

R-22 및 R-134a의 세관 내 유동 특성에 관한 연구

홍진우[†], 정재천, 장승환*, 권옥배**, 오후규***

(주)한서엔지니어링, *(주)센추리, **한국가스공사, ***부경대 기계공학부

Study on the Flow Characteristics of R-22, R-134a in Small Diameter Tubes

Jin-Woo Hong[†], Jae-Cheon Jung, Seong-Hwan Jang*, Ok-Bae Kwon**, Hoo-Kyu Oh***

Hansoe Engineering Co. Ltd., Busan, 618-270, Korea

**Century Co. Ltd., Asan, Kyunggi-Do, 336-840, Korea*

***Korea Gas Cooperation, Ansan, Kyunggi-Do, 425-790, Korea*

****Department of Refrigeration and A/C Eng., Pukyong University, Busan 608-739, Korea*

(Received June 14, 2002; revision received August 14, 2002)

ABSTRACT: Experimental work was performed on the flow characteristics of R-22 and R-134a in small diameter tubes. The experimental apparatus was made up of liquid pump, pre-heater, sight-glass, condenser and measurement instruments. The sight-glass for flow pattern observations was located at the outlet of the pre-heater. The experiment was carried out to show the flow characteristics of R-22 and R-134a. Data were taken with test conditions in the following ranges; the mass flux was ranged from 100 to 1,000 kg/m²s, the saturation temperature was 30°C and the vapor quality was ranged from 0.1 to 0.9. The main results were summarized as follows; In the flow patterns during evaporation, the annular flow in a 2mm inner diameter tube occurred at a relatively lower quality and mass velocity, compared to the flow in a 8mm inner diameter tube. The evaporation flow in small diameter tubes has been shown major deviations with the Mandhane, Taitel-Dukler's and Wambsganss' flow pattern maps but it was similar to the Dobson's flow pattern map.

Key words: Flow pattern(유동 양식), Small diameter tube(세관), R-22, R-134a

기 호 설 명

c_p : 비열 [kJ/kg · K]

d : 관경 [m]

dz : 소구간 길이 [m]

ID : 관내경 [m]

I : 전류 [A]

G : 질량유속 [kg/m² · s]

M : 질량유량 [kg/s]

P : 압력 [kPa]

Q : 전열량 [kW]

T : 온도 [K]

x : 건도 [/]

U : 유속 [m/s]

V : 전압 [V]

그리스 문자

† Corresponding author

Tel.: +82-51-831-1442; fax: +82-51-831-0766

E-mail address: hong@hansoe.co.kr

σ : 표면장력 [N/m]

ρ : 밀도 [kg/m³]

μ : 점도 [Pa · s]
 ζ : 가열효율
 θ : 관 기울기

하첨자

in : Inlet
l : Liquid
m : Mean
out : Outlet
e : Evaporator
r : Refrigerant
f : Fluid
g : Gas
sat : Saturation
a : Air
w : Water

무차원수

λ : Baker 수정 계수, $\left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right) \right]^{0.5}$
 ψ : Baker 수정 계수, $\left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right) \right]^{2/3} \left(\frac{\sigma_w}{\sigma} \right)$

1. 서 론

지금까지는 열교환기의 열전달 성능을 향상시키기 위해서, 복잡한 형상의 전열 확대 핀과 관을 사용한 열교환기 개발이 주류를 이루었지만, 최근 들어 종래의 전열관보다 관경이 작은 세관(수력 직경 7mm 미만)을 이용한 세관 열교환기 개발이 활발히 추진되고 있다. 세관은 종래의 전열관보다 관경이 작기 때문에, 유효 전열면적의 극대화, 난류효과의 상승, 가공성의 향상, 그리고 유연성 등 여러 가지 열전달 성능상의 장점을 가지고 있다. 이로 인해, 세관 열교환기는 처음에는 우주항공 분야 및 원자력산업 등과 같은 제한적인 분야에서 사용되었으나, 최근에는 넓은 범위에서 사용되고 있다. 그러나, 최적의 세관 열교환기를 개발하기 위해서는 세관 내 이상유동, 열전달, 그리고 압력강하 특성 등에 대한 연구가

