

<논 문>

## 혼합냉매의 환상 유동 증발열전달 해석

신지영\* · 김민수\*\* · 노승탁\*\*

(1995년 10월 10일 접수)

### Analysis of Convective Boiling Heat Transfer for Refrigerant Mixtures in Annular Horizontal Flow

Jee Young Shin, Min Soo Kim and Sung Tack Ro

**Key Words** : Flow Boiling(유동비등), Annular Flow(환상 유동), Nonazeotropic Refrigerant Mixture(변온증발 혼합냉매), Mass Transfer Resistance(물질 전달 저항)

#### Abstract

An analysis of convective boiling heat transfer for refrigerant mixtures is performed for an annular flow to investigate the degradation of the heat transfer rate. Annular flow is selected in this study because a great portion of the evaporator in the refrigeration and air conditioning system is known to be in the annular flow regime. Mass transfer effect due to composition difference between liquid and vapor is included in this analysis, which is considered to be one of driving forces for the mass transfer at the interface. Due to the concentration gradient at the interface the mass transfer is interfered, so is the evaporative heat transfer at the interface. The mass transfer resistance makes the interface temperature slightly higher and, as a result, the heat transfer coefficients decrease compared with those without mass transfer effects. The degradation of the heat transfer rate reaches its maximum at a certain composition. The composition difference between vapor core and vapor at the interface has a direct effect on the temperature difference between the vapor core and the interface and the degradation of the heat transfer rate. Correction factor  $C_F$  for the mixture effects is added to the correlation for pure substances and the flow boiling heat transfer coefficients can be calculated using the modified equation.

#### 기 호 설 명

$A$  : 식 (11)에 정의된 상수  
 $C_F$  : 보정계수  
 $D$  : 물질확산계수 [ $m^2/s$ ]  
 $d$  : 직경 [m]  
 $h$  : 열전달계수 [ $W/m^2K$ ]  
 $h_m$  : 물질전달계수 [m/s]  
 $i$  : 엔탈피 [kJ/kg]  
 $J$  : 농도차에 의한 물질전달유속 [ $kg/m^2s$ ]

$k$  : 열전도율 [ $W/mK$ ]  
 $M, m$  : 질량유량 [ $kg/s$ ]  
 $m''$  : 질량유속 [ $kg/m^2s$ ]  
 $n$  : 식 (11)에 정의된 상수  
 $Pr$  : 프란틀 수 ( $Pr = \mu c_p / k$ )  
 $P_r$  : 환산압력  
 $Q$  : 열량 [kW]  
 $r$  : 반경방향좌표  
 $Re$  : 레이놀즈 수 ( $Re = m'' d / \mu$ )  
 $x$  : 건도  
 $T$  : 온도 [ $^{\circ}C, K$ ]

\*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 서울대학교 기계공학과

$X$  : 저온증발매체 액상성분비  
 $Y$  : 저온증발매체 기상성분비

그리스문자

$\delta_i$  : 액막의 두께 [m]  
 $\mu$  : 점도 [kg/ms]  
 $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

하첨자

$b$  : 액상 평균  
 $conv$  : 대류비등항  
 $i$  : 계면  
 $in$  : 입구  
 $l$  : 액상  
 $out$  : 출구  
 $v$  : 기상  
 $w$  : 벽  
 $wi$  : 내벽면

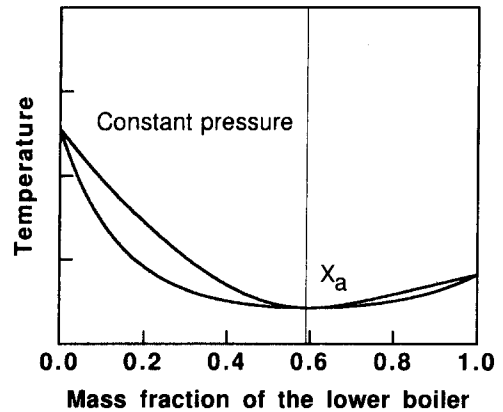
1. 서 론

20세기 후반에 들어서면서 환경문제는 인류에게 있어 다른 모든 문제에 우선하는 중요한 관심사가 되었다. 안정된 화학적 성질과 우수한 열역학적 성질로 인하여 냉동 및 공조 산업 분야에서 널리 사용되어온 CFC(chlorofluorocarbon) 계열의 냉매 및 HCFC(hydrochlorofluorocarbon) 계열의 냉매가 대기중으로 방출되면 오존층 파괴와 지구 온난화를 유발하는 것으로 밝혀졌고, 이로 인한 환경 파괴를 방지하기 위하여 CFC 및 HCFC 계열 냉매의 생산과 사용을 규제하게 되었다.<sup>(1,2)</sup> 따라서, CFC 및 HCFC 계열의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 물질들의 개발과 이러한 대체냉매들을 사용하는 시스템에 관한 연구가 필요하다. 대체냉매는 지구환경을 파괴시키는 성분을 포함하고 있지 않아야 함은 물론이고, 기존에 사용하던 냉매와 열역학적 물성치들이 유사한 것이 바람직하다. 특히 순수냉매 이면서 열역학적 물성치와 성능, 효율, 안전성 등의 모든 조건을 만족하는 물질이 없는 경우, 두 가지 혹은 그 이상의 냉매를 혼합하여 비슷한 성능 및 효율을 얻을 수 있는 방안을 검토하고 있다.<sup>(3,4)</sup>

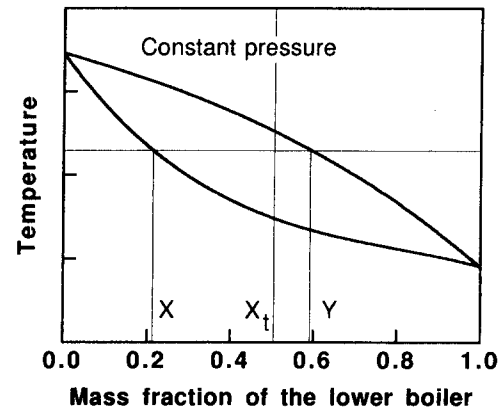
한편, 혼합냉매는 환경문제가 부각되기 이전부터 성분비를 바꿈으로써 용량을 조절할 수 있을 뿐 아니라 성능계수가 향상될 수 있다는 이점 때문에 이

