

## 수평관내 3성분 혼합냉매의 강제대류비등 열전달

### Forced convective boiling heat transfer for a ternary refrigerant mixture inside a horizontal tube

오 증 텍\*  
J. T. Oh

**Key words:** Heat transfer coefficients(열전달계수), Nucleate boiling(핵비등), Forced convective vaporization(강제대류증발), Heat transfer correlation(열전달상관식), Ternary refrigerant mixture(R-407C혼합냉매), Horizontal tubes(수평관)

#### ABSTRACT

The forced convective boiling heat transfer coefficients of R-407C were measured inside a horizontal tube 6.0 mm I.D. and 4.0 m long. The heat transfer coefficients increased according to an increase in heat flux at constant mass flux. Because nucleation was completely suppressed in the two-phase flow region with high quality, heat transfer coefficients in forced convective evaporation were higher than those in nucleate boiling region. Average heat transfer coefficients of R-407C were about 30 percent lower than the pure refrigerant correlation, due to mass transfer resistance at the gas-liquid interface. However, the total experimental data shows an agreement with the predicted data for ternary refrigerant mixtures with a mean deviation of 30%.

---

#### 기 호 설 명

#### 그리스문자

$C_p$  : 정압비열 [J/kgK]  
 $d$  : 내관직경 [m]  
 $D_b$  : 기포직경 [m]  
 $G$  : 질량속도 [kg/m<sup>2</sup>s]  
 $h$  : 열전달계수 [kW/m<sup>2</sup>K]  
 $M$  : 질량유량 [kg/s]  
 $q$  : 열유속 [kW/m<sup>2</sup>]  
 $T$  : 온도 [K]  
Bo : Boiling 수,  $q/G \Delta h$   
Re : Reynolds 수,  $Gd/\mu$   
Pr : Prandtl 수,  $C_p \mu / k$

$\alpha$  : 물질전달계수 [kg/m<sup>2</sup>s]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $k$  : 열전도도 [W/mK]

#### 하첨자

b : 벌크(bulk)  
G : 증기  
I : 기액계면  
L : 액체  
s : 포화  
W : 관벽

---

\* 정회원, 여수대학교 냉동공학과

## 1. 서론

2성분 및 3성분 비공비혼합냉매 기액 상평형의 열역학적 특성에 의하면 계면(interface)에서 증발하기 쉬운 물질은 증발이 느린 물질보다 먼저 증발한다. 즉 계면에서 저온 증발 물질이 고온 증발 물질보다 상대적으로 잘 증발하기 때문에 액상에서 액상평균의 물질농도는 계면에서의 그 물질농도보다 크다. 또한 기상에서 기상평균 물질농도는 이미 증발한 물질이 많이 있기 때문에 계면에서의 그 물질농도보다 더 크다. 그러므로 액상에서 계면으로 향하는 물질전달량 및 기상에서 계면으로 향하는 물질전달량이 존재하게 되며 그 방향은 열전달의 진행방향과 반대가 되므로 혼합냉매는 순수냉매보다 열전달이 저하된다.<sup>(1-2)</sup> 이러한 혼합냉매의 열전달 저하를 예측하는 기본방식은 순수냉매의 방법과 크게 다르지 않다. 대부분의 연구자들은 순수냉매의 대류비등 열전달 상관식에 비공비 혼합냉매의 특성인 등압증발시 상변화 온도의 변화와 액상과 기상의 성분비 차를 추가하여 열전달 상관식을 나타내고 있다. 1980년 Bennet와 Chen<sup>(3)</sup>은 순수물질에 대한 Chen의 상관식<sup>(4)</sup>에 기상 및 액상의 성분비를 추가하여 열전달 상관식을 발전시켰으며, Jung등<sup>(5)</sup>은 순수냉매에 대해 Chen의 모델을 기초로 하여 핵비등항과 대류증발항에 보정계수를 첨가시킨 다소 복잡한 열전달 상관식을 나타내었다. 1990년 Hihara와 Saito<sup>(6)</sup>는 핵비등항에 혼합물의 풀비등에 적용시키는 Thome의 상관식<sup>(7)</sup>을 채택하였고 대류증발항에는 계면온도와 포화온도의 차 및 관련된 항을 수정인자로 하여 열전달계수 예측을 위한 이론모델을 제시하였다. Kandlikar<sup>(8)</sup>은 순수냉매에 대해 나타내었던 상관식을 혼합냉매에 적용할 수 있도록 변화시켰으나 물질에 따라 다르게 적용시키는 보정항을 포함하고 있으므로 사용하는 데는 다소 불편한 점이 있다. 이와 같이 혼합냉매의 강제대류비등 열전달에 관한 연구도 순수냉매와 유사하게 핵비등항 및 대류비등항으로 구분하여 열전달식을 정리하고 실험데이터를 추가시킨 수정항으로써 상관식을 나타내고 있다.

