

수평미세관의 직경이 R-22 및 R-407C 비등열전달에 미치는 영향

윤국영* · 최광일* · 오종택†
(2002년 3월 26일 접수, 2002년 12월 26일 심사완료)

Effect on Boiling Heat Transfer of Horizontal Micro-channel Diameters for R-22 and R-407C

Kuk-Young Yoon, Kwang-Il Choi and Jong-Taek Oh

Key Words: Boiling Heat Transfer(비등열전달), Micro-Channel(미세관), Mass Flux(질량유속), Heat Flux(열유속), Inner Tube Diameter(관내경)

Abstract

Boiling heat transfer coefficients and pressure drops for R-22 and R-407C were measured in horizontal micro-channels. The test section is stainless steel tube, inner tube diameters are 1.8mm and 2.8mm, and the respective lengths are 1500mm and 3000mm. The range of mass flux is 300~600kg/m²s and heat flux is 5~15kW/m². In this results, pressure drop increased linearly for both R-22 and R-407C with increased mass flux, but the increase of heat flux did not affect the pressure. In addition, the pressure drop was fairly increased in the high quality region rather than low quality region. In the range of low quality, the mass flux had a small affect on the heat transfer coefficients, however, in high quality region, the heat transfer coefficients increased even more with increasing mass flux. Under the low quality region and low mass flux, the heat transfer coefficients increased with increasing heat flux densities. The effects of inner tube diameter were clearly observed. Namely, the measured pressure drop inside inner tube diameter 1.8 mm is higher than 2.8 mm with increasing the mass flux and heat flux. Also, the measured local heat transfer coefficient inside inner tube diameter 1.8 mm is higher than 2.8 mm in the range of high qualities. The experimental data for R-407C compared with proposed correlation using pure refrigerant. The experimental data for R-407C was more decreased than the proposed correlation for pure refrigerant up to 50% or more.

기호설명		Q	: 열량	[kW]
		L	: 관길이	[m]
		q	: 열유속	[kW/m ²]
		T	: 온도	[K]
		x	: 건도	
			하첨자	
		w_i	: 관내벽	
		w_o	: 관외벽	
		sat	: 포화	
		i	: 내경	
		o	: 외경	
D	: 관경			[m]
G	: 질량유속			[kg/m ² ·s]
h	: 열전달계수			[kW/m ² ·K]
i	: 엔탈피			[kJ/kg]
k	: 관의 열전도계수			[W/m·K]

* 회원, 여수대학교 대학원 냉동공학과

† 책임저자, 회원, 여수대학교 냉동공학과

E-mail : ohjt@yosu.ac.kr

TEL : (061)659-3273 FAX : (061)659-3003

1. 서론

비등열전달에 관한 대부분의 연구는 내경 10 mm 이상의 원형관으로써, 열전달계수는 작동유체의 물성치 및 열역학적 특성, 시험관의 구조, 관내 유동특성 등에 따라 달라진다. R-22 대체냉매의 일종인 R-407C의 관내 비등 및 응축열전달계수는 실험조건 및 장치에 따라서는 R-22보다 최고 30%까지 저하한다는 보고가 있다.⁽¹⁾ R-22를 작동유체로 사용하는 기존의 장치 및 새로운 냉동공조시스템의 열교환기 설계에 R-407C를 적용시키기 위해서는 열전달 저하에 대한 문제점을 해결해야만 한다. 최근 5 mm 미만의 미세관을 이용하여 상대적으로 질량유속을 증가시킴으로써 열전달을 촉진시키는 방법이 국내외적으로 연구되고 있다.⁽²⁻¹²⁾ 즉 수평관내 비등열전달계수는 강제대류증발이 핵비등보다 비교적 높기 때문에 관내 유동양식을 고건도 및 고질량유속의 환상류 영역으로 되게 하면 열전달계수가 상당히 증가될 것이다. 이와 같은 연구는 고효율 밀집형 열교환기 및 전자장치 냉각과 더불어 최근에 많이 이루어지고 있다.⁽¹³⁻¹⁷⁾ 그러나 기존의 연구는 대부분 관내경 7 mm 이상의 시험관내 유동양식, 압력강하 및 열전달계수에 관한 것으로서 3 mm 이하의 미세관내 열전달 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구는 관내경 1.8 mm와 2.8 mm에서 R-22 및 HFC 3성분 혼합냉매인 R-407C의 비등열전달 실험을 통하여 압력강하 및 열전달계수에 미치는 관경의 영향과 실험데이터를 기존의 순수 물질상관식과 비교한 결과를 발표하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 계략도는 Fig. 1 과 같다. 실험장치는 응축기, 과냉각기, 냉매펌프, 예열 및 예냉기, 그리고 시험부인 증발기로 구성하였다. 냉매 순환을 간단히 설명하면 펌프에서 나온 냉매는 질량유량계에서 유량이 측정된 후 예열예냉기로 흐르면서 건도가 조절되고 시험구간인 증발기로 순환된다. 증발기에서 증발한 냉매증기는 응축기에서 응축된 후 과냉각기에서 과

냉각도가 조절되어 수액기로 유입되며 냉매펌프에 의해 실험장치로 재순환 된다. 증발기인 시험부는 Fig.2와 같이 stainless steel tube로써 내경1.8 mm 및 2.8 mm, 시험부 길이가 각각 1500 mm와 3000 mm인 수평평활관으로 구성하였다.

