

수평관에서 프로판, 이소부탄, HFC134a를 포함한 혼합냉매의 풀비등 열전달계수

박 기 정, 백 인 철, 정 동 수*

인하대학교 대학원, *인하대학교 기계공학과

Pool Boiling Heat Transfer Coefficients of Mixtures Containing Propane, Isobutane and HFC134a on a Plain Tube

Ki-Jung Park, In-Cheol Baek, Dongsoo Jung*

Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received May 25, 2006; revision received October 16, 2006)

ABSTRACT: Nucleate pool boiling heat transfer coefficients (HTCs) were measured with one nonazeotropic mixture of Propane/Isobutane and two azeotropic mixtures of HFC134a/Isobutane and Propane/HFC134a. All data were taken at the liquid pool temperature of 7°C on a horizontal plain tube with heat fluxes of 10 kW/m² to 80 kW/m² with an interval of 10 kW/m² in the decreasing order of heat flux. The measurements were made through electrical heating by a cartridge heater. The nonazeotropic mixture of Propane/Isobutane showed a reduction of HTCs as much as 41% from the ideal values. The azeotropic mixtures of HFC134a/Isobutane and Propane/HFC134a showed a reduction of HTCs as much as 44% from the ideal values at compositions other than azeotropic compositions. At azeotropic compositions, however, the HTCs were even higher than the ideal values due to the increase in the vapor pressure. For all mixtures, the reduction in heat transfer was greater with a larger gliding temperature difference. Stephan and Körner's and Jung et al's correlations predicted the HTCs of mixtures with a mean deviation of 11%. The largest mean deviation occurred at the azeotropic