그러나 대부분의 연구가 2성분 혼합냉매에 관한 것으로써 3성분 혼합냉매에 대한 연구는 거의가 실험적 연구<sup>(9-12)</sup>이거나 2성분 혼합냉매의 열전달 예측 모델을 3성분 혼합냉매에 확장시켜 열

전달저하에 대한 이론모델을 제안한 연구<sup>(13-14)</sup>가 있을 정도로 대단히 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 3성분 혼합냉매의 강제대류비등 열전달에 대해 본 연구자들이 제안한 상관식<sup>(14)</sup>을 핵비등항 및 강제대류증발항으로 각각 구분하여 수평관내에서 R-407C의 열전달 실험데이터와 비교하였고, 또한 열유속 및 질량유속에 따라 실험 및 정리한 데이터를 열전달 상관식과 비교하여 그 정도를 나타내었다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1의 실험장치는 강제순환식 펌우프로써 냉동유의 영향을 배제시키기 위하여 냉매를 기어(gear)펌프로 순환시켰다. 냉매의 순환을 간단히 설명하면 냉매량을 조절할 수 있는 펌프에 의해 냉매탱크에서 나온 냉매는 과냉각기에서 과냉각도가 조절되고 질량유량계에서 유량이 측정된 후 예열기로 흐른다. 예열기에서 시험부 입구건도가 조절된 후 시험구간인 증발기로 순환되며, 증발기에서 질량유속 및 열유속, 건도에 따라 시험부의 관벽온도 및 냉매압력이 측정되고 증발된 냉매증기는 응축기로 유입되어 완전히 응축된 후 냉매탱크로 들어가 위의 순서대로 재순환된다. 시험부인 증발기는 외경 7.0 mm, 내경 6.0 mm 전열관 길이 4 000 mm 인 SUS316 스테인레스강의 평활관으로 구성하였다. 증발기 입구 및 출구와 응축기 입구 및 출구 냉매의 유동양식을 관찰하기 위하여 내경 6.0 mm, 길이 100 mm인 사이트글라스(sight glass)를 설치하였다.

관벽의 국소 및 평균온도를 측정하기 위하여 동-콘스탄탄 열전대를 관의 동일 단면상에 관 상부에서 원주방향 90도 간격으로 3군데, 또한 관 길이 방향 500 mm 간격으로 24개소에 설치하였다. 또한 시험부의 입구 및 출구와 등간격 중간 지점에서 냉매의 압력 및 온도를 압력계와 크로멜-알루멜 열전대로 측정하였다. 냉매의 포화온도 조절은 시험구간에 교류를 직접 공급하여 가열시키는 전압조정기로 하였고, 냉매온도는 측정된 압력 및 혼합냉매의 조성과 건도로 부터 열역학적 물성을 이용하여 구하였다. 또한 혼합냉매의 조성을 증발기 출구에서 가스크로마토그래프로 분석하였다.

실험데이터 측정오차를 최소화 시키기 위하여

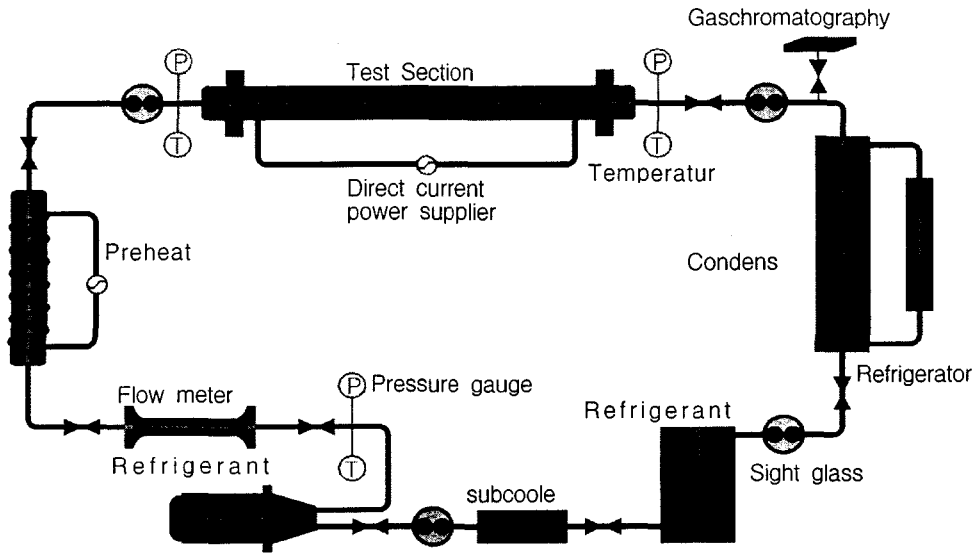


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental apparatus.