선행되어야 한다. 하지만, 지금까지의 이와 관련한 연구는 미흡하거나 체계적이지 못한 것으로 보인다. 이로 인해, 세관 열교환기의 설계가 대부분 경험에 의해서 이루어지고 있는 실정이다.⁽¹⁾ 세관 내 이상 유동과 관련한 주요한 연구로는 Wambsganss et al.⁽²⁾은 19.05×3.18 mm 장방형(종횡비 6, 0.17, 수력 직경 5.44 mm) 관을 수평으로 설치하고, 물과 공기를 이용하여 이상유동 실험을 하였다. 그들은 실험을 통해서, 종래 대구경관 내 이상유동에서 관측되는 플러그 혹은 기포류에서 슬러그류로의 천이현상이 세관 내 이상유동에서도 유사한 천이영역에서 발견된다고 보고하고 있다. 하지만, 세관 내 이상유동에서는 대구경관 내 이상유동에서 발견되는 슬러그류에서 환상류, 슬러그류에서 파상류, 그리고 파상류에서 환상류로의 천이현상과 같은 이상유동 특성은 명확하게 나타나지 않는다고 보고하였다. 그리고 그들은 관경 12.7~165.1 mm 원형 관에서 얻은 실험결과로부터 작성한 Mandhane et al.⁽³⁾의 유동양식 선도와 실험결과와 비교하였는데, 성층류에서 파상류로 천이하는 영역부근에서 Mandhane 유동 양식 선도와 많은 차이가 나타남을 밝혔다. 이는 장방형 관과 원형 관의 기하학적 차이와 세관의 유로가 작기 때문에 파상류로 천이하기보다는 슬러그류로 천이하는 것이 쉽게 발생하기 때문이라고 설명하였다. Wilmarth et al.⁽⁴⁾의 세관 내 이상유동 실험에서는, 파상류는 발견되지 않고, 긴 플러그류와 슬러그류가 다수 발생하는 등 세관 내 이상유동에서의 특이점을 보고하였다. 또한, 그들은 유체의 이상유동에 있어서, 유체의 물성치의 영향과 유동관의 영향을 일반화한 Taitel-Dukler⁽⁵⁾의 유동양식 선도와 실험결과를 비교한 결과 역시, 큰 차이가 있음을 확인하였으며, 그 원인을 세관 내 이상유동에서 일어날 수 있는 표면장력의 영향으로 설명하였다. 그리고 Fujita et al.⁽⁶⁾은 질소와 에탄올 수용액을 이용하여 5개의 10×0.2~2 mm 장방형 관에서 이상유동 실험을 하였다. 그들은 종래의 대구경관 내 이상유동과 세관 내 이상유동의 천이영역이 서로 다름을 밝히고 있으며, 그 차이는 유체의 유속이 감소할수록 커진다고 밝혔다. 그들은 이러한 세관 내 이상유동이 대구경관 내 이상유동과 다른 특성을 가지는 이유를 장방형 관의 기하학적 모양에 따라서 에탄올 수용액의 표면장력의 영향이 유동에

다르게 미치기 때문이라고 설명하였다. Lin et al.⁽⁷⁾은 종래 이상유동과 관련한 연구를 정리하고, 2.1 mm 관에서 물과 공기를 이용하여 수직 이상유동 실험을 하였다. 실험결과로부터, 세관 내 이상유동은 종래의 대구경관 내 이상유동에 비해 낮은 유속에서 환상류로 천이가 발생하며, 종래에 제시된 유동양식 선도로는 세관 내 이상유동을 설명할 수 없다고 밝혔다. 이밖에도 세관 내 유동에 대한 유용한 문헌으로는 Lowry-Kawaji,⁽⁸⁾ Barajas-Panton⁽⁹⁾와 Kataoka et al.⁽¹⁰⁾ 등이 있으나 대부분 대동소이하계 종래의 대구경관 내 이상유동과 세관 내 이상유동은 여러 가지 면에서 차이가 있음을 보고하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 이상과 같은 현실적 필요성과 문제해결을 위해, 내경 8 mm와 내경 2 mm 관에서, R-22와 R-134a를 작동유체로 하여, 세관 내 증발 이상유동 특성을 밝히고자 하며, 동시에 세관 열교환기 설계에 관한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치

Fig. 1은 유동가시화 실험장치도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험장치는 강제 순환식 사이클이며, 냉매가 순환되는 경로와 브라인이 순환되는 경로로 구성되어 있다. 냉매는 자기 펌프

(Tuthill 사) 및 질량유량계(Oval 사)를 통해서 일정한 유량으로 조절되어 증발기에 흡입된다. 증발기에 흡입된 냉매는 일정한 입구건도로 조절되어 사이트 글라스에 유입되며, 사이트 글라스를 통과한 냉매는 응축기에 유입된다. 그리고 사이트 글라스 전·후에는 관경의 100배 이상 되는 길이의 유도부를 설치하여 사이트 글라스 내 유·출입 유동의 안정화를 도모하였다. 응축기에 유입된 냉매는 내관과 외관 사이의 환상공간으로 흐르는 브라인에 의해 응축되고 수액기로 흘러간다. 이때, 냉매를 응축시키기 위한 브라인은 별도로 설치된 냉동기 유니트에서 일정한 온도와 유량으로 조절되어 시험부에 냉매 흐름방향과 반대 방향(대향류)으로 유입된다. Fig. 2와 같이, 본 연구에서 사용한 사이트 글라스(가시화 장치)는 각각 200 mm, 150 mm의 가시화 관측 길이를 가지고 있다. 본 실험은 냉매의 온도, 압력 및 유량 등이 일정하게 유지되는 정상상태 하에서 사진촬영을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 데이터 처리

본 실험에서 사용한 R-22와 대체냉매 R-134a

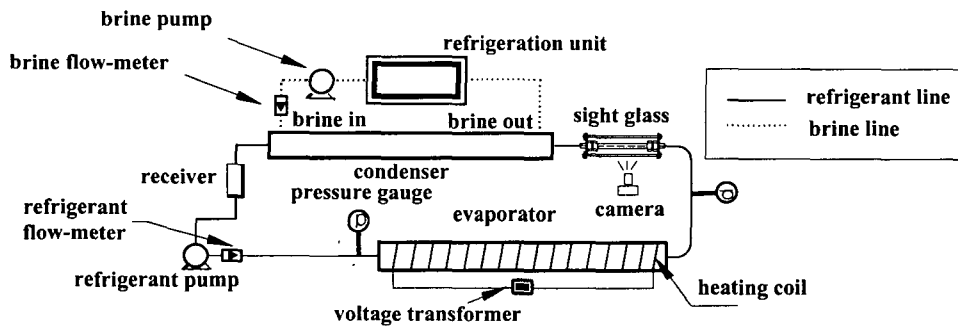


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for two-phase flow patterns.