관벽의 국소 및 평균온도를 측정하기 위하여 C-C열전대를 관의 동일 단면상의 관 상부에서 원주방향 등간격으로 4군데, 또한 길이방향 150 mm 및 300 mm 간격으로 48개 부착하였다. 또한 시험부 입·출구와 예열예냉기 입·출구의 냉매온도를 측정하기 위하여 열전대를 관내에 삽입하였으며, 증발기의 입출구 및 시험부 500 mm 간격마다 정밀브루돈관식 압력계를 설치하여 압력을

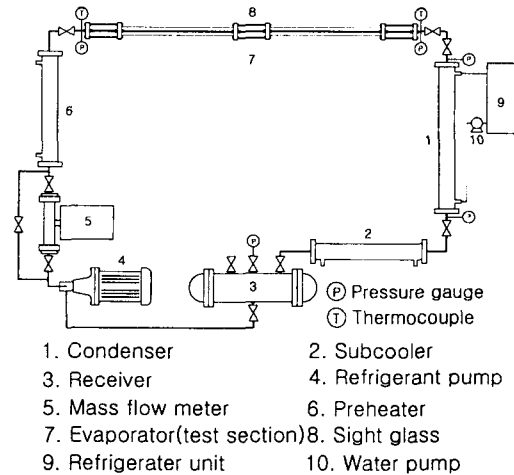


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

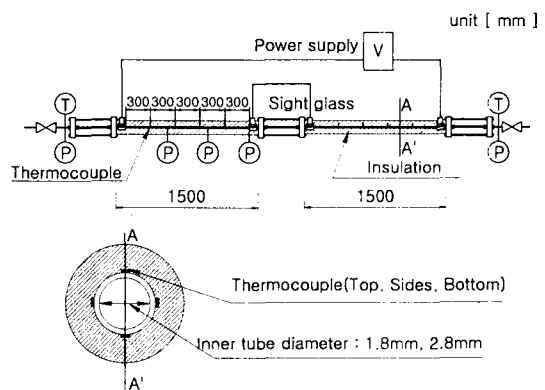


Fig. 2 Details of the test section

Table 1 Range of experimental conditions

Refrigerants	R-22, R-407C
Test section	Horizontal stainless steel smooth tube
Inner tube diameter[mm]	1.8, 2.8
Tube length[mm]	1500, 3000
Mass flux[kg/m ² s]	300-600
Heat flux[kW/m ²]	5-15
Quality	0-1.0

측정하였다. 증발기내의 냉매 유동양식을 관찰하기 위하여 시험부 입구, 중간 및 출구에 각각 길이 100 mm인 sight glass를 설치하였다. 또한 시험부의 가열은 용량 40kW인 transformer를 사용하여 직접가열 방식으로 하였으며, 시험부 1500 mm의 중간지점에서도 열유속을 줄 수 있도록 하였다.

본 실험의 데이터는 시스템 전체가 2시간 이상 정상상태가 된 것을 확인한 후 데이터를 측정하였으며, 그 실험조건은 Table1과 같다.

3. 실험데이터 처리

본 실험에서의 국소 비등열전달계수는 식 (1)과 같이 구하였다.

$$h = \frac{q}{T_{wi} - T_{sat}} \quad (1)$$

여기서, q 는 열유속, T_{wi} 및 T_{sat} 는 각각 내벽면 온도와 냉매의 포화온도이다. 열유속 q 는 다음의 식 (2)로 계산하였다.

$$q = \frac{Q}{\pi \cdot d_i \cdot L} \quad (2)$$

시험부 내벽면온도는 정상상태에 대한 1차원 열전도방정식을 이용하여 식 (3)으로 계산하였다.

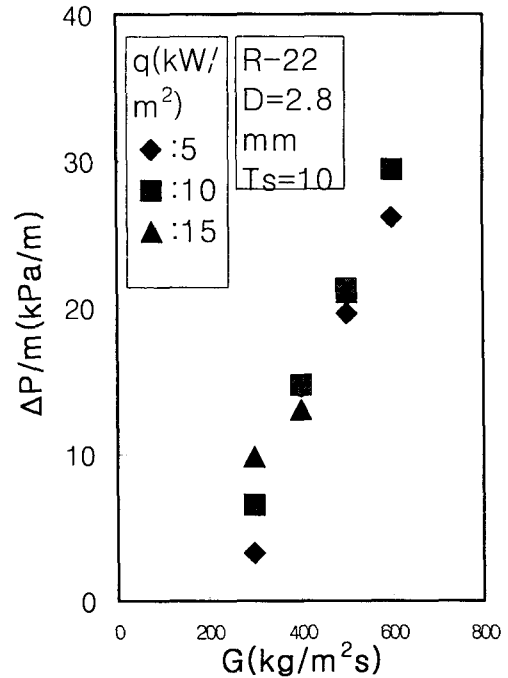


Fig. 3 Pressure drop at different heat flux and mass flux for R-22, $D_i=2.8$ mm

$$T_{wi} = T_{wo} - \frac{Q}{2\pi kL} \ln \frac{d_o}{d_i} \quad (3)$$

T_{wo} 는 관외벽온도, d_o 및 k 는 시험부인 관의 외경과 열전도도이다.