정밀온도계(CHINO CNA)와 백금측온 저항체로써 동-콘스탄탄 및 크로멜-알루멜 열전대를 0.1℃로 교정하였다. 그리고 열전달계수의 실험데이터 오차는 관내벽온도 및 열유속 등의 측정 오차를 종합한 결과 9% 이내가 되었다.

관길이 방향 국소평균 열전달계수는 식 (1)과 같이 구하였다.

$$h = \frac{q}{T_w - T_s} \quad (1)$$

### 3. 강제대류비등 열전달의 이론 해석

저건도 구역의 대류비등에서 열전달의 대부분은 기포에 의해 관벽에서 증기 중심부로 전달된다. 고건도 구역이 되면 핵비등은 억제되고 대부분의 열은 관벽에서 액막을 통해 전달되고 기액계면에서 액체가 증발하는 강제대류증발이 된다. 1950년대 부터 강제대류비등 열전달계수를 핵비등향과 강제대류증발향으로 구분하여 나타내고 있으며, 그 중에서도 최근에 제안된 Yoshida 등의 순수냉매 열전달계수에 관한 상관식<sup>(15)</sup>은 타 연구자들의 실험 및 열전달 상관식 데이터를 합리적으로 정리하여 다음과 같은 변수(parameter)로써 나타내었다.

$$h = Sh_b + Fh_f \quad (2)$$

여기서 대류의 영향에 의해 핵비등 억제를 나타내는  $S$ 는 Reynolds 수 및 Boiling 수와 건도의 함수로써 방정식 (3)과 같으며 핵비등계수  $h_b$ 는 Stephan과 Abdelsalam의 상관식<sup>(16)</sup>을 이용하여 식 (4)와 같이 구하였다.

$$S = 1 / \left[ 1 + C \left( Re_L \times \frac{F^{1.25}}{10^4} \right)^{0.5} \times \left( B_o \times 10^4 \right)^{-0.5} X_{tt}^{-0.5} \right] \quad (3)$$

$$h_b = 207 \frac{k}{D_b} \left( \frac{qD_b}{k_L T_b} \right)^{0.745} \times \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.581} Pr_L^{0.533} \quad (4)$$

$$D_b = 0.51 \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{0.5} \quad (5)$$

또한 강제대류증발의 영향은 2상 증가를 나타내는(multiplier)  $F$ 와 관내 2상 흐름의 액상에 대

한 단상열전달계수  $h_f$ 로써 각각 방정식 (6)과 (7)로 나타내었다.

$$F = 1 + 2X_{\mu}^{-0.88} \quad (6)$$

$$h_f = 0.023 \frac{k_L}{d} Re_L^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

$$X_{\mu} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.1} \quad (8)$$

방정식 (3)에서 정수  $C$ 는 실험적으로 구한 값으로써 Yoshida등은 0.9로 나타내었다. 본 연구에서는  $C$ 를 0.4로 하여 HFC 순수냉매의 실험 데이터와 비교한 결과  $\pm 30\%$  이내의 오차로 잘 일치하였다.<sup>(14)</sup> 따라서 Yoshida식을 발전시켜 3성분 혼합냉매의 열전달계수 저하에 대한 상관식을 나타내면 방정식 (9)와 같다.

$$h = k_b S h_b + k_f F h_f \quad (9)$$

여기서  $k_b$  및  $k_f$ 는 3성분 혼합냉매의 열전달 계수가 순수냉매보다 낮은 정도를 나타내는 핵비등과 강제대류증발의 변수(parameter)이다.

### 3.1 핵비등

강제대류비등 열전달에서 핵비등에 미치는 물질전달의 영향은 풀(pool)핵비등에 미치는 영향과 거의 같다고 할 수 있다.

Thome의 2성분 혼합물 풀핵비등 열전달에 관한 모델(model)을 3성분 혼합냉매에 적용시키면 핵비등항의 열전달 저하 계수는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_b = \frac{\Delta T_I}{\Delta T_I + \Delta T_E} \quad (10)$$

여기서  $\Delta T_I$ 는 이상혼합과열도(ideal wall superheat)로써 혼합냉매의 물성치 및 Yoshida 등의 방정식으로 구하였고,  $\Delta T_E$ 는 과잉과열도(또는 초과벽과열도, excess wall superheat)로써

다음의 방정식(11)과 같이 혼합냉매의 비점(bubble point)과 노점(dew point)온도차  $\Delta T_{bp}$ 와 같다고 할 수 있으며 Thome의 모델<sup>(7)</sup>을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta T_E = \Delta T_{bp} \quad (11)$$

### 3.2 강제대류증발

3성분 혼합냉매의 관내흐름에서 유동양식이 환상류일 때 강제대류증발 모델식은 증력의 영향을 무시하고 기액계면에서 상평형이 성립된다고 가정하면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 관벽으로부터 전달된 열은 액체 및 증기온도를 상승시키고 기액계면에서 액체를 증발시킨다.

$$\pi dq = M_L C_{PL} \frac{dT_{Lb}}{dz} + M_G C_{PG} \frac{dT_{Gb}}{dz} + \pi dm_{ev} \Delta h \quad (12)$$

여기서  $M_L$  및  $M_G$ 는 액상과 기상의 유량,  $m_{ev}$ 는 관벽의 단위면적 및 단위시간당의 증발질량률,  $\Delta h$ 는 증발열이다.