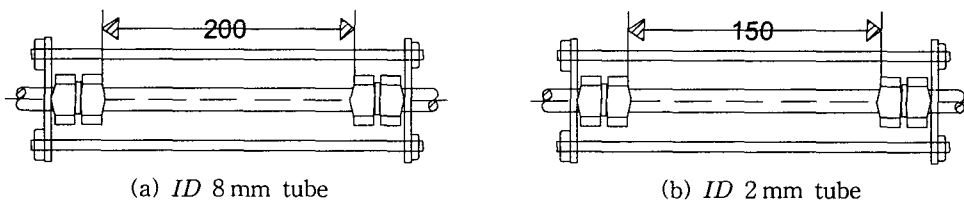


Fig. 2 Detail diagram of sight glass.

Table 1 Experimental condition for two-phase flow patterns

Refrigerant	R-22	R-134a
Test section	Horizontal pyrex glass tube	
ID of tube (mm)	2, 8	
Saturation temperature (°C)	30	
Mass flux (kg/m ² s)	100~1000	
Quality	0~1	

에 대한 열물성치는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 냉매물성 계산 프로그램인 REFPROP(version 5.0)⁽¹¹⁾을 이용하였다. 그리고 Table 1에는 실험조건을 나타내었으며, Fig. 3은 증발 이상유동 실험을 실시하기에 앞서, 증발기 내 가열열선이 내관 외벽면에 공급하는 전열량 Q_{coil} [kW]과 냉매가 내관 내 벽면으로부터 공급받는 전열량 Q_e [kW] 사이의 열평형 결과를 나타내었다. 그리고 각각의 전열량은 식(1)과 식(2)로 구할 수 있다.

$$Q_{coil} = \zeta \cdot V \cdot I \quad (1)$$

$$Q_e = M_{e,r} \cdot c_{p,e,r} \int_{T_{e,r,in}}^{T_{e,r,out}} dT \quad (2)$$

여기서, ζ 는 가열효율, V 는 입력전압[V]이고, I 는 입력전류[A]이다. 그리고 $M_{e,r}$ 은 냉매의 질량 유량[kg/s]이며 $T_{e,r,in}$ 과 $T_{e,r,out}$ 는 냉매의 입구

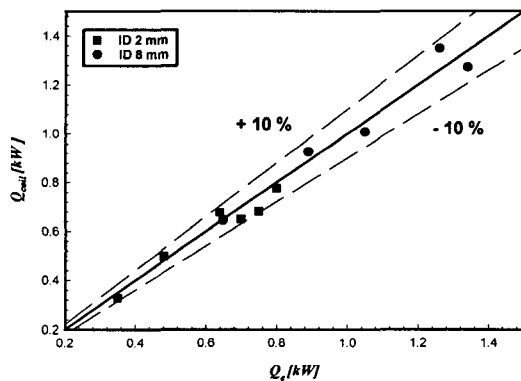


Fig. 3 Comparison of heat gain of refrigerants from heating coil and heat loss of heating coil by refrigerants.

와 출구온도[K]를 나타내며, $c_{p,e,r}$ 는 냉매의 비열[kJ/kg · K]을 나타낸다. Fig. 3에서 나타나는 것과 같이, 본 유동 가시화 실험에서 사용된 증발기의 열평형은 $\pm 10\%$ 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 실험장치의 열수지는 만족할 만하다고 인정되어 본 실험을 실시하였다.

3.2 이상유동 양식의 정의

이상유동 현상을 이해하기 위해서는 우선, 이상류의 유동 양식(Flow pattern)을 명확히 분류하고 이의 특성을 알아둘 필요가 있다. 본고에서는 유동 양식의 종류를 분류하기 위해서, 김무환 등⁽¹²⁾의 “이상유동 열전달”에서 제시한 유동 양식 분류방법에 따라서 이상유동의 종류를 구분하였다. 수평 유동에서는 중력이 반경방향으로 작용하므로 유동이 중심축에 대하여 비대칭 형태를 가지며 상대적으로 밀도가 큰 액체는 아래 쪽으로 쳐져서 흐르는 경향을 보인다. 수평 이상유동의 기본양식으로는 기포류(Bubbly flow), 플러그류(Plug flow), 성층류(Stratified flow), 파형류(Wavy flow), 슬러그류(Slug flow) 및 환상류(Annular flow) 등이 있으나, 두 개의 유동 양식이 섞여서 나타나는 경우에는 환상-분무류(Annular-Mist flow), 파형-환상류(Wavy-Annular flow) 등 두 개의 유동 양식을 연결하여 부른다. Fig. 4에는 이러한 수평 이상유동 양식의 개략도가 나타나 있다.

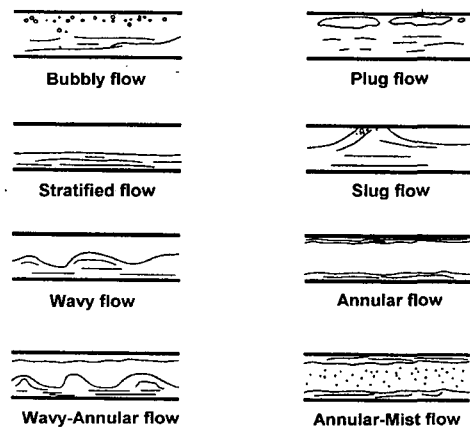


Fig. 4 Two-phase flow patterns in a horizontal tube.