미 많은 연구가 진행되었다.<sup>(5-7)</sup> 반면에 변온증발 혼합냉매의 열전달계수가 각 순수냉매의 열전달계수를 성분비에 따라 선형보간한 값보다 작다는 것이 많은 연구결과에 의해 알려져 있다. 이는 변온증발 혼합냉매의 증발시에 나타나는 성분비의 변화에 기인하며, 이로 인해 존재하게 되는 물성치의 비선형 효과 및 물질전달의 영향도 연구되고 있다.<sup>(8,9)</sup>

혼합냉매는 크게 등온증발, 변온증발 혼합냉매 두 종류로 나눌 수 있다. 그 차이는 Fig. 1에 나타난 기액평형선도를 보면 쉽게 알 수 있으며, 그림에서와 같이 등온증발 혼합냉매(azeotropic refrigerant mixture)는 특정한 성분비에서 순수냉매와 마찬가지로 등압상 변화과정중에 증발온도가 변화하지 않는다. 반면에 변온증발 혼합냉매(non-



(a) Azeotropic refrigerant mixture



(b) Nonazeotropic refrigerant mixture

Fig. 1 Vapor-liquid equilibrium diagram of refrigerant mixtures

azeotropic refrigerant mixture)는 등압증발 과정 시에도 온도가 증가하며, 증발과정중에 액상과 기상의 성분비가 계속 변하는 것이 순수냉매와는 다른 또 하나의 특징이다.

특히 변온증발 혼합냉매의 열전달계수 B는 Fig. 2에 개략적으로 보인 바와 같이 성분비의 변화에 따라 동일한 조건에서 순수냉매의 열전달계수를 선형보간한 값 A보다 작게 나타난다. 이는 실제 열전달계수가 감소하였다는 뜻이 아니고, 각 순수물질의 열전달계수의 가상적인 선형보간값 A보다 낮다는 뜻이다. 변온증발 혼합냉매의 등압증발과정에서 액상과 기상의 성분비가 증발 이전의 총성분비와는 다른 값을 가지며, 계속 변화하는 현상 때문에 액상과 기상의 경계면에서 농도구배에 따른 물질유속이 존재한다. 많은 연구자들은 이러한 물질유속을 계면에서의 열전달을 방해하는 물질전달저항으로 판단하고 있으며, 혼합냉매의 열전달계수가 선형보간값 A보다 작게 나타나는 주된 원인 중의 하나로 생각한다.

환경문제를 유발하지 않을뿐 아니라 시스템의 효율도 향상시켜야 하는 이중의 목적을 달성하기 위한 방법으로 혼합냉매의 사용 가능성이 현실화되고 있는 시점에서 그 열전달특성을 예측하기 위한 방법의 확립이 필요하다. 많은 연구자들은 실험 또는 해석을 통해 혼합냉매의 열전달특성을 파악하고 있다. 증발 열전달 과정의 이론적인 해석이 많이 이루어지고 있지만, 아직 순수 물질에 대해서도 확립

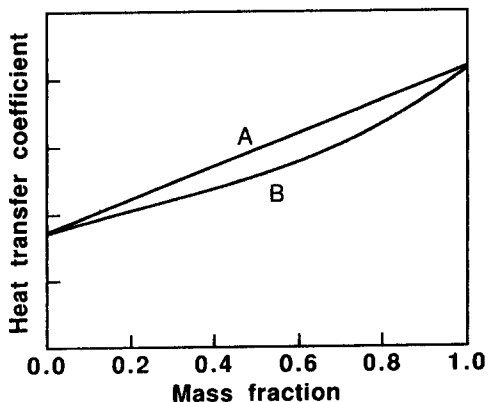


Fig. 2 Degradation of the heat transfer coefficient (line A represents linearly interpolated heat transfer coefficient of pure refrigerants; line B indicates typical variation of heat transfer coefficients of nonazeotropic refrigerant mixtures)

된 이론이 없고, 혼합물질에 대한 연구는 여러 가지 해석 방법이 시도되고 있는 실정이다.<sup>(10~12)</sup> 해석적인 방법으로는 실제 현상을 유동형태별로 현상을 간단하게 모델링하고 몇 가지 가정을 도입하여 각 유동형태별로 그 특성을 고찰하는 것이 주류가 되어왔다. 이러한 해석방법으로도 2상유동 열전달 과정의 본질적인 문제를 완벽하게 해결하지 못하였기 때문에, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 예측하기 위해서 물질전달 저항에 관련된 항을 기존의 순수 물질에 대한 열전달 상관식에 도입하고, 실험 자료와 비교하여 선형회귀 분석을 통해 실험 자료를 잘 예측할 수 있는 계수들을 도입하고 있다.<sup>(13,14)</sup> 그러나 그 계수들의 형태가 매우 복잡하거나 실험 자료와의 비교를 필요로 하기 때문에 다른 유체에 적용할 경우 상관식의 사용에 제한이 따른다.