액막내의 물질전달을 무시하고 기상의 물질전달만 고려하면 기액계면 주위의 물질확산은 다음의 방정식으로 정리할 수 있다.

$$a_{mG1} \rho_G (y_{a1} - y_{b1}) = (x_{ev1} - y_{a1}) m_{ev} \quad (13)$$

$$a_{mG2} \rho_G (y_{b2} - y_{a2}) = (x_{ev2} - y_{b2}) m_{ev} \quad (14)$$

여기서  $a_{mG1}$  및  $a_{mG2}$ 는 기상의 물질전달계수,  $y_{a1}$  및  $y_{b2}$ 는 기액계면에서 혼합물의 성분 1과 2의 기상질량분률,  $y_{b1}$  및  $y_{a2}$ 는 기상에서의 벌크질량분률(bulk mass fraction)이다. 또한  $x_{ev1}$  및  $x_{ev2}$ 는 증발하는 물질의 질량분률로써 기액계면에서의 질량분률과 그 온도으로써 구할 수 있다.

방정식(12)를 기본으로하고 열 및 물질전달과 운동량 방정식을 이용하면 식(13)과 (14)를 만족시키는  $a_{mG1}$  및  $a_{mG2}$ 를 구할 수 있다. 따라서

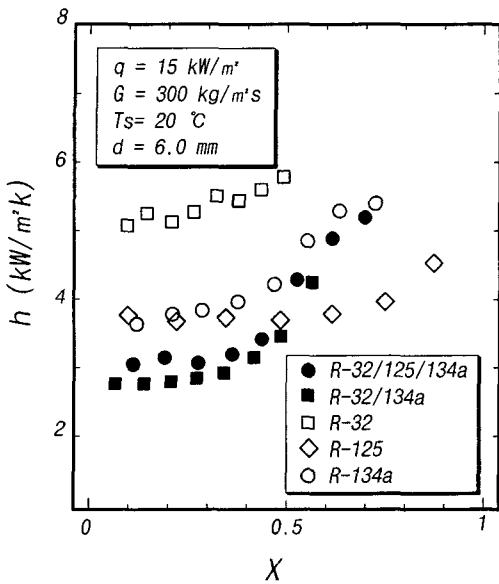


Fig. 2 Examples of the heat transfer coefficients at different qualities.

위의 방정식 등을 이용하여 기액계면온도  $T_i$ 를 구하면 강제대류증발항의 변수(parameter)인 열전달 저하 계수를 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_f = \frac{T_w - T_i}{T_w - t_s} \quad (15)$$

방정식(10)과 (15)에 대한 구체적인 설명은 참고문헌(1, 14) 및 부록에 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 본 실험장치에서 R-407C의 측정 열전달계수를 2성분 혼합냉매 및 순수 냉매의 측정 열전달계수 데이터와 비교한 것이다. 즉 열유속  $15 \text{ kW/m}^2$ , 질량속도  $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일때 3성분 혼합냉매인 R-32/125/134a(R-407C)와 2성분혼합냉매 R-32/134a( 30/70 wt% ) 및 순수냉매 R-32, R-125, R-134a의 비등열전달에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 혼합냉매 및 순수냉매 모두 건도가 증함에 따라 열전달 계수도 증가하고 있다. 그 중에서도 R-32가 우수한 열역학적 특성 때문에 열전달 계수가 가장 높

다. R-407C의 열전달계수는 저건도 영역에서 R-134a 보다 약 20% 저하하지만 고건도 영역에서는 R-134a와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 3성분 혼합냉매 R-407C의 핵비등 및 강제대류증발에 대해 Yoshida가 제안

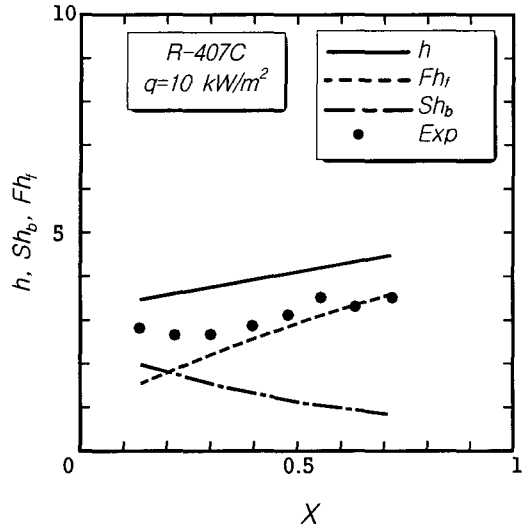


Fig. 3 Modified Yoshida's correlation and the experimental data at different qualities for R-407C,  $q=10 \text{ kW/m}^2$ .