건도는 시험부내 냉매의 에너지평형으로부터 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$x = \frac{i - i_l}{i_{fg}} \quad (4)$$

포화온도인 T_{sat} 는 시험부를 각 소구간으로 나누어 그 각 구간에서의 엔탈피 및 압력으로 계산하였으며, 냉매의 물성치 계산은 REFPROP (Version 5.0)을 이용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압력강하

Fig. 3은 관내경 2.8 mm에서 순수냉매 R-22의

시험부 입구온도가 10℃일 경우 열유속 5 kW/m²에서 15 kW/m²으로 변화시키고 질량유속 300 kg/m²s에서 600 kg/m²s로 증가시킨 시험부 입구 및 출구에서 측정된 증발기 단위길이당 압력강하를 나타낸 것이다. Fig.3에서 알 수 있듯이 질량유속이 증가함에 따라 압력강하도 선형적으로 증가하고 있다. 그리고 질량유속 300 kg/m²s일 때는 열유속 증가율 만큼의 압력강하도 증가하였으나 질량유속 400 kg/m²s 이상부터는 열유속 증가의 영향이 그다지 나타나지 않고 있다. 이것은 고질량유속

보다 상대적으로 저질량유속에서 건도의 증가와 함께 기액이상류의 유동특성에 의해 열전달계수가 증가하면서 압력강하도 증가하기 때문이다.

Fig. 4는 관내경 1.8 mm일 때 실험조건을 Fig. 3과 같게 하여 질량유속 및 열유속 증가에 따른 압력강하를 측정된 것이다. Fig. 3과 비교하면 질량유속을 일정하게 했을 때 열유속이 증가할수록 압력강하도 증가하였으며, 열유속이 압력강하에 상당히 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 동일 질량유속 및 열유속에서 관내경 1.8 mm가 2.8 mm보다 최대 3배 이상 높은 압력강하를 나타내고 있다.

Fig. 5는 혼합냉매 R-407C의 관내경 1.8mm, 2.8mm에서의 질량유속 및 열유속에 따른 단위길이당 압력강하에 대해 관경의 영향을 나타낸 것이다. 질량유속 및 열유속이 증가할수록 압력강하는 더 증가하였으며, R-22와 동일하게 고질량유속 및 고열유속에서 압력강하가 최대로 증가하였다. 그리고 질량유속 및 열유속이 같을 때 R-22와 마찬가지로 관내경 2.8mm와 1.8mm의 압력강하 증가율을 비교하면 1.8mm가 2.8mm보다 3 배 이상 됨을 알 수 있다.

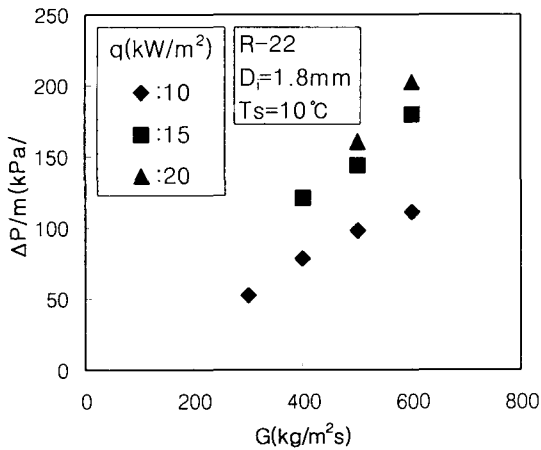


Fig. 4 Pressure drop at different heat flux and mass flux for R-22, Di=1.8mm

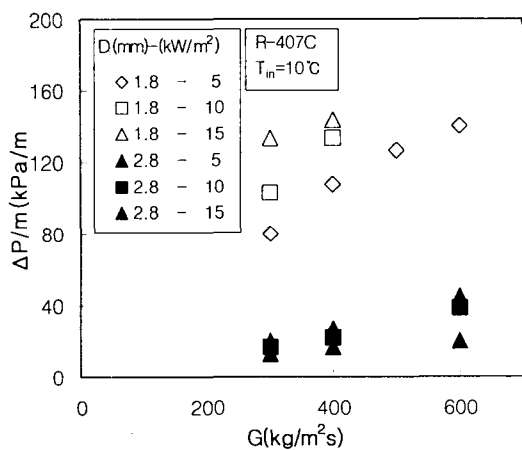


Fig. 5 Effect of tube diameter on pressure drop at different heat flux and mass flux for R-407C

4.2 비등열전달계수

관내경 2.8 mm에서 R-22의 시험부 입구온도가 10℃, 열유속 15 kW/m²일 때 질량유속 및 건도의 변화에 따른 열전달계수를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 건도 0.2 이하에서는 질량유속 및 건도의 증가에 따른 비등열전달계수 증가가 거의 나타나지 않고 있다. 이것은 질량유속의 증가가 열전달계수에 영향을 미치지 못하는 핵비등영역과 저건도 영역에서의 유동양식이 관 직경과 거의 같은 직경인 큰 기포가 액체를 사이에 두고 유동하는 스텝류(slug flow)이기 때문이다. 그러나 건도 0.3 이상에서는 건도의 증가와 함께 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 건도 0.3부터 관내 유동이 기상의 상대적 속도증가로 인하여 액상의 농도 경계층이 얇은 고건도의 환상류 영역으로써 강제대류증발이 지배적이기 때문이라고 생각된다.