혼합물질에 대한 연구도 실험과 해석을 통해 진행되어 왔다. 많은 연구자들은 혼합냉매의 열전달계수를 예측하는 방법을 제시하는데 있어 주로 증발시 액상과 기상의 성분비 차이로 인한 물질전달 현상을 보정항으로 고려한다. 그러나, 이 보정항에는 역시 실험자료와 관련된 상수가 포함되어 있기 때문에 작동유체, 작동조건이 다를 경우 그 사용이 쉽지 않다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 변온증발 혼합냉매의 증발 열전달계수가 성분비에 따른 선형보간값보다 낮게 나타나는 원인을 정성적으로 고찰하고자 한다. 이를 위하여 수평원관내 유동 증발 현상을 실제 냉동 및 공조 기기의 증발기에서 대부분을 차지하는 환상 유동 형태로 모델링하고, 순수냉매에서는 나타나지 않는 기상과 액상간의 성분비 차이로 인한 물질전달 현상이 전체적인 증발 열전달 과정에 미치는 영향을 고려한 해석을 수행하고자 한다. 또한 이러한 물질전달 현상에 대해 정성적으로 고찰하고, 전체 성분비의 변화에 따른 물질전달 현상의 변화 및 경향을 잘 설명할 수 있는 인자를 제시하고자 한다. 해석으로부터 도입한 인자를 이용하여 기존의 상관식을 변온증발 혼합냉매의 열전달 특성을 반영할 수 있도록 변형하고 열전달계수를 계산하고자 한다.

## 2. 변온증발 혼합냉매의 환상 유동 열전달 해석

냉동기의 증발기에서는 저압의 2상영역의 냉매가

외부로부터 열을 흡수하여 저압의 기상으로 변한다. 압축기의 보호를 위해 증발기 후반 혹은 이후에서 과열되는 영역을 제외하면, 냉매는 넓은 영역에 걸쳐 2상 영역에서 증발이 진행된다. 따라서 증발기에서 냉매는 대부분의 영역에서 액상과 기상이 공존하는 2상 상태로 주위와 열교환을 한다. 이러한 냉매의 2상유동 열전달특성에 대한 연구는 단지 냉매에 국한되는 것이 아니라 일반적인 유체의 2상유동 해석으로부터 비롯된다. 원관내 2상유동 증발과정은 여러가지 복잡한 유동형태를 띠며, 열유속, 질량유속, 원관의 기울기 등에 따라서도 그 특성이 매우 다르게 나타난다. 실제 냉동기나 열펌프의 증발기에서는 건도가 0.1~0.2 부근에서부터 증발과정이 시작되어 대부분이 환상 유동형태로 증발이 일어난다는 것이 알려져 있다.<sup>(15)</sup>

환상 유동이란 액체가 관벽을 따라서 액막의 형태로 흐르고, 기체는 관 중심부분을 따라서 흐르는 유동을 말한다. 이 유동은 압력구배, 부력, 표면장력, 기상 및 액상의 관성력, 기상 및 액상의 점도 등에 의해 결정되며, 기체의 흐름이 클 때 나타나는 것이 보통이고, 유속이 느린 액막과의 큰 상대속도에 의해서 액막의 형태가 파형을 이루거나 액막으로부터 액체가 작은 액적들의 형태로 떨어져 나와 기체유동에 유입(entrainment)되는 경우가 많다.<sup>(16)</sup> 이 때 수평유동의 경우 중력에 의해 원주방향으로 액막이 균일하게 유지되는 것은 아니며, 관 하부에서는 좀 더 두꺼운 액막을 형성하지만, 기체의 유속이 어느 정도 빨라지면 액상과 기상의 계면에서 횡방향 점성력이 작용하고, 이로 인한 2차 유동이 액막을 더욱 균일하게 하는 효과를 가진다.<sup>(17)</sup> 환상 유동을 해석하기 위한 연구가 계속되고 있지만 아직도 기포 생성 및 성장, 액상 및 기상의 계면에서의 현상, 기상내의 액적의 존재로 인한 영향 등을 완전히 고려하지 못한 채 여러가지 해석방법이 시도되고 있다.<sup>(18,19)</sup>

2.1 해석모델

본 연구에 사용된 해석모델은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 액체가 관벽을 따라서 액막의 형태로 흐르고, 기체는 관 중심부분을 따라서 흐르는 형태의 환상 유동이다. 벽면에서 일정한 열유속이 공급되는 것으로 가정하였고, 저건도 지역에서 핵비 등의 영향은 고려하지 않았다. 실제 수평관에서의 환상 유동 형태는 중력으로 인해 하부의 액막이 상부의

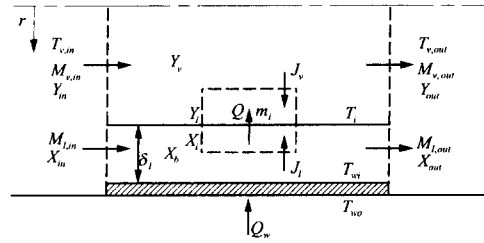


Fig. 3 Control volume for the annular flow analysis in this study

액막에 비해 상대적으로 두꺼울 것이다. 그러나, 증발이 조금만 진행되어도 기체의 유속이 아주 빨라져서 관성력에 의한 영향이 중력에 의한 영향보다 크게 되므로, 해석에서는 중력의 영향은 무시하고 원주방향으로 액막의 두께는 일정한 것으로 가정하였다. 실제 환상 유동에서는 액상에서 기상으로의 액적 유입(entrainment), 반대로 기상에서 액상으로의 액적 정착(deposition)도 존재하나 해석의 편의를 위하여 이는 고려하지 않았다. 그림에서 X, Y는 각각 저온증발냉매(more volatile component)의 액상, 기상 성분비, T는 온도, M은 질량유량, J는 물질전달량, Q는 열량을 나타낸다. 하첨자 l, v는 각각 액상, 기상을 의미하며, i는 계면, b는 액상 평균, wi는 내벽면을 뜻한다.