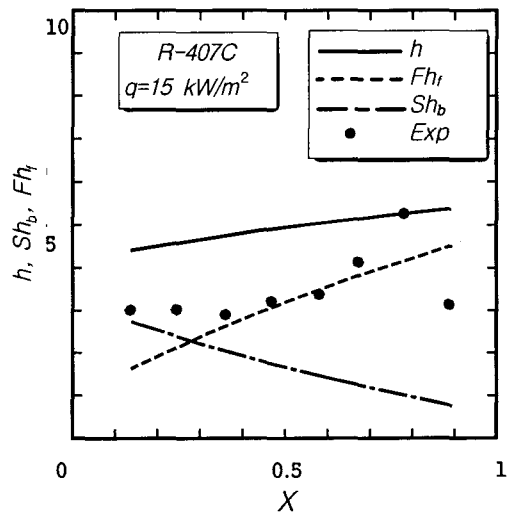


Fig. 4 Modified Yoshida's correlation and the experimental data at different qualities for R-407C,  $q=15 \text{ kW/m}^2$ .

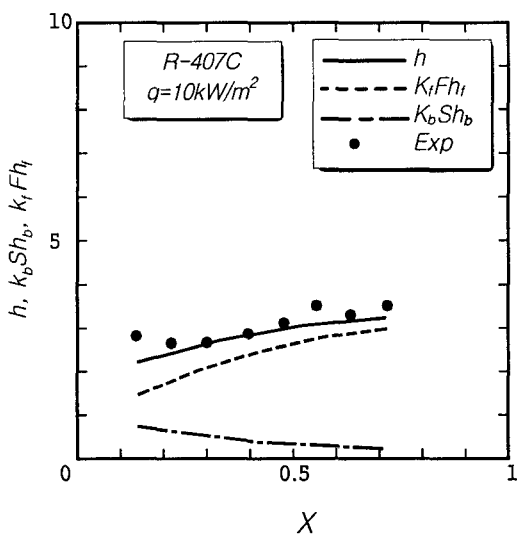


Fig. 5 Present model and the experimental data at different qualities for R-407C,  $q=10\text{ kW/m}^2$ .

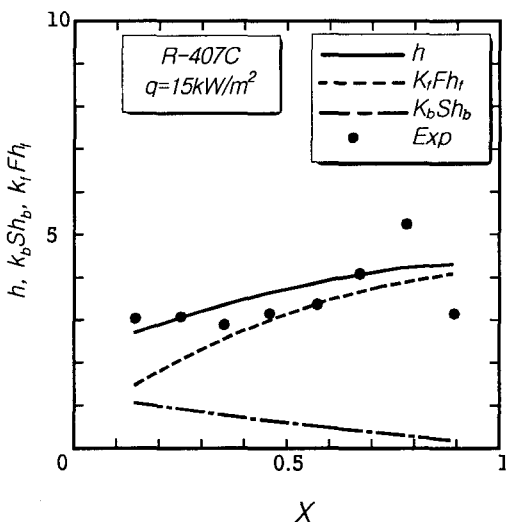


Fig. 6 Present model and the experimental data at different qualities for R-407C,  $q=15\text{ kW/m}^2$ .

한 방정식(2)를 수정하여 계산한 결과와 실험결과를 나타낸 것이다. 즉 열유속  $10\text{ kW/m}^2$  및  $15\text{ kW/m}^2$ 일 때, 건도의 변화에 따른 핵비등 및 강제대류증발 열전달계수를 나타낸 것으로서, 일점쇄선 및 파선은 각각 핵비등항과 강제대류증발항

