 mm에서 1.0 mm까지 관경을 증가시켜가면서 모세관 길이의 변화를 살펴보았다.



[그림 5] 모세관의 관직경 변화에 따른 R600a용 단열 모세관의 길이

그 결과 그림 5에서 냉매유량이 일정한 경우, 관경이 증가할수록 모세관 길이는 증가한다. 이는 식(5)와 (10)에서 알 수 있듯이, 관경이 증가할수록 모세관 길이는 증가하게 된다. 또는 관경이 증가할수록 모세관내의 압력강하(dp)가 감소하고, 이로 인해 바라는 작동조건에 대해 비교적 큰 모세관 길이가 요구되기 때문이다. 그림 5에서 관경이 일정한 경우 냉매유량이 감소할수록 모세관 길이가 증가하게 되는데 이는 앞에서 여러 차례 살펴본 이유와 동일하다.

4. 결론

R600a용 단열 모세관내 유동특성에 영향을 미치는 응축온도(압력), 증발온도(압력), 과냉각도, 관경 등의 인자들에 대해서 표 1의 조건에서 살펴본 결과, 이러한 변수들은 R600a용 단열모세관내 유동특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 이들 각각의 변수들과 모세관 전체길이에 대한 상관 관계를 식 (14)과 같은 비례식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{cap} \propto P_c, T_c, d_i, \frac{1}{M_{re}} \quad (14)$$

위의 비례식에서 모세관 입구압력과 증발온도는 결국 모세관 전체의 압력강하와 관련이 있기 때문에 식 (14)는 아래의 식으로 다시 정리할 수 있다.

$$L_{cap} \propto \Delta P, T_c, d_i, \frac{1}{M_{re}} \quad (15)$$

참고문헌

- [1] P. K. Bansal and A. S. Rupasinghe, "An homogeneous model for adiabatic capillary tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 18, Nos. 3-4, 1998, pp. 207-219.
- [2] C. Melo, R.T.S. Ferreira, C. Boabaid Neto, J.M. Goncalves, M.M. Mezavila, "An experimental analysis of adiabatic capillary tubes", Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp. 669-684, 1999.
- [3] EES: Engineering Equation Solver, 2006. fChart Software Inc.
- [4] B. Yun, H. Y. Park, K. C. Yoo and Y. C. Kim, "Air-conditioner cycle simulation using tube-by-tube method", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 499-510, 1999.
- [5] E. Hihara and S. Tanaka, "Boiling heat transfer of carbon dioxide in horizontal tubes". Preliminary proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen conference on natural working fluids at Purdue, pp. 279-284, 2000.
- [6] S. W. Churchill, "Frictional equation spans all fluid flow regimes, Chem. Eng., Vol. 84, pp. 91-92, 1977.
- [7] W. H. McAdams, W. K. Wood and L. C. Heroman, "Vaporization inside horizontal tubes. II: Benzene-oil

mixtures, Trans. ASME, Vol. 64, p. 193, 1942.

구 학 근(Hak-Keun Ku)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산 수산대학교 냉동공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 부산 수산대학교 냉동공조공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 부경대학교 냉동공조공학과 (공학박사)
- 1992년 9월 ~ 현재 : 동명대학교 냉동공조공학과 부교수

<관심분야>

냉동공조장치의 시스템 향상 및 고성능 열교환기 개발