한편, 변온증발혼합냉매는 전술한 바와 같이 증발시 액상과 기상의 성분비가 변화하며, 이로 인해 액상과 기상에서 농도차에 의한 물질전달이 존재한다. Fig. 4에 계면에서의 물질전달량들과 저온증발매체의 반경방향 농도분포의 개략적인 형태를 나타내었다. 액상에서는 계면에서 저온증발냉매가 고온증발냉매에 비해 상대적으로 잘 증발하기 때문에 계면에서의 농도가 액상 평균에 비해 작다. 따라서 액상에서 계면으로 향하는 물질전달  $J_l$ 이 존재한다. 기상에서는 이미 저온증발냉매가 많이 있었기 때문에 액상과는 반대로 계면에서의 농도가 기상 평균에 비해 작고 따라서 기상에서 계면으로 향하는 물질전달량  $J_v$ 가 존재하며 그 방향은 열전달의 진행방향과 반대이다.

2.2 관계식

Fig. 3에 나타난 검사체적을 바탕으로 해석에 필요한 지배방정식을 나타내면 다음과 같다. 식 (1)에 계면에서 저온증발매체의 질량 보존식을 나타내었다.

$$-m_i'' X_i - J_i = -m_i'' Y_i + J_v \quad (1)$$

$m_i''$ 는 계면에서의 증발량,  $X_i$ ,  $Y_i$ 는 각각 계면에 인접한 지역에서의 액상과 기상 성분비를 뜻한다. 좌변에서 농도차에 의한 액상에서의 물질전달량  $J_i$ 은 기상에서의 물질전달량  $J_v$ 에 비해 아주 작은 값이다. 따라서, 주어진 총성분비에서 증발이 진행되는 동안 기상 성분비보다 크다는 것으로부터 유추하여 볼 때, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 기상에서 계면으로의 물질전달이 존재하여야 계면에서 저온증발매체의 질량보존이 성립함을 확인할 수 있다.

한편, 물질전달유속  $J_i$ ,  $J_v$ 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.  $J_i$ 은 액막의 두께가 반경에 비해 아주 작기 때문에 식 (2a)와 같이 액막내에서 저온증발매체의 성분비가 선형적으로 변화하는 것으로 생각하였다.  $J_v$ 는 기상에서의 물질전달계수  $h_m$ 을 도입하여 식 (2b)와 같이 정의하였다.  $D_i$ ,  $D_v$ 는 각각 액체, 기체의 물질확산계수이며, 액체의 물질확산계수는 Tyn-Calus<sup>(20)</sup>의 식을 사용하였다.  $h_m$ 은 Chilton-Colburn analogy<sup>(21)</sup>를 이용하여 계산할 수 있고, 이때 필요한 기체의 물질확산계수는 Fuller et al.<sup>(20)</sup>의 식을 사용하였다. 냉매의 열역학적 물성치는 김민수 등<sup>(22)</sup>이 제시한 수정된 Carnahan-Starling 상태방정식을 이용하여 계산하였다.

$$J_i = -D_i \rho_l \left( \frac{dX}{dr} \right)_i \approx -D_i \rho_l \frac{X_b - X_i}{\delta_i} \quad (2a)$$

$$J_v = -D_v \rho_v \left( \frac{dY}{dr} \right)_i \approx -\rho_v h_m (Y_i - Y_v) \quad (2b)$$

계면에서 증발되는 질량유량은 식 (1)을 정리하여 다음과 같이 구할 수 있다. 여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $A$ 는 면적,  $\delta_i$ 은 액막의 두께를 뜻한다. 건도가 주어지면 기공률(void fraction)을 계산할 수 있고 기공률로부터 액막의 두께와 면적을 계산한다.

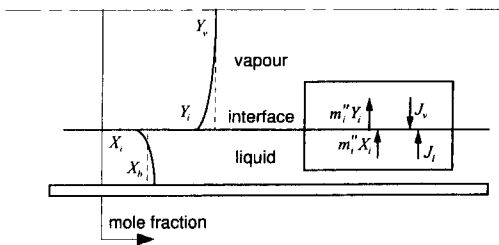


Fig. 4 Representation of the concentration gradient of the nonazeotropic refrigerant mixture in the annular flow boiling process

$$m_i = \left[ -\rho_v h_m \frac{Y_i - Y_v}{Y_i - X_i} - \frac{D_i \rho_l}{\delta_i} \frac{X_b - X_i}{Y_i - X_i} \right] A_i \quad (3)$$

이 밖에 기상과 액상에 대한 질량보존식을 식 (4), (5)에 나타내었다.

$$M_{v,in} + m_i = M_{v,out} \quad (4)$$

$$M_{l,in} - m_i = M_{l,out} \quad (5)$$

기상과 액상의 에너지보존식은 식 (6), (7)에 나타내었다.

$$M_{v,in} i_{v,in} + Q = M_{v,out} i_{v,out} \quad (6)$$

$$M_{l,in} i_{l,in} + Q_w = Q + M_{l,out} i_{l,out} \quad (7)$$

액막에서의 열전달 관계식은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_w = h_i [T_{wi} - T_i] A_{wi} \quad (8)$$

열전달계수는 벽면온도와 기상의 온도차를 이용하여 식 (9)로 정의하였다.

$$h = q'' / (T_{wi} - T_v) \quad (9)$$

변온증발 혼합냉매의 경우 건도와 작동압력이 주어지면 기상 온도를 상태방정식으로부터 계산할 수 있다. 벽면온도와 계면온도를 가정하고, 반복계산을 통해 물질전달보존식, 식 (1)을 만족하는 온도를 주어진 건도, 압력으로부터 구할 수 있다. 즉, 질량보존식과 에너지보존식에서 구해지는 증발량과 계면에서 저온증발매체의 질량보존식 (3)에 의해 구해지는 증발량이 같아지는 계면온도  $T_i$ 를 반복 계산에 의해 구한다.