또한 건도 0.9 이상에서는 관벽온도의 상승으로 열전달계수가 급격히 저하하는 dry out이 발생하였다.

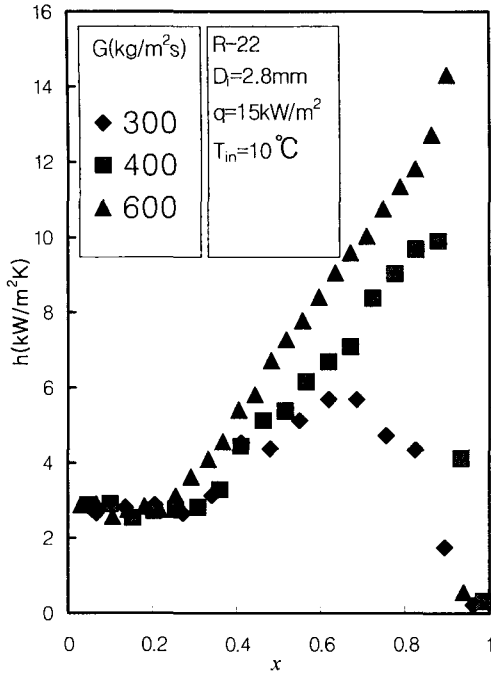


Fig. 6 Variation of local heat transfer coefficients at different mass flux and qualities for R-22, $D_i=2.8\text{ mm}$, $q=15\text{ kW/m}^2$

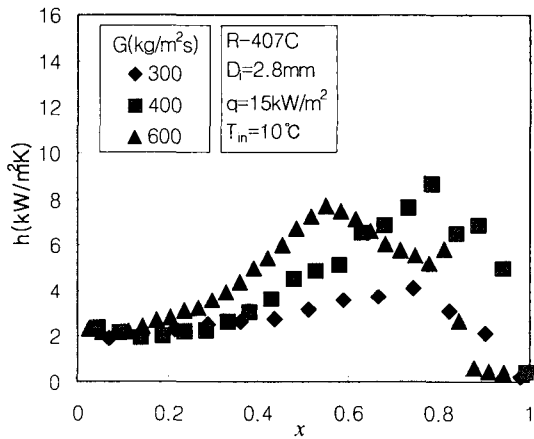


Fig. 7 Variation of local heat transfer coefficients at different mass flux and qualities for R-407C, $D_i=2.8\text{ mm}$, $q=15\text{ kW/m}^2$

Fig. 7은 관내경 2.8mm에서 R-407C를 작동유체로 이용하여 시험부 입구온도 10°C, 열유속 15 kW/m²K일 때의 질량유속 및 건도에 따른 열전달 계수를 나타낸 것이다. 순수냉매 R-22에서와 동

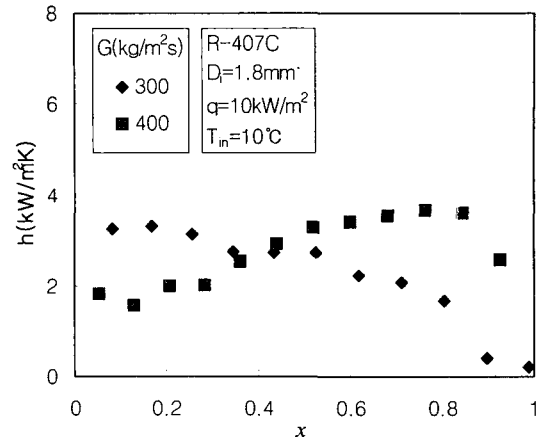


Fig. 8 Variation of local heat transfer coefficients at different mass flux and qualities for R-407C, $D_i=1.8\text{ mm}$, $q=10\text{ kW/m}^2$

일하게 건도 0.2 이하에서는 질량유속 및 건도에 따른 열전달계수의 영향이 크게 나타나지 않고 있으나, 건도 0.3이상부터는 질량유속이 증가할수록 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 또한 질량유속 300 kg/m²s와 400 kg/m²s에서는 건도 0.8 이상에서 벽면온도가 150°C 이상 상승하여 열전달 계수가 급격히 감소하고 있으며 시험부 출구에서는 dry out이 관찰되었다. 그리고, 질량유속 600 kg/m²s에서는 시험부 출구에서의 열전달계수가 다소 감소하였다. 이것은 시험부 출구에서의 높은 압력강하로 냉매온도가 급격히 감소하여 냉매와 관벽온도와 차가 다소 크게되어 열전달계수가 저하되었다고 할 수 있다.