3.3 세관 내 증발 이상유동 양식

Fig. 5는 R-22의 내경 2mm 관에서 질량유속 변화에 따른 이상유동 양식을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 질량유속이 증가할수록 파형-환상류 및 환상류로의 천이가 낮은 건도에서 나타난다. 이는 동일 건도조건에서도 이상류의 질량유속이 증가하면, 기상의 유체속도와 액상의 유체속도의 차이가 증가하기 때문에 환상류로 천이가 용이하기 때문인 것으로 예측된다. 그리고 Fig. 6은 질량유속 $200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 에서 R-134a의 내경 2mm와 8mm 관내 이상유동을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 내경 2mm 관에서는 건도 0.1에서는 파상류로 흐르고 있으며, 건도 0.2~0.3

에서는 파상-환상류가 발생하고 있다. 그리고 건도 0.5 이상에서는 확실한 환상류가 나타나고 있다. 하지만, 내경 8mm 관에서는 건도 0.1에서는 성층류, 건도 0.3에서는 파상류가 발생하고 있으며, 건도 0.5에서도 파상류가 여전히 유지되고 있다. 따라서, 내경 2mm 관내 이상유동에서 내경 8mm 관내 이상유동보다 낮은 건도영역에서 파상류, 파상-환상류 및 환상류가 발생하고 있는 것으로 보인다. 또한, 내경 2mm 관내 이상유동의 액막이 내경 8mm 관내 이상유동의 액막보다 얇은 것을 확인할 수 있었다. 이는 관경 축소로 인한 전열관의 기하학적인 원인과 이상류 내 기·액 경계면에서의 전단응력의 증가 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7은 질량유속 $400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 일 때, 내경 2mm 관에서 R-22와 R-134a의 유동양식을 나타내고 있다. 그림에서, R-22와 R-134a의 유동양식은 건도 0.1에서 약간의 차이가 발견되고 있지만, 전체 건도영역에서 거의 유사한 유동양식을 나타내었다. 따라서, 단일성분 유체의 세관 내 이상유동에서는 유체의 열물성의 변화보다는 유

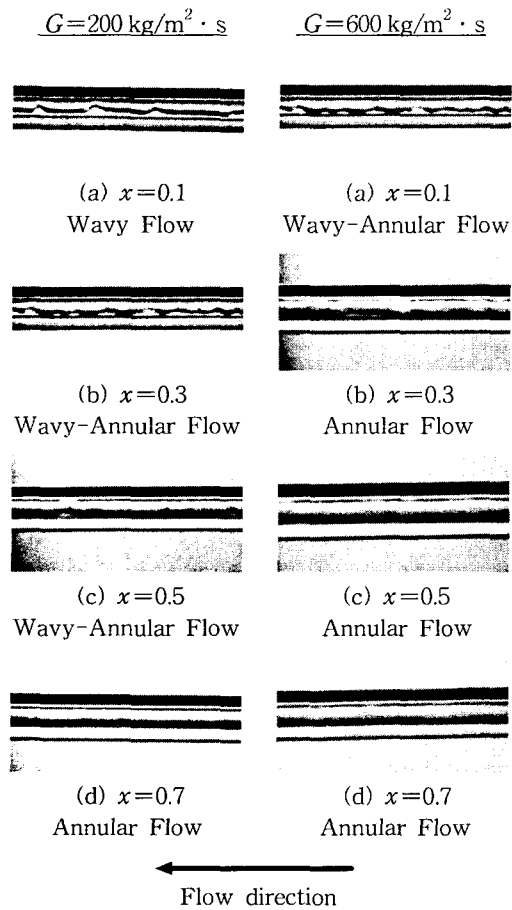


Fig. 5 Photo of experimental flow patterns with mass flux for R-22 in ID 2 mm tube.

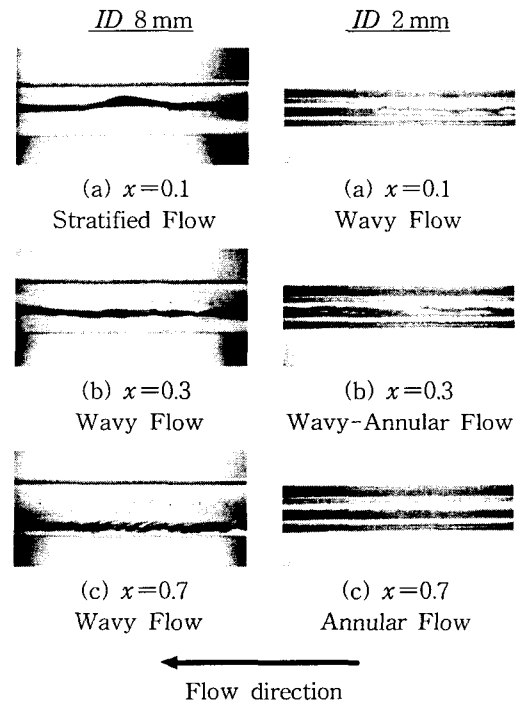


Fig. 6 Photograph of experimental flow patterns for R-134a in ID 2 mm and ID 8 mm tubes.