의 열전달 계산값이고 실선은 핵비등항과 강제대류증발항의 열전달 계수를 합한 것이며 막힌원 (●)은 실험결과이다. Fig. 3 및 Fig. 4에서 알 수 있듯이 저건도 영역에서는 핵비등에 의한 열전달 계수가 강제대류증발에 의한 열전달계수보다 크다. 그러나 건도가 점점 증가함에 따라 핵비등 영향은 서서히 감소되고 강제대류증발에 의한 열전달계수가 증가함을 알 수 있다. 특히 고건도 영역에서는 핵비등에 의한 열전달계수가 대단히 낮다. 이것은 건도가 증가함에 따라 강제대류의 영향에 의해 핵비등이 억제되고 열전달의 대부분이 증발에 의해 이루어지기 때문이다. 또한 실험결과와 비교하면 순수냉매에 대해 수정한 Yoshida등의 계산치가 R-407C의 실험값보다 약 30%정도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 3성분 혼합냉매의 열전달 저하를 나타내는 방정식(9)를 이용하여 R-407C에 대해 열유속  $10\text{ kW/m}^2$ 과  $15\text{ kW/m}^2$ 일 때 건도의 증가에 따른 계산치와 실험값을 나타낸 것이다. Fig. 6의 건도 0.8 이상에서 일어나는 dry out 현상을 제외하면 Fig. 5 및 Fig. 6에서 알 수 있듯이 계산값과 실험치는 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 7은 열유속을  $10\text{ kW/m}^2$ 로 일정하게 하고 질량속도를 변화시켰을 때 상관식인 방정식(9)로

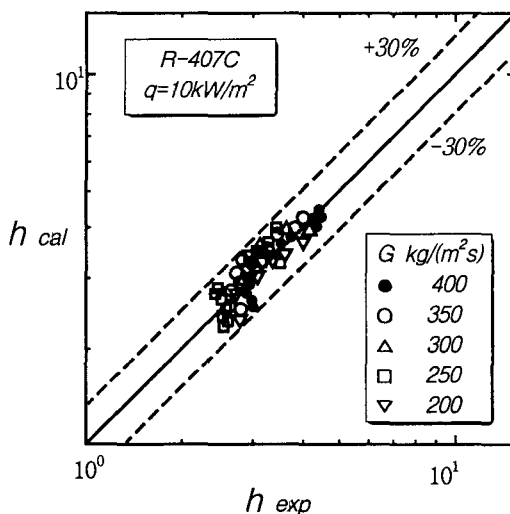


Fig. 7 Comparison of the present model with the experimental data for R-407C,  $q=10\text{ kW/m}^2$ .

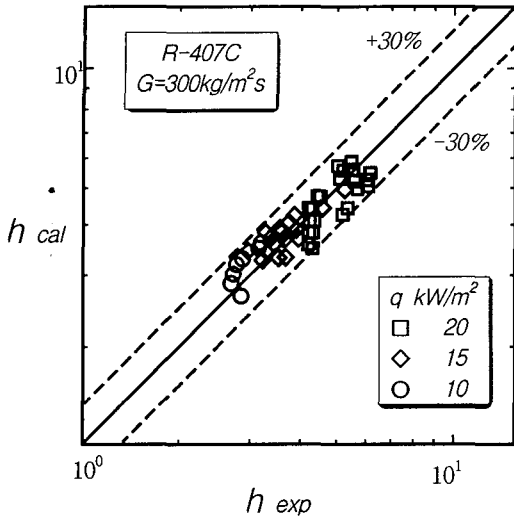


Fig. 8 Comparison of the present model with the experimental data for R-407C,  $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

구한 열전달계수와 실험데이터를 비교한 것이다. 계산치와 실험데이터가  $\pm 30\%$  이내의 오차 범위 내에서 잘 일치하고 있다. Fig. 8은 질량속도를  $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 하고 열유속을 증가시키면서 상관식(9)로 구한 열전달계수와 실험데이터를 비교한 것이다. Fig. 7과 마찬가지로 계산치와 실험데이터는  $\pm 30\%$  범위내에서 잘 일치하며, 또한 열유속이 증가함에 따라 열전달계수도 증가함을 알 수 있다.

## 5. 결론

수평관내 3성분 혼합냉매 R-407C의 강제대류 비등 열전달에 대해 실험을 한 결과 건도가 증가할수록 순수냉매와 마찬가지로 열전달계수에 미치는 영향은 핵비등보다 강제대류증발이 대부분임을 알 수 있었다. 또한 질량속도가 일정할 때 열유속의 증가에 따라 열전달률도 증가하였다. 측정된 열전달 계수를 순수 및 3성분 혼합냉매 열전달 상관식과 비교하였다. 혼합냉매의 물질전달 저항에 의해 순수냉매의 상관식으로 구한 계산치보다 약 30%정도 저하하였다. 그러나 3성분 혼합냉매 열전달 상관식과의 일치는 비교적 양호하였으며 전반적으로 열전달 실험데이터와 상관

식이  $\pm 30\%$  오차 범위내에서 잘 일치하였다.