### 3. 환상 유동 열전달 해석 결과

#### 3.1 건도의 변화에 따른 열전달 특성 변화

Fig. 5에 건도의 변화에 따른 기상, 계면, 벽면의 온도를 나타내었다. 해석은 R32/R134a, R290/R600a에 대해 질량유속과 작동압력을 변화시키면서 수행하였는데 대표적으로 R32/R134a (50/50 질량비)에 대해 환산압력 0.15, 질량유속 583 kg/m<sup>2</sup>s 인 경우에 대하여 고찰하고자 한다. 변온증발 혼합냉매이므로 건도의 증가에 따라 기상의 온도가 증가하며, 계면의 온도는 물질전달의 영향으로 기상의 온도보다 약간 높게 나타난다. 건도가 높아지면서 열전달이 활발하게 일어나기 때문에 벽면과 기상의 온도 차이가 줄어드는 것을 알 수 있으며, 기

상에서 계면으로 저온증발매체의 물질전달이 존재하기 위해서는 계면과 기상의 온도차가 존재하는 것을 고찰할 수 있다.

열전달계수의 변화를 Fig. 6에 보였다. A, B는 Chen<sup>(23)</sup>의 열전달 상관식의 대류증발항만을 고려하여 계산한 것이다. 물성치 계산에 필요한 성분비로서 A는 총성분비를 B는 액상, 기상 각각의 성분비를 이용하였다. C는 식 (9)에 나타낸 바와 같이 기상온도와 벽면온도의 차이로 정의한 열전달계수이다. A와 B의 차이는 변온증발 혼합냉매의 성분비가 증발시 변화하는 특성이 물성치 변화에 영향을 미치고, 이 영향이 열전달계수에 반영된 결과이다. C는 물성치 변화에 의한 영향뿐 아니라 기상과 계면 간의 농도차에 의한 물질전달이 고려된

것으로서, 각 순수냉매의 열전달계수를 선형보간한 값으로는 혼합냉매의 열전달계수를 예측할 수 없다는 결과를 보여준다.

계면에서의 농도차에 의한 물질전달유속  $J_v, J_l$ 을 Fig. 7에 보였다. 증발이 진행되면서 두 값 모두 그 양이 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 절대적인 크기를 비교하면 액상에서의 물질전달량은 기체에서의 그것에 비해 아주 작은 값을 가지는데, 이는 액체의 물질확산계수가 기체에 비해 아주 작기 때문이다. 여기서, 기상에서의 물질전달유속  $J_v$ 는 전술한 바와 같이 그 방향이 계면에서 기상으로의 열전달, 즉 증발의 방향과 반대이다. 따라서, 이것을 변온증발 혼합냉매의 열전달을 저해하는 물질전달 저항으로 생각할 수 있다.

계면에서의 물질전달은 계면온도와 기상온도와의 차이에 직접 영향을 미친다. 온도차( $T_i - T_v$ )는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 증발이 진행되면서 약

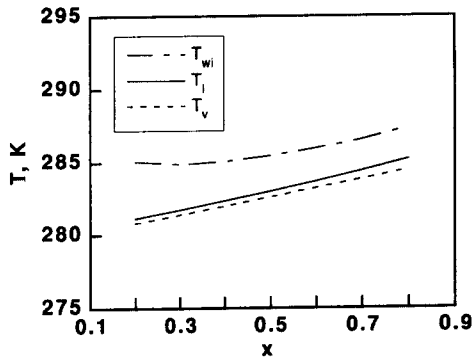
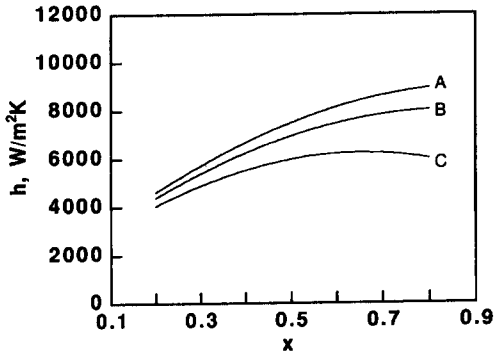


Fig. 5 Temperature of the inner wall, interface and vapor phase with respect to quality



- A: Predicted by Chen's eq.<sup>(23)</sup> with overall composition
- B: Predicted by Chen's eq.<sup>(23)</sup> with liquid and vapor compositions
- C: Prediction in this study with the eq.(9)

Fig. 6 Heat transfer coefficient with respect to quality

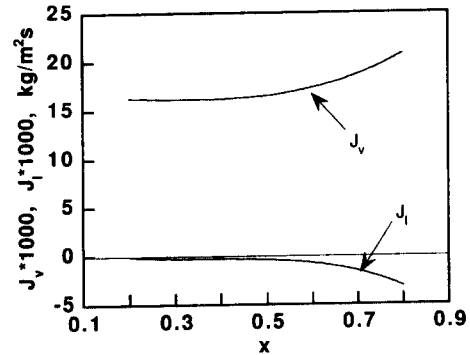


Fig. 7 Mass flux due to concentration gradient at the interface with respect to quality

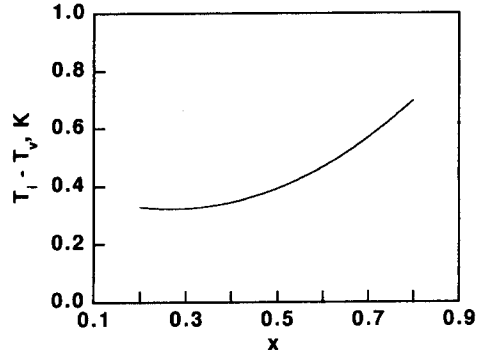


Fig. 8 Temperature difference between vapor phase and interface with respect to quality

간 커지는데 이를 설명하기 위하여 Fig. 9에 계면과 기상의 성분비 차이  $|Y_i - Y_b|$ 와, 기상에서의 물질전달계수  $h_m$ 을 나타내었다. 건도가 커지면 기상의 레이놀즈 수가 커지면서 기상과 계면에서 작용하는 마찰계수는 작아지고 결국 기상의 열전달계수는 작아진다. 이러한 이유로 기상의 열전달계수로 부터 Chilton-Colburn analogy를 이용해 얻어지는 물질전달계수는 작아지게 된다. 한편, 열유속을 일정하게 유지하면, 단위길이당 증발량은 길이에 따라 변화가 크지 않다. 계면에서의 증발량은 식 (3)에서 두번째 항, 즉 액상에서의 물질전달량이 첫번째 항으로 표시된 기상에서의 물질전달량에 비해 아주 작게 나타나는 것을 고려할 때 결국 물질전달

계수와 성분비 차이  $|Y_i - Y_b|$ 의 곱으로 표현할 수 있으며, 이 증발량을 일정하게 유지하기 위해서는 성분비 차이가 커져야만 물질전달계수의 감소를 보상할 수 있다는 것을 고찰할 수 있다.