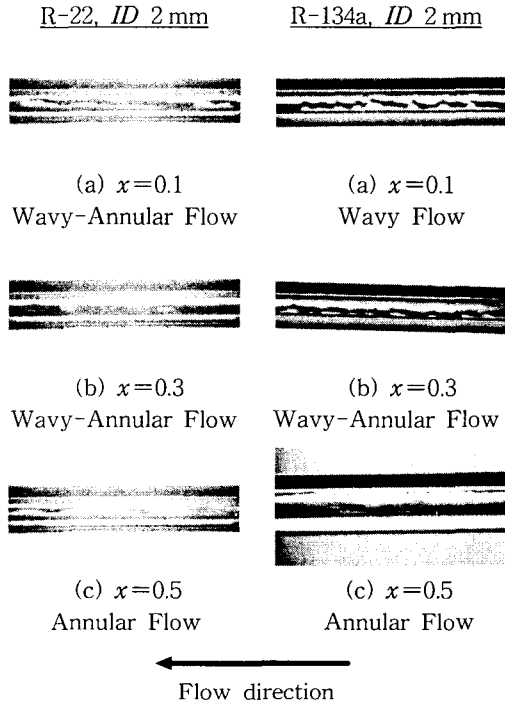


Fig. 7 Photo of experimental flow patterns for R-22 and R-134a at $G=400 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

로 관경과 질량유속의 변화에 주요한 영향을 받는 것으로 보인다.

3.4 종래 이상유동 양식 선도와 비교

유동 양식 선도(Flow pattern map)는 2차원의 선도에 동일한 변수를 사용하거나 혹은 무차원화된 변수를 사용하여 모든 유동 양식을 나타내기 때문에 이상유동 양식을 예측하는 데 있어서 보편적으로 사용된다. 그러나 이상유동 양식의 변화는 많은 영향인자들에 의해서 지배되는 것으로 알려져 있기 때문에, 2차원 선도 상에 각각의 유동 양식의 경계를 표시하는 유동 양식 선도는 근본적인 그 적용의 한계를 가지고 있다. 하지만, 유동 양식 선도가 가지고 있는 여러 가지 장점 때문에, 본 실험에서 얻은 결과를 종래 유동 양식 선도와 비교·분석하는 것은 세관 내 이상 유동 특성을 파악하는 데 매우 유의하다. 종래 대규관에서는 대표적으로 Baker,⁽¹³⁾ Scott,⁽¹⁴⁾ Mandhane,⁽³⁾ 그리고 Taitel-Dukler⁽⁵⁾ 등이 제안한 단열유동 양식 선도가 있으며, Bennett⁽¹⁵⁾와 Bergles⁽¹⁶⁾이 제안한

증발·응축 유동 양식 선도가 있다. 그리고 최근에는 Wambsganss⁽¹⁷⁾과 Dobson⁽¹⁸⁾이 세관 내 단열유동 양식 선도와 증발 이상유동 양식 선도를 각각 제안하였다. 따라서, 본고에서는 대표적으로 Mandhane, Taitel-Dukler, Wambsganss, Dobson 등의 유동 양식 선도와 본 실험결과를 비교하였다.

3.4.1 Mandhane의 유동 양식 선도

Mandhane은 수평관 내 1,178개의 공기-물 혼합유동의 실험자료를 포함한 5,935개의 실험자료를 총합하여, 유동 양식에 가장 큰 영향을 미치는 것은 Baker⁽¹³⁾의 연구결과와 달리 물성치의 영향보다는 유체의 겉보기 속도에 큰 영향을 받는다고 밝히고 있으며 액체 겉보기 속도 j_l 와 기체 겉보기 속도 j_g 에 의한 유동 양식 선도를 제안하였다. 그리고 액체 겉보기 속도 j_l 와 기체 겉보기 속도 j_g 는 식(5)과 (6)으로 구한다. Mandhane 선도에서는 액체 겉보기 속도 j_l 와 기체 겉보기 속도 j_g 를 좌표로 하여 유동 양식의 경계를 표시하며, 선도 적용범위를 Table 2에 나타내었다.

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_g}{\rho_a} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right) \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$\psi = \left[\left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right) \left(\frac{\rho_w}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3} \left(\frac{\sigma_w}{\sigma} \right) \quad (4)$$

$$j_l = \frac{G \cdot x}{\rho_l} \quad (5)$$

$$j_g = \frac{G \cdot (1-x)}{\rho_g} \quad (6)$$

Table 2 The applicable range of Mandhane's flow pattern map

Properties	Applicable range
ID of tube (mm)	12.7~165.1
Density of liquid (kg/m^3)	705~1009
Density of gas (kg/m^3)	0.80~50.5
Viscosity of liquid (cP)	0.3~90
Viscosity of gas (cP)	0.01~0.022
Surface tension (N/m)	$(24 \sim 103) \times 10^{-3}$
Superficial velocity of liquid (m/s)	$9 \times 10^{-4} \sim 7.3$
Superficial velocity of gas (m/s)	0.04~171

3.4.2 Taitel-Dukler의 유동 양식 선도

Taitel과 Dukler는 Mandhane의 연구결과를 포함하여, 식(7)~(10)로 계산되는 무차원수들을 이용하여 좀더 일반화된 유동 양식 선도를 제안하였다.