## 후 기

본 연구에 도움을 주신 일본동경대학 기계공학과 飛原英治 교수님과 한국과학재단에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 오종택, 박기원, 오후규, Zhang, L, Hihara, E., 1996, HCFC22 대체냉매를 위한 3성분 혼합냉매의 강제대류비등 열전달, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 B, pp. 749-754.
- 신지영, 김민수, 노승택, 1996, 순수 및 혼합냉매의 유동증발 열전달 상관식, 공기조화·냉동공학회 논문집, 제8권, 제2호, pp. 254-266.
- Bennett, D. L., and Chen, J. C., 1980, Forced convective boiling in vertical tubes for saturated pure components and binary mixtures, *AIChE J.*, Vol. 26, pp. 454-461.
- Chen, J. C., 1966, Correlation for boiling heat transfer to saturated fluid in convective flow *I&EC Pro. Design and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 322-329.
- Jung, D. S, McLinder, M., Radermacher, R., and Didon, D., 1989, Horizontal flow boiling heat transfer experiments with a mixture of R22/R114, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 1, pp. 131-145.
- Hihara, E., and Saito, T., 1990, Forced convective boiling heat transfer of binary mixture in a horizontal tube, *Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2, pp. 123-128.
- Thome, J. R., 1983, Prediction of binary mixture boiling heat transfer coefficients using only phase equilibrium data, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 7, pp. 965-974.
- Kandlikar, S. G., 1990, A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 219-228.

9. Torikoshi, K. et al., 1993, Heat transfer of ternary non-azeotropic mixtures inside a grooved horizontal tube. Proc. 27th Japanese joint Conf. on Air-cond. and Refrig., pp. 145-148.
10. Sami, S. M., 1992, Prediction of the heat transfer characteristics of R-22/R-152/ R-11 and R-22/R-152a/R-124. ASHRAE Trans., Part 2. pp. 51-58.
11. 五島正雄, 井上順黄, 小山和, 1994, HCFC22 代替冷媒の水平内面溝付管内の傳熱, 平成6年度日本冷凍協會學術講演會, 6-11-28, pp. 121-124.
12. 蛭子毅, 戸田一美, 1995, 非共沸混合冷媒HFC-32/125/134a의熱傳達促進に關する研究, 第29回空氣調和・冷凍聯合講演會, No. 95-252, pp. 69-72.
13. Oh, J. T., Zhang, L., Hihara, E., Saito, T., and Ijima, H., 1995, Boiling heat transfer of HFC's refrigeration mixtures inside a horizontal smooth tube, Proceedings, JSME 8th Thermal Engineering Symposium'95, Tokyo, pp. 70-71.
14. Zhang, L., Hihara, E., Saito, 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.
15. Yoshida, S., Mori, H., and Matsunaga, T., 1994, Prediction of heat transfer coefficient for refrigerants flowing in horizontal evaporator tubes, Trans. of the JAR, Vol. 11, No. 1, pp. 67-78.
16. Stephan, K., and Abdelsalam, M, 1980, Heat transfer correlations for natural convection boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 23, pp. 73-87.

## 부 록

순수냉매를 비교 기준으로 한 3성분 혼합냉매의 열전달 저하율을 나타내는 핵비등 및 강제대류증발의 변수  $k_b$  와  $k_f$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

### 1. 핵비등 열전달 저하계수( $k_b$ )

Stephan등(Chemie Ingr. Tech. Vol. 41, pp. 409~417)은 일정한 열 플럭스에서 관벽과열도(wall superheat)  $\Delta T$ 는 증기와 액체의 물농도차인  $|y-x|$ 의 최대가 되는 혼합물에서 가장 높다고 하였으며  $\Delta T_I$ 와  $\Delta T_E$ 의 합으로 나타내었다.

$$\Delta T = \Delta T_I + \Delta T_E \quad (16)$$

$$\Delta T_E = A|y-x|\Delta T_I \quad (17)$$

$$A = A_o(0.88 + 0.12P) \quad (18)$$

식 (18)에서 P는 압력,  $A_o$ 는 실험적으로 결정되며 값을 알 수 없으면, 1.53으로 할 것을 추천하였다. 본 연구에서도 문헌적으로 R-407C의 핵 풀비등에 대한 데이터가 정리되어 있지 않기 때문에  $A_o$ 값을 1.53으로 하여 계산하였다.

방정식(17)를 3성분 혼합물에 적용시키면  $\Delta T_I$ 와  $\Delta T_E$ 는 각각 식 (19) 및 (20)으로써 정리된다.

$$\Delta T_E = A \sum_{j=0}^3 (x_j |y_j - x_j|) \Delta T_I \quad (19)$$

$$\Delta T_I = \sum_{j=1}^3 x_j \Delta T_j \quad (20)$$

여기서  $x_j$  및  $y_j$ 는 각각 액체와 증기에서 j 성분(각각의 냉매)의 몰분율이다.

따라서 Thome의 모델<sup>(7)</sup>을 이용하면 Fig. 11에서와 같은  $k_b$ 값을 구할 수 있다.