Fig.8은 관내경 1.8 mm일 때 냉매 R-407C의 시험부 입구온도 10°C, 열유속 10 kW/m²에서의 질량유속 및 건도에 따른 열전달계수를 나타낸 것이다. 질량유속 300 kg/m²s와 400 kg/m²s은 상반된 현상이 나타남을 알 수 있다. 이것은 질량유속 300 kg/m²s의 경우 상대적으로 고열유속 및 저질량유속의 조건으로써 관내 유동양식이 환상류의 상태로 발전하지 못하는 스택류로써 핵비등의 영향이 지배적이기 때문으로 사료된다. 이와 같은 현상은 Wambsgans 등⁽¹⁴⁾이 실험한 관내경 2.92 mm의 수평관내 고열유속 및 저질량유속에서의 실험결과와 유사한 현상이라고 할 수 있다. 순수냉매 R-22의 질량유속 600 kg/m²s에서의 열유속에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 9에 나타

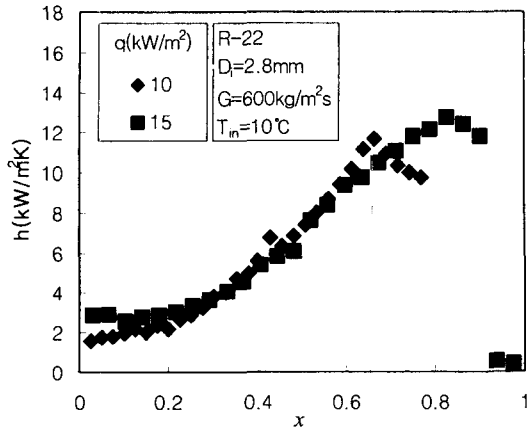


Fig. 9 Variation of local heat transfer coefficients at different heat flux and qualities for R-22, G=600 kg/m²s

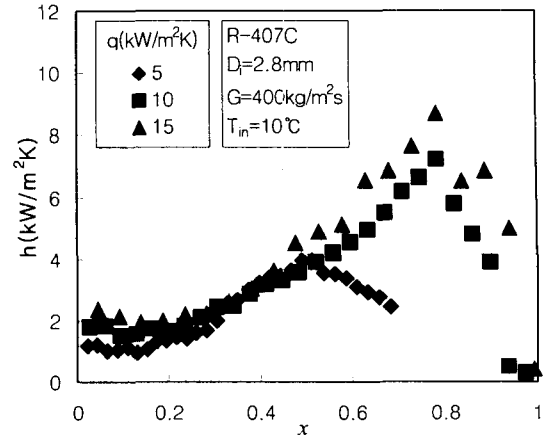


Fig. 10 Variation of local heat transfer coefficients at different heat flux and qualities for R-407C, G=400 kg/m²s

내었다. Fig. 6과는 달리 비등초기 영역에서 열유속이 증가할수록 열전달이 증가함을 알 수 있다. 이것은 비교적 관경이 큰 경우의 현상과 같이 초기 비등구역에서 핵비등열전달에 의하여 열전달이 높은 것으로 생각된다. 그러나, 건도 0.4 이상의 고건도영역에서는 열유속에 의한 영향이 나타나지 않고 있다. 이것은 초기 핵비등의 영향으로 인하여 열전달이 활발히 이루어지다가 고건도 영역에서 강제대류증발의 영향으로 인하여 핵비등열전달이 억제되기 때문으로 판단된다. 또한 미세관내 시험부 입구 열유속에 의한 영향은 기존 대구경관에서의 결과보다 상당히 작게 나타나고 있다. 즉 미세관의 관내경이 작음으로써 상대적으로 증발초기 영역에서부터 유속의 증가로 인하여 핵비등의 억제가 일어나기 때문으로 사료된다.

Fig. 10은 관내경 2.8 mm에서 3성분 혼합냉매 R-407C의 입구온도 10°C에서 질량유속 400 kg/m²s 일 때의 건도 및 열유속에 따른 열전달계수를 나타낸 것이다. 초기 비등영역에서 핵비등의 영향으로 열유속이 증가할수록 열전달이 증가하고 있으나 건도 0.4 이상의 고건도 영역에서는 열유속에 의한 영향이 나타나지 않고 있다. 이것은 앞서 설명한 순수냉매 R-22에서와 마찬가지로 건도 0.4 이상의 고건도영역에서는 강제대류증발이 지배적이므로 핵비등이 억제되어 열유속 영향이 그다지 나타나지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 R-407C, 시험부 입구온도 10°C, 질량

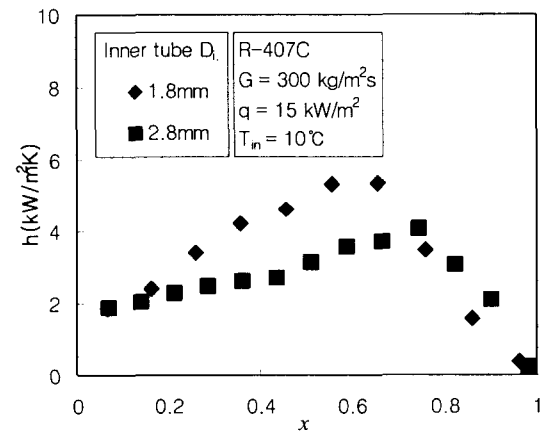


Fig. 11 Effect of tube diameter local heat transfer coefficients for R-407C, G=300 kg/m²s, q=15 kW/m²