3.2 성분비 변화가 열전달에 미치는 영향

성분비에 따른 변수들의 변화를 살펴보는 것이 변온증발 혼합냉매의 증발과정에서 나타나는 농도차에 의한 물질전달과 이로 인한 열전달계수의 감소를 정성적으로 고찰하는데 필요하다. 대표적으로 R32/R134a에 대해 환산압력 0.15, 질량유속 583 kg/m<sup>2</sup>s, 건도 0.5인 경우에 대해 고찰하였다. 성분비가 바뀔 때 따라 열전달계수가 어떻게 변화하는지를 Fig. 10에 나타내었다. Chen의 상관식<sup>(23)</sup>에 총성분비를 사용한 A는 성분비에 따라 거의 선형적으로 나타나며, 증발의 진행에 따른 액상, 기상 각각의 성분비를 사용한 B는 A에 비해 약간 작은 값을 가진다. 이는, 전술한 바와 같이 성분비 차이에 따른 물성치의 변화에 의한 것으로 생각된다. 한편, 계면과 기상의 온도차로 인해 열전달계수 C는 B보다 더 감소하며 성분비 변화로 인한 물성치의 변화만을 고려하면 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 정확히 예측할 수 없다는 결과를 보여준다.

기상에서 계면으로의 농도차와 이에 의한 물질유속을 Fig. 11에 나타내었다. 물질 유속은 식 (2b)와 같이 밀도, 물질전달계수, 농도차의 곱으로 표시되며, 농도차에 비례하는 것을 그림에서 확인할 수 있다. 계면에서의 물질전달량을 유지하기 위해서는 계면과 기상의 온도차가 존재하여야 한다. 한편, 이 온도차의 변화는 변온증발 혼합냉매의 액상

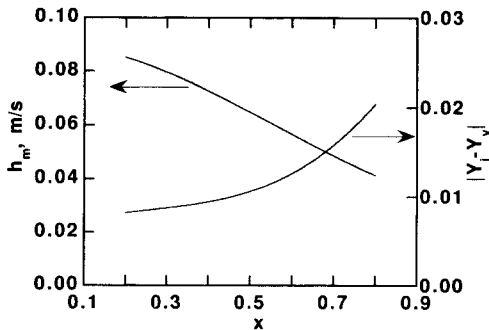
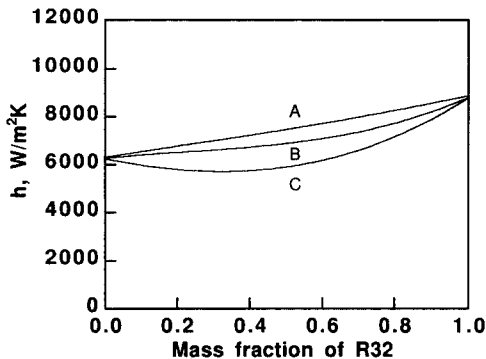


Fig. 9 Mass transfer coefficient of the vapor phase and composition difference between vapor core and vapor at the interface with respect to quality



- A: Predicted by Chen's eq.<sup>(23)</sup> with overall composition
- B: Predicted by Chen's eq.<sup>(23)</sup> with liquid and vapor compositions
- C: Prediction in this study with the eq.(9)

Fig. 10 Heat transfer coefficient with respect to composition

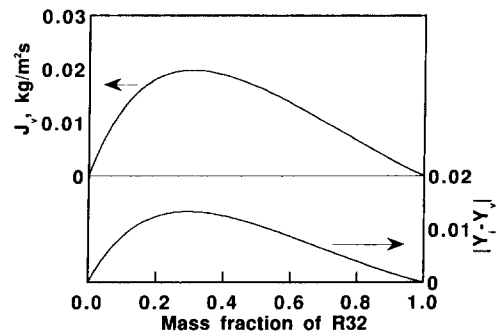


Fig. 11 Composition difference between vapor core and vapor at the interface and mass flux due to concentration gradient at the interface with respect to composition

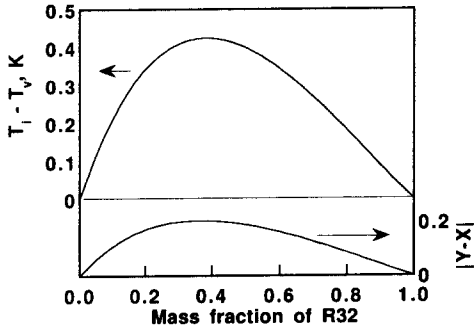


Fig. 12 Temperature difference between vapor core and interface and composition difference between liquid and vapor phase with respect to composition

과 기상의 성분비 차이의 변화 형태와 정성적으로 유사하며, 이를 Fig. 12에서 고찰할 수 있다.  $J_v$ 는 성분비의 변화에 따라 포물선 형태의 변화를 보이며 계면온도와 기상온도의 차이 ( $T_i - T_v$ ), 계면과 기상의 농도 차이  $|Y_i - Y_v|$ 도 같은 형태의 변화를 보인다. 결국 이러한 현상들은 증발시 혼합냉매의 액상과 기상의 성분비가 변화하는데 기인하며, 이는 Fig. 11, Fig. 12에 나타낸 바와 같이 액상과 기상의 성분비 차이  $|Y - X|$ 의 변화 경향이 계면과 기상의 농도 차이  $|Y_i - Y_v|$ , 물질전달유속  $J_v$ , 이