### 2. 강제대류증발 열전달 저하계수( $k_f$ )

2성분 및 3성분 혼합냉매의 관내 흐름에서 유동양식이 환상류일 때 강제대류증발에 대한 모델을 나타내면 Fig. 9와 같다.

Fig. 9를 이용하면 본 논문의 방정식 (12)를 나타낼 수 있다. 방정식(12)에서  $\frac{dT_{Lb}}{dz} = \frac{dT_{Gb}}{dz}$ 로 하고, 방정식 (13)의  $x_{evl}$ 를 아래의 방정식(21)과 같이 정리하여<sup>(14)</sup> 미지수에 대한 방정식을 만들어 풀면  $T_i$ 를 구할 수 있다.

$$x_{evl} = x_{il} + \frac{y_{il} - x_{il}}{\frac{x_{o1} - x_{il}}{y_{il} - x_{o1}} \left( \frac{\partial T}{\partial x_{il}} \right) \left( \frac{\partial y_{il}}{\partial T} \right) + 1} \quad (21)$$



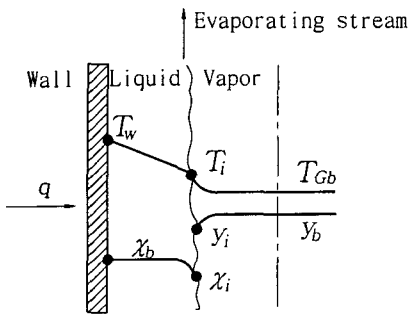


Fig. 9 Physical model of a multicomponent fluid evaporation in annular flow.

여기서  $\partial T / \partial x_n$  및  $\partial T / \partial y_n$ 는 각각 비점 온도선과 노점온도선의 기울기이다.

또한 방정식(13)에서 물질전달계수  $\alpha_{mG1}$ 는 다음의 방정식으로 구할 수 있다.

$$\alpha_{mG1} = 0.023 \frac{D_{G1}}{d} \left( \frac{GX_d}{\mu_c} \right)^{0.8} S_{CG1}^{0.4} F_{mG} \quad (22)$$

단,  $S_{CG1}$ 는 schmidt수이고  $F_{mG}$ 는 물질전달에서 2상 증가를 나타내는(multiplier) 것으로서 다음의 식 (23)과 같다.

$$F_{mG} = (1 + 1.22X_H^{-0.20})^2 \quad (23)$$

그리고 물질전달 영향에 의해 물질농도가 Fig. 9와 같이 달라지므로, 이것이 기액계면 온도상승의 원인이 되고 있다. 따라서 물질 전달계수는 기액계면 온도를 이용하므로써 구할 수 있다. Fig. 10과 같이 2성분 혼합냉매 R-32/134a에 대한 전도변화와  $T_i$ 의 관계를 나타내면 물질전달 저항은 기상이 지배적임을 알 수 있다. 이것은 Shock의 연구(Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp. 411~433)와도 일치하는 것으로서, 3성분 혼합냉매도 기상의 물질전달만 고려하여 열전달계수를 구할 수 있음을 의미한다.

이상과 같은 방정식 및 관계를 이용하여  $k_f$ 를 구하면 Fig. 11에 나타낸 바와 같다. Fig. 11

에서 강제대류증발 열전달의 저하율은 5% 이하이며, 만약  $F_{mG}=1$  라고 한다면 그 저하율은 20% 정도가 된다.

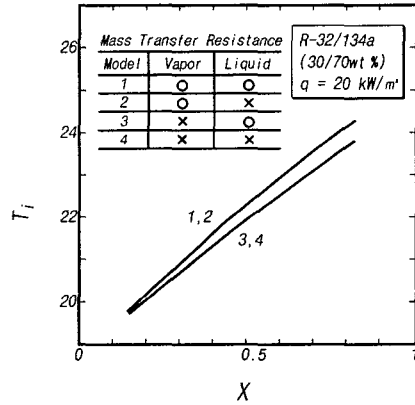


Fig. 10 Effect of the resistance to mass transfer in the liquid and vapor phases on the interface temperature for R-32/134a mixture.

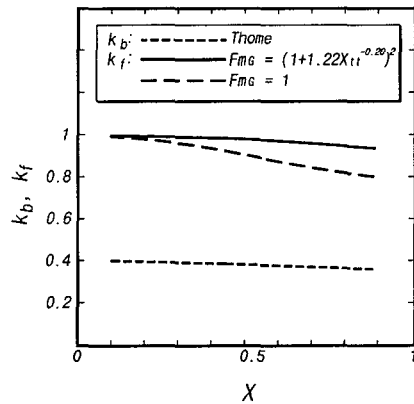


Fig. 11 Correction factors of heat transfer coefficients in the nucleate boiling and in the forced convective vaporization for R-32/125/134a mixture,  $G=310$  kg/m's, and  $q=20$  kW/m².