유속 300 kg/m²s, 열유속 15 kW/m²에서의 관내경 1.8 mm와 2.8 mm의 열전달계수를 비교한 것이다. 관내경 1.8 mm 및 2.8 mm 모두 건도의 증가에 따라 열전달계수가 증가하고 있다. 건도 0.2 이하의 저건도 영역에서는 열전달계수의 차이는 나타나지 않고 있으나 건도 0.2 이상부터 0.7까지는 관내경 1.8 mm가 2.8 mm보다 높은 열전달계수를 나타내고 있으며 건도 0.7에서는 약 50% 정도 증가함을 알 수 있다. 또한 건도 0.7 이상에서는 1.8 mm 및 2.8 mm 모두 관벽온도 상승으로 인한

dry out 발생으로 열전달계수가 급격히 감소하였다.

4.3 기존 상관식과의 비교

Chen⁽¹⁸⁾은 2상유동 열전달계수를 핵비등과 강제대류비등의 합으로 식(5)와 같이 나타내었다. 또한 증기분율이 증가함에 따라 핵비등이 억제되고 대류증발이 증가하는 현상을 고려한 방정식 (6)을 제시하였다.

$$h_{TP} = h_{CONV} + h_{NB} \quad (5)$$

$$h_{TP} = F \cdot h_i + S \cdot h_{pool} \quad (6)$$

여기서, F 및 S 는 액단상열전달계수 및 풀비등 열전달계수의 Parameter로써 식 (7)과 식 (8)로 표현된다. 또한 h_i 는 액단상열전달계수, h_{pool} 은 풀비등열전달계수로써 각각 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$F = 2.35 \left\{ \frac{1}{X_{tt}} + 0.213 \right\}^{0.736} \quad (7)$$

$$S = \{1 + 0.12 Re_{TP}^{1.14}\}^{-1} \quad (8)$$

$$h_i = 0.023 \left\{ \frac{G \cdot (1-x) \cdot d_i}{\mu_l} \right\}^{0.8} Pr_l^{0.4} \frac{k_l}{d_i} \quad (9)$$

$$h_{pool} = 0.0012 \left\{ \frac{k_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} i_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right\} \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta P_{sat}^{0.75} \quad (10)$$

여기서, σ 는 표면장력, i_{fg} 는 냉매의 증발잠열, c_{pl} 은 냉매액의 비열이다.

Gungor and Winterton⁽¹⁹⁾는 기존의 상관식을 간단히 정리하여 넓은 범위에 사용할 수 있는 2상 열전달계수를 액단상 열전달계수와 강제대류열전달 증가 parameter의 곱으로 나타내었다. 상관식의 기본적인 형태는 식 (11)과 같다.

$$h_{TP} = E \cdot h_i \quad (11)$$

여기서, h_{TP} 는 2상비등열전달계수이며, E 는 강제대류비등열전달증가 parameter로써 다음의 방정

식 (12)와 같고, h_i 는 방정식 (9)에서 나타낸 액단상열전달계수이다.

$$E = 1 + 3000 B_o^{0.86} + 1.12 \left\{ \frac{x}{1-x} \right\}^{0.75} \left\{ \frac{\rho_l}{\rho_v} \right\}^{0.41} \quad (12)$$

단, B_o 는 Boiling수, x , ρ_l 및 ρ_v 는 각각 건도, 액체의 밀도 증기의 밀도이다.

Kandlikar⁽²⁰⁾는 수직 및 수평관에서 발생하는 비등열전달 상관식을 다음과 같이 제안하였다.

$Fr > 0.04$ 일 때

$$h_{TP} = (C_1 C_o^{C_2} (25 Fr_l)^{C_3} + C_3 B_o^{C_4} F_{ff}) h_i \quad (13)$$

여기서, 열전달계수 h_{TP} 는 핵비등이 지배할 때의 열전달 계수 $h_{NBD}(Co > 0.65)$ 와 대류비등이 지배할 때의 열전달계수 $h_{CBD}(Co < 0.65)$ 중에서 큰 값을 사용한다. 그리고, C_o 는 convection수, B_o 는 Boiling수이다. 또한 C_1-C_3 는 제안된 상관식에서의 상수이며, h_i 는 Dittus-Boelter의 식으로 방정식(9)와 같다. F_{ff} 은 Kandlikar에 의해 정리된 액상의 종속 변수이다. 그리고 유체의 값이 정리되지 않은 것에 대해서는 실험 유체에 대한 풀비등 데이터의 상관 관계를 위해서 Froster-Zuber 상관식을 사용하고 다음의 식 (14)와 같이 억제변수 S 를 제안하였다.

$$S = \frac{1}{1 + 2.56 \times 10^{-6} Re_{eq}^{1.17}} \quad (14)$$

Fig. 12는 관내경 2.8 mm에서 순수냉매 R-22, 시험부 입구온도 10°C, 열유속 15kW/m², 질량유속 600 kg/m²s에서의 열전달계수를 기존 상관식⁽⁶⁻⁸⁾의 예측값과 비교한 것이다.