Table 1 The coefficients A and n in Eq. (11)

Coefficients	A	n
R32/R134a	0.569	0.860
R290/R600a	0.533	0.828
R22/R142b	0.544	0.880
R22/R114	0.794	0.891

로 인한 계면과 기상의 온도차와 함수 형태가 비슷하게 나타나는 것을 고찰하여 유추할 수 있다. 이는 변온증발 혼합냉매의 증발열전달 계수의 감소폭을 예측할 수 있는 인자로서 간단하면서도, 물리적 현상을 잘 반영할 수 있는 인자로서  $|Y - X|$ 를 택할 수 있는 이론적 배경을 제공하는 결과이다.

### 3.3 변온증발 혼합냉매의 열전달계수 예측

변온증발 혼합냉매의 열전달계수 감소는 계면과 기상의 온도차로 인해 생기는 것이므로 식 (10)과 같이 표현할 수 있다. 즉, 계면과 기상의 온도차가 존재하지 않을 경우 계면온도와 기상온도는 같게 되고 물질전달저항에 의한 열전달의 감소는 발생하지 않게 된다. 계면과 기상 간의 농도차에 의한 물질전달로 인해 온도차가 존재하는 경우 열전달계수는 감소하며 이를 나타내는 수정인자  $C_F$ 를 식

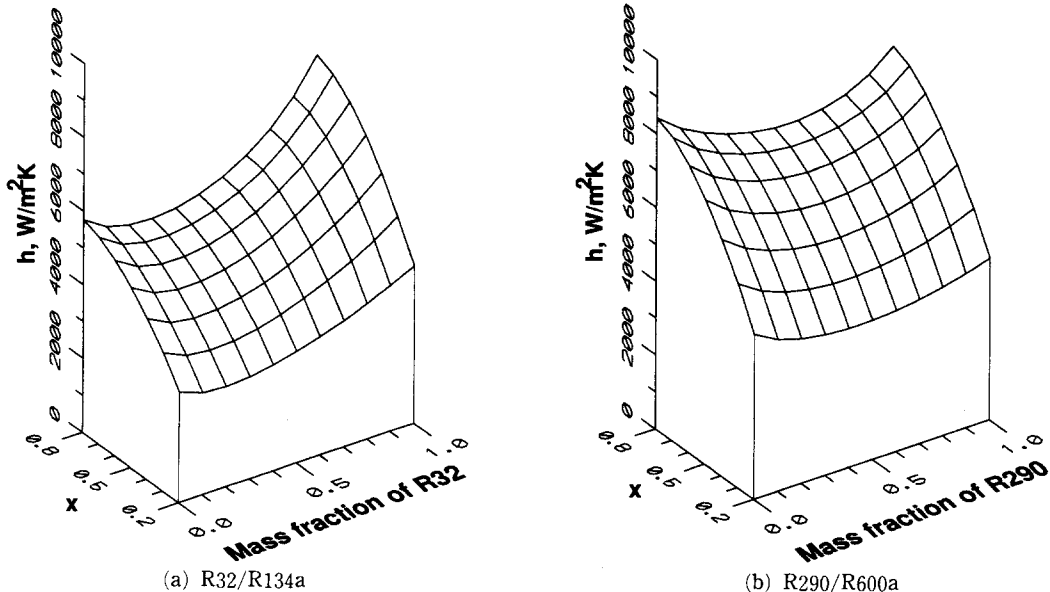


Fig. 13 Heat transfer coefficients with respect to quality and mass fraction of the more volatile component for  $m'' = 424 \text{ kg/m}^2\text{s}$  and  $P_r = 0.15$



(10)과 같이 정의하였다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T + \Delta T_i} = 1 - C_F \quad (10a)$$

$$\Delta T = T_w - T_i \quad (10b)$$

$$\Delta T_i = T_i - T_v \quad (10c)$$

$C_F$ 는 열전달계수의 감소비율을 나타내는 인자이

며 액상과 기상의 성분비 차,  $|Y-X|$ 를 도입하여 식 (11)과 같은 형태로 곡선 맞춤하여 표현할 수 있다. 본 연구에서는 R32/R134a, R290/R600a, R22/R142b, R22/R114에 대해 계산하였고, 식 (11)의 형태로 곡선 맞춤한 계수  $A$ 와 지수  $n$ 을 Table 1에 나타내었다.

$$C_F = f(|Y-X|) = A|Y-X|^n \quad (11)$$

$A$ ,  $n$ 이 주어지면 변온증발 혼합냉매의 열전달계수의 감소폭을 예측할 수 있다. 즉, 식 (12)에 주어진 바와 같이 순수물질에 적용하였던 Chen의 상관식의  $F$ 인자를 혼합 효과를 고려하여 식 (12b)와 같이 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 계산할 수 있다.

$$h = F_m \cdot h_{conv} \quad (12a)$$

$$F_m = (1 - C_F) \cdot F \quad (12b)$$

$$h_{conv} = 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.4} \frac{k_i}{d} \quad (12c)$$

$$Re_i = \frac{m''(1-x)d}{\mu_i} \quad (12d)$$

Fig. 13에 질량유속  $424 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 환산압력  $0.15$ 인 조건에서 R32/R134a, R290/R600a의 열전달계수 계산 결과를 성분비와 건도의 변화에 대해 나타내었다. 두 냉매 모두 변온증발 혼합냉매로 성분비의 변화에 따른 열전달계수가 선형으로 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 변온증발 혼합냉매의 증발 열전달계수를 예측하기 위하여 수평원관내 유동 증발 현상을 실제 냉동기, 공조기의 증발기에서 대부분을 차지하는 환상 유동 형태로 모델링하고 물질전달 현상이 전체적인 증발 열전달 과정에 미치는 영향을 고려한 해석을 수행하였다.