$$X = \left[\frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g} \right]^{0.5} \tag{7}$$

$$F = j_g \cdot \left[\frac{\rho_g}{(\rho_l - \rho_g) \cdot d_{ID} \cdot g} \right]^{0.5} \tag{8}$$

$$K = \left[\frac{\rho_g \cdot j_g^2 \cdot j_l}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g \cdot \cos \theta \cdot \nu_l} \right]^{0.5} \tag{9}$$

$$T = \left[\frac{(dp/dz)_l}{(\rho_l - \rho_g) \cdot g} \right]^{0.5} \tag{10}$$

여기서, d 는 관경[mm], θ 는 관의 기울기인데, 수평선을 기준으로 하향 유동일 때 양의 값을 가진다. 그리고 $(dp/dz)_l$ 은 이상유동 중의 액체만이 관 내부를 흐른다고 가정했을 때의 단위길이당 마찰압력손실[Pa/m]을 나타내고, $(dp/dz)_g$ 는 이상유동 중의 기체만이 관 내부를 흐른다고 가정했을 때의 단위길이당 마찰압력손실[Pa/m]을 나타낸다. 그리고 j_l 는 식(5)로 계산되는 액체의 겉보기 속도, j_g 는 식(6)으로 계산되는 기체의 겉보기 속도를 나타내고 있다.

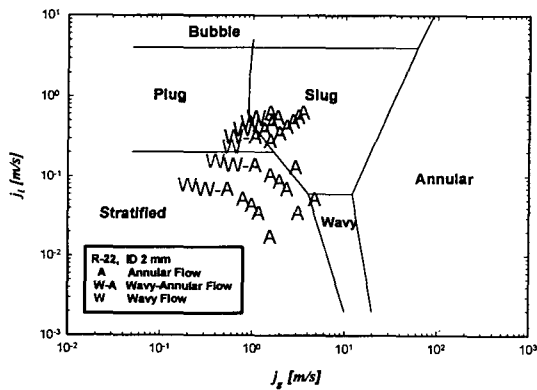


Fig. 8 Comparison of experimental flow patterns with Mandhane's flow pattern map in ID 2 mm tube.

3.4.3 실험결과와 유동 양식 선도의 비교

Fig. 8은 R-22의 내경 2mm 관내 유동 양식을 Mandhane의 유동 양식 선도에 나타낸 것이다. 선도 내 실선은 각각의 유동 양식의 영역경계를 지시하고 있으며, 횡축은 기체의 겉보기 속도 j_g , 종축은 액체의 겉보기 속도 j_l 로 선도의 좌표축을 구성하고 있다. 그리고 선도 내에 나타나 있는 알파벳 문자는 본 실험에서 얻은 각각의 유동 양식을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 내경 2mm 관내 유동 양식은 Mandhane의 유동 양식 선도과 달리, 낮은 기체 겉보기 속도에서 파상류와 환상류로 천이하고 있으며, 본 실험조건에서는 플러그류, 슬러그류 및 성층류는 발견되지 않았다. 따라서, 내경 2mm 관내 증발 이상유동에서는 넓은 영역에서 파상류와 환상류가 나타나고 있는 것으로 보이며 종래 Mandhane의 유동 양식 선도를 적용하기는 힘들 것으로 보인다. 이처럼 종래 Mandhane의 유동 양식 선도를 세관 내 증발 이상유동에 적용하기 어려운 이유는 Mandhane의 유동 양식 선도가 증발시 발생하는 유체의 가속화 현상 및 상 변화 등에 의한 유동의 변화를 나타내지 못하며, 세관의 기하학적 형상에 의한 유동 양식의 변화를 제대로 고려하고 있지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 R-134a의 내경 2mm 관내 유동 양식을 Taitel-Dukler의 유동 양식 선도에 나타낸 것이다. 선도 내 실선은 각각의 유동 양식의 영역

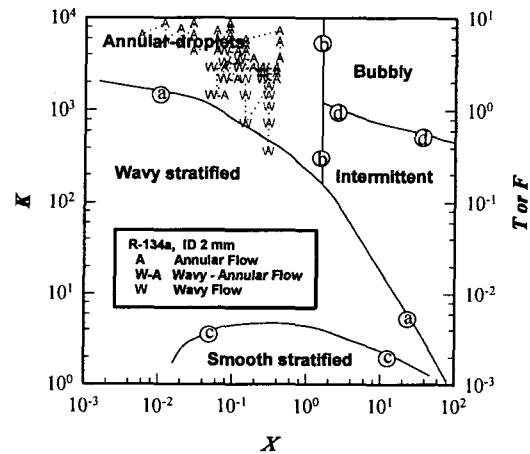


Fig. 9 Comparison of experimental flow patterns with Taitel-Dukler's flow pattern map in ID 2 mm tube.

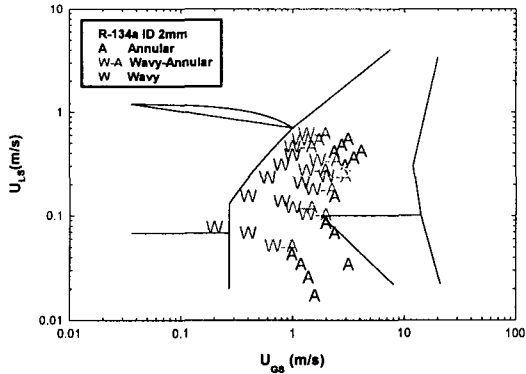


Fig. 10 Comparison of experimental flow patterns with Wambsganss' flow pattern map for R-134a.

경계를 지시하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Taitel-Dukler 선도는 파상·환상류와 환상류 영역에서는 실험결과를 잘 예측하고 있지만, 파상류 영역의 실험결과와는 많은 차이를 나타내었다. 이는 3.3절에서 언급한 바와 같이, 세관 내 이상유동에서는 종래 대구경관 내 유동보다 낮은 건도에서부터 파상류가 발생하여 높은 F 값을 가지기 때문이다. 따라서, Taitel-Dukler 선도가 비록 유체의 물성치와 관경의 변화를 고려하고 있지만, 증발현상과 같은 상변화와 세관의 기하학적 형상에 의한 유동 양식의 변화 등을 충분히 고려하지 못하는 것으로 보이며, Taitel-Dukler 선도를 세관 내 증발 이상유동에 적용시에는 신중한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 10은 R-134a를 작동유체로 하고, 내경 2 mm 관에서 Wambsganss⁽¹⁷⁾의 유동 양식 선도와 비교하여 나타낸 것이다. Wambsganss의 이상 유동 양식 선도는 19.05 mm×3.18 mm인 장방형 관에서, 물과 공기를 작동유체로 이용한 유동실험에서 얻은 실험결과와 Mandhane의 유동 양식 선도를 기본으로 하여 작성된 세관 내 이상유동 양식 선도이다. 선도 내 실선은 각각의 유동 양식의 영역경계를 지시하고 있고, 알파벳 문자는 본 실험에서 관찰한 증발유동 양식을 나타내고 있으며, U_{GS} 는 관내 기체의 유속, U_{LS} 은 관내 액체의 유속을 각각 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Wambsganss의 유동 양식 선도와 달리, 내경 2 mm 관내 증발유동 양식에서는 낮은 기체 유속에서부터 환상류와 파상류가 발생하였으며, 선도에 비해 넓은 범위에서 환상류가 분포하고 있음을 알 수 있었다. 이는 세관과 장방형 관의 기하학적 형상이 근본적으로 다르고, 증발시 발생하는 유체의 가속화 현상 및 상변화에 따른 유동 양식의 변화를 충분히 고려하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, Wambsganss의 유동 양식 선도를 세관 내 증발유동에 적용하기는 곤란할 것으로 보인다.

Fig. 11은 R-134a의 내경 8 mm 관내 이상유동 양식을 Dobson⁽¹⁸⁾의 유동 양식 선도에 나타낸 것이다. Dobson의 유동 양식 선도는 R-134a를 작동유체로 하여, 내경 4.57 mm인 수평 평활관 내 증발 이상유동 실험에서 얻은 결과를 가지고 제안한 유동 양식 선도이다. 그림에서, 횡축은 건도를

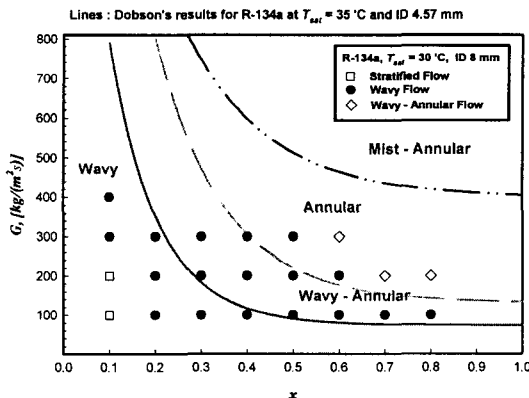


Fig. 11 Comparison of experimental flow patterns with Dobson's flow pattern map in ID 8 mm tube.

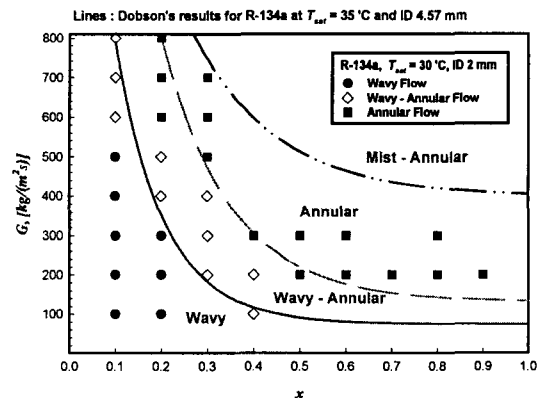


Fig. 12 Comparison of experimental flow patterns with Dobson's flow pattern map in ID 2 mm tube.

나타내고 중축은 유체의 질량유속을 나타내며, 3가지 선은 각각의 유동 양식을 구분하는 영역 경계를 지시한다. 그림에서 알 수 있듯이, Dobson의 유동 양식 선도가 내경 8mm 관내 증발 이상 유동 양식과 많은 차이가 나타났다. 특히, 저건도 영역($x=0.4$ 이하)과 고질량유속($G=200$ 이상)에서 실험결과와 많은 차이가 발생하였다. Fig. 12는 R-134a의 내경 2mm 관내 이상 유동 양식을 Dobson의 유동 양식 선도에 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, Dobson의 유동 양식 선도가 건도 0.1이고, 고질량유속($G=600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 이상) 영역에서 실험결과와 잘 일치하지 않고, 파형-환상류 영역에서 환상류가 발견되고 있지만, 전반적으로 실험범위에서 내경 2mm 관내 증발 이상유동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다. 이는 Dobson의 유동 양식 선도가 내경 4.57mm 세관 내 증발 이상유동 실험으로부터 제안되었기 때문에, 3.3절에서 언급한 여러 가지 세관 내 이상유동 특성을 충분히 고려하고 있기 때문이라고 여겨진다. 따라서, 세관 내 이상유동 양식을 예측하는데 있어서, Mandhane, Taitel-Dukler와 Wambsganss 유동 양식 선도를 적용하기는 곤란할 것으로 보이며, Dobson의 유동 양식 선도를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결 론

내경 8mm와 내경 2mm 관내 R-22와 R-134a의 증발 이상유동 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 내경 2mm 관의 경우가 내경 8mm 관보다 낮은 건도영역($x=0.1 \sim 0.2$) 및 낮은 질량유속 영역($G=100 \sim 200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)에서부터 파상류, 파상-환상류, 그리고 환상류가 발생하였다.

(2) 내경 2mm 관내 증발유동 양식은 종래의 대구경관에서 제안된 Mandhane, 그리고 Taitel-Dukler의 이상유동 양식 선도와 큰 차이를 나타내었으며, 장방형 세관에서 제안된 Wambsganss의 이상유동 양식 선도의 경우도 세관 내 증발 이상유동에 적용하기 위해서는 좀더 많은 검토가 요망된다. 반면에, Dobson의 유동 양식 선도는 세관 내 증발유동을 비교적 잘 예측할 수 있었다. 그러나, 세관을 적용하는 열교환기의 합리적인 설계를 위해서는 세관 내 이상유동 양식을 예

측할 수 있는 신뢰성 높은 새로운 유동 양식 선도의 개발과 더불어 이 분야의 보다 많은 기초 연구가 요망된다.

참고문헌

1. Oh, H. K. and Hong, J. W., 1999, Condensing heat transfer characteristics of alternative refrigerants in small diameter tubes, *J. of SAREK*, Vol. 28, No. 5, pp. 396-402.
2. Wambsganss, M. W., Jendrzeczyk, J. A. and France, D. M., 1991, Two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel, *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 17, No. 3, pp. 327-342.
3. Mandhane, J. M., 1974, A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 1, pp. 537-554.
4. Wilmarth, T. and Ishii, M., 1994, Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1749-1758.
5. Taitel, Y. and Dukler, A. E., 1976, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *A.I.Ch.E. J.* 22, pp. 47-55.
6. Fujita, H., Ohara, T., Hirota, M. and Furuta, H., 1995, Gas-liquid flows in flat channels with small channel clearance, *Proceedings of The 2nd International Conference on Multiphase Flow '95-Kyoto*, IA3-37-44.
7. Lin, S., Kew, P. A. and Cornwell, K., 1998, Two-phase flow regimes and heat transfer in small tubes and channels, *Proceedings of 11th IHTC.*, Vol. 2, pp. 45-50.
8. Lowry, B. and Kawaji, M., 1988, Adiabatic vertical two-phase flow in narrow flow channels, *AIChE Symposium series*, Vol. 84, No. 263, pp. 133-139.
9. Barajas, A. M. and Panton, R. L., 1993, The effects of contact angle on two-phase flow in capillary tubes, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, No. 2, pp. 337-346.
10. Kataoka, I., Tanaka, N. and Yumikura, T.,

- 1995, Study on flow characteristics in two-phase natural circulation in narrow channel, Proceedings of The 2nd International Conference on Multiphase Flow '95-Kyoto, IA3-31-36.
11. Gallagher, J., McLinden, M., Morrison, G. and Huber, M., 1996, NIST Thermodynamic Properties and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP), Version 5.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A.
 12. Kim, M. H., Kim, B. J. and Lee, S. Y., 1993, Two-phase flow heat transfer, Daeyoung, pp. 8-19.
 13. Baker, O., 1954, Design of pipe lines for simultaneous flow of oil and gas, Oil and Gas J. 53, pp. 185-195.
 14. Scott, D. S., 1963, Properties of current gas-liquid flow, Advances in Chemical Eng., 4, Academic Press, New York, p. 200.
 15. Bennett, A. W., Hewitt, G. F., Kearsley, H. A., Keays, R. K. F. and Lacey, P. M. C., 1966, Flow visualization studies of boiling at high pressure, Proc. Inst. Mech. Eng., 184, Pt 3C-Boiling Heat Transfer, pp. 260-270.
 16. Bergles, A. E., Lopina, R. F. and Fiori, M. P., 1967, Critical-heat-flux and flow pattern observation for low-pressure water flowing in tubes, Trans. ASME, Ser. C, 89-1, pp. 69-74.
 17. Wambsganss, M. W. and Jendrzeczyk, J. A., 1994, Determination and characteristics of the transition to two-phase slug flow in small horizontal channels, Trans. of the ASME, Vol. 116, MARCH, pp. 140-146.
 18. Dobson, M. K., Chato, J. C., Hinde, D. K. and Wang, S. P., 1994, Experimental evaluation of internal condensation of refrigerations R-12 and R-134a, ASHRAE Tran. No-94 5-3, pp. 744-754.