상대적으로 저건도 영역인 건도 0.4이하에서 예측값이 기존의 상관식보다 저하하고, 열전달이 비교적 높은 영역으로 진행되는 건도 0.4부터 0.6까지 Kandlikar의 상관식과 비교하면 약 50%의 오차가 나타나고, Gungor 및 Chen의 상관식과는 약 30% 오차로 일치하고 있다. 건도가 증가하여 완전 환상류 영역인 건도 0.6 이상에서는 실험치

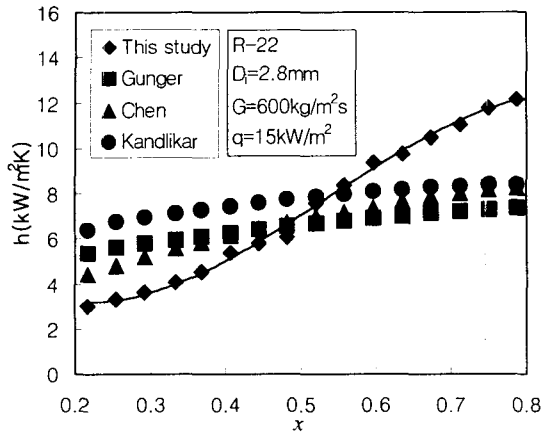


Fig. 12 Comparison of experimental data with proposed correlation for R-22, $q=15\text{kW/m}^2$, $G=600\text{kg/m}^2\text{s}$

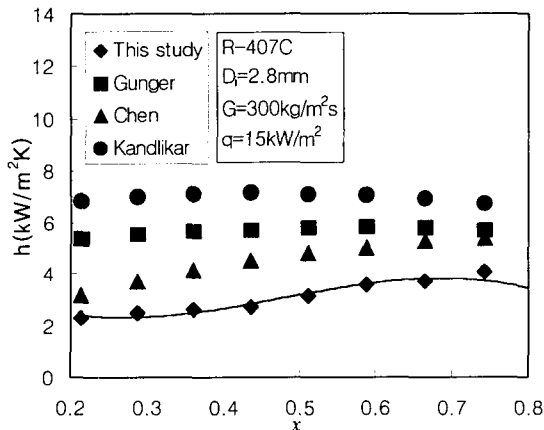


Fig. 13 Comparison of experimental data with proposed correlations for R-407C, $q=15\text{kW/m}^2$, $G=300\text{kg/m}^2\text{s}$

가 예측값보다 열전달계수가 더 크게 측정되었다. 이것은 7mm 이상의 관에서 적용한 기존의 상관식보다 비등초기 영역에서 핵비등 영향이 적기 때문이다. 고건도영역에서 실험치가 예측값보다 높은 것은 미세관내 유동이 기존의 관경에서보다 더 발달된 환상류와 더불어 관경이 더 작으므로써 관 내벽 단위면적에 접하는 냉매액의 체적량이 더 증가했기 때문이라고 할 수 있다.

Fig. 13은 관내경 2.8mm에서 혼합냉매 R-407C의 시험부 입구온도 10°C, 질량유속 300 kg/m²s, 열유속 15 kW/m²에서의 건도에 따른 본 실험결과

와 순수물질에 대한 기존 상관식의 예측값과 비교한 것이다. 전체적으로 예측값이 본 실험결과보다 높게 나타남을 알 수 있다. 열전달계수에 있어서 Kandlikar 상관식의 경우 예측값이 상당히 높게 나타났으며, Chen 상관식의 경우 그 오차범위가 상대적으로 작지만, 그 역시 50% 이상의 큰 오차를 나타내고 있다. 따라서 미세관내 3성분 혼합냉매의 비등열전달계수 예측에 있어서 기존의 순수물질에 대한 상관식을 적용시키는 것은 많은 문제점이 있으므로 새로운 상관식의 개발이 필요하다고 사료된다.

5. 결론

수평 미세관 내경 1.8mm 및 2.8mm의 관길이 각각 1500mm와 3000mm인 stainless steel tube를 이용한 순수냉매 R-22와 3성분혼합냉매 R-407C의 비등열전달에 대해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 질량유속이 증가함에 따라 R-22 및 R-407C 모두 압력강하가 선형적으로 증가하였다. 그리고 관내경 1.8mm는 열유속 증가에 따라 압력강하도 상당히 증가하였으나 관내경 2.8mm는 열유속 증가가 압력강하에 그다지 영향을 미치지 못하였다.

(2) 저건도 영역에서는 질량유속 및 건도가 열전달계수에 미치는 영향이 적었으나 건도 0.3 이상의 고건도 영역에서는 상대적으로 고질량유속일수록 열전달계수는 더욱더 증가하였다.

(3) 열전달계수에 미치는 미세관 내경의 영향은 건도 0.3 이하의 저건도 영역에서는 대단히 작았으나 고건도 영역에서는 미세관 내경이 작을수록 열전달계수는 더욱더 증가하였다.

(4) 종래의 순수물질 열전달 상관식과 본 실험결과를 비교한 결과 순수냉매 R-22의 경우 저건도 영역에서 최대 50%이상 실험치가 저하하였고 고건도 영역에서는 50% 이상 증가하였다. 또한 3성분 혼합냉매 R-407C의 실험결과를 기존의 순수물질 열전달 상관식과 비교한 결과 실험데이터가 순수물질 상관식보다 상당히 낮게 나타났다.

후 기

본 연구는 해양수산부(한국해양수산개발원, 과제번호 19990007) 수산특정연구개발과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 연구에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Goto, M., Kambe, K., Inoue, N. and Sato, M., 1994, "Condensation Heat Transfer of HCFC-22 and HFC-32/HFC-125/HFC-134a Inside an Internally Grooved Horizontal Tube," *31st National Heat Transfer Symposium of Japan*, G221, pp.736~738.
- (2) Oh, J. T., Choi, K. I., Aoyama, Y., Saito, S. and Hihara, E., 1999, "Effect of Tube Diameter on Boiling Heat Transfer for R-407C Inside a Horizontal Tube," *Proc. SAREK'99 Summer Annual Conference (I)*, pp.14~18.
- (3) Oh, J. T., Park, K. W., Oh, H. K., L. Zhang, and Hihara, 1996, "Forced Convective Boiling Heat Transfer of a Ternary Refrigeration Mixture for HCFC22 Alternative," *Proc. KSME 1996 Fall Annual Meeting B*, pp. 749-754.
- (4) Hwang, Y. W. and Kim, M. s., 2001, "An Experimental Study on Evaporative Heat Transfer Characteristics in a Small Diameter Tube," *Trans. KSME B*, Vol.25, No., pp. 216~224.
- (5) Oh, H. K., Katsuta, M. and Shibata, K., 1998, "Heat Transfer Characteristics of R-134a in a Capillary Tube Heat Exchanger," *Heat Transfer 1998*, Proceeding of 11th IHTC, Vol. 6, pp. 131~136.
- (6) Zang, L., Hihara, E., Satio, T. and Oh, J. T., 1997, "Boiling Heat Transfer of a Ternary Refrigerant Mixture Inside a Horizontal Smooth Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 9, pp. 2009~2017.
- (7) Yang, C. Y. and Webb, R. L., 1997, "A Predictive Model for Condensation in Small Hydraulic Diameter Tubes Having Axial Micro-Fins," *ASME journal of Heat Transfer*, Vol. 119, pp. 776~782.
- (8) Wang, C. C., Kuo, C. S., Chang, Y. J. and Lu, D. C., 1996, "Two-Phase Flow Heat Transfer and Friction Characteristics of R22 and R407C," *ASHRAE transactions : Symposia*.
- (9) Barajas, M. and Panton, R.I, 1993, "The Effect of Contact Angle on Two-Phase Flow in Capillary Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 2, pp. 337~346.
- (10) Yang, C. Y. and Webb, R. L., 1996, "Friction Pressure Drop of R-12 in Small Hydraulic Diameter Extruded Aluminum Tubes with and Without Micro-fins," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 4, pp. 801~809.
- (11) Yan, Y. Y. and Lin, T. F., 1998, "Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Small Pipe," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 24, pp. 4183~4194.
- (12) Fukano, T. and Kariyasaki, A., 1993, "Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Capillary Tube," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 141, pp. 59~68.
- (13) Kew, P. A. and Cornwell, K., 1997, "Correlations for The Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-Diameter Channels," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, pp. 705~715.
- (14) Wambsgans, M. W., France, D. M., Jendrzejczyk, J. A., and Tran, T. N., 1993, "Boiling Heat Transfer in a Horizontal Small-Diameter Tube," *ASME journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 963~972.
- (15) Peng, X. F. and Wang, B. X., 1993, "Forced Convection and Flow Boiling Heat Transfer for Liquid Flowing Through Micro Channels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 14, pp. 3421~3427.
- (16) Lee, H. J., Lee, S. Y., 2001, "Heat Transfer Correlation for Boiling Flows in Small Rectangular Horizontal Channels with Low Aspect Ratios," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 27, pp. 2043~2062.
- (17) Tran, T. N., Chyu, M. C., Wambsganss, D. M. and France, D. M., 2000, "Two-Phase Pressure Drop of Refrigerants During Flow Boiling in Small Channels: an Experimental Investigation and Correlation Development," *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol. 26, pp. 1739~1754.
- (18) Chen, J. C., 1966, "A Correlation for Boiling

- Heat Transfer to Saturated Fluids in Vertical Flow," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 32~37.
- (19) Gungor, K. E. and Winterton, R. H. S., 1987, "Simplified General Correlation for Flow Saturated Boiling and Comparisons of Correlations with Data," *Chem. Eng. Res.*, Vol. 65, pp. 148-~56.
- (20) Kandlikar, S. G., 1990, "A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Horizontal and Vertical Tubes," *Trans. ASME*, Vol. 112, pp. 219~228.