계면에서 증발되는 양과 물질전달량 간의 균형을 만족하기 위해서는 계면과 기상과의 미소한 온도차

가 존재하여야 하며, 이 온도차를 계면에서의 물질전달을 유발하는 구동력으로 판단할 수 있다. 기상에서 계면으로의 농도차에 의한 물질전달유속은 물질확산계수의 차이로 인해 액상에서의 물질전달유속에 비해 월등히 크게 나타남을 알 수 있다.

본 해석 결과를 고찰하여 볼 때 성분비에 따른 계면과 기상의 온도차의 변화는 액상과 기상의 성분비 차이  $|Y-X|$ 의 변화 경향과 정성적으로 유사하다는 것을 알 수 있다. 이 온도차는 결국 물질전달에 의한 열전달계수의 감소와 직접적으로 연관이 있다. 따라서, 변온증발 혼합냉매의 증발열전달 계수의 감소폭을 예측할 수 있는 인자로서 간단하면서도, 물리적 현상을 잘 반영할 수 있는 인자로서  $|Y-X|$ 를 택할 수 있다. 이 해석을 바탕으로 앞으로의 연구에서 혼합냉매의 열전달계수 상관식에 물질전달 효과를 고려하기 위한 보정항으로서  $|Y-X|$ 를 고려할 수 있는 이론적 배경을 제시하였다.

변온증발 혼합냉매의 농도차에 의해 생기는 계면과 기상의 온도차를  $|Y-X|$ 의 함수로 표현하였으며, 이를 순수물질의 증발열전달 상관식에 보정항으로 고려함으로써 혼합냉매의 유동증발 열전달계수를 계산하였다.

#### 후 기

본 연구는 서울대학교 터보·동력기계연구센터의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) UNEP, 1987, Montreal Protocol on substances that Deplete the Ozone Layer.
- (2) UNEP, 1992, Copenhagen Decision, the Fourth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol.
- (3) Didion, D. and Bivens, D. B., 1990, "Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs," *Int. J. Refrig.* Vol. 13, May, pp. 163~175.
- (4) 장세동, 신지영, 노승탁, 1993, "R12 및 R22 대체냉매의 열역학적 물성치 및 냉동기의 성능비교," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제5권, 제1호, pp. 73~83.
- (5) Schwind, H. O. H., 1960, "Multiple Fluid Refrigerating System," *U. S. Patent* 2938362.

- (6) Mulroy, W., Kauffeld, M., McLinden, M. and Didion, D. A., 1988, "Experimental Evaluation of Two Refrigerant Mixtures in a Breadboard Air Conditioner," *Proc. DOE/ORNL Heat Pump Conference*, pp. 55~61.
- (7) Kim, T. S., Shin, J. Y., Chang, S. D., Kim, M. S. and Ro, S. T., 1993, "Cycle Performance and Heat Transfer Characteristics of a Heat Pump Using R22/R142b Refrigerant Mixtures," *Int. J. Refrig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 391~400.
- (8) Jung, D. S., McLinden, M., Radermacher, R. and Didion, D., 1989, "A Study of Flow Boiling Heat Transfer with Refrigerant Mixtures," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 9, pp. 1751~1764.
- (9) 신지영, 김동섭, 노승탁, 1993, "수평원관내에서 R22/R142b 혼합냉매의 증발과정 열전달에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제4호, pp. 971~979.
- (10) Shock, R. A. W., 1976, "Evaporation of Binary Mixtures in Upward Annular Flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 411~433.
- (11) 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.
- (12) Wadekar, V. V., 1994, "Convective Heat Transfer to Binary Mixtures in Annular Two-phase Flow," *Proc. 10th Int'l Heat Transfer Conf.*, Paper No. 18-FB-27, pp. 557~562.
- (13) Bennett, D. L. and Chen, J. C., 1980, "Forced Convective Boiling in Vertical Tubes for Saturated Pure Components and Binary Mixtures," *AIChE Journal*, Vol. 26, No. 3, 454~461.
- (14) Takamatsu, H., Miyara, A., Koyama, S. and Fujii, T., 1988, "Forced Convective Boiling of Nonazeotropic Refrigerant Mixtures of R22 and R114 inside Horizontal Tube," *Proc. The First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conf.*, Vol. 1, pp. 138~143.
- (15) Collier, J. G. and Thome, J. R., 1994, *Convective Boiling and Condensation*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- (16) Wallis, G. B., 1970, "Annular Two-phase Flow : Part 1 : A Simple Theory," *ASME Trans. J. Basic Engineering*, Vol. 95, pp. 59~72.
- (17) Carey, V. P., 1977, "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena, Hemisphere, Washington.
- (18) Hewitt, G. F., 1977, "Vertical annular flow," *Two-phase Flow and Heat Transfer*, ed. by Butterworth, D. and Hewitt, G. F., pp. 107~127, Oxford Univ. Press., London.
- (19) Whalley, P. B., Azzopardi, B. J., Hewitt, G. F. and Owen, R. G., 1982, "A Physical Model for Two-phase Flows with Thermodynamic and Hydrodynamic Nonequilibrium," *Proc. 7th Int'l Heat Transfer Conf.*, pp. 181~188.
- (20) Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Poling, B. E., 1987, *The Properties of Gases and Liquids*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, Chap. 11.
- (21) Hines, A. L. and Maddox, R. N., 1985, *Mass Transfer ; Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs., pp. 167~175.
- (22) 김민수, 김동섭, 노승탁, 1991, "수정된 Carnahan-Starling 상태방정식을 이용한 혼합냉매의 물성계산," 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 2189~2205.
- (23) Chen, J. C., 1966, "Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow," *I&EC Process Design and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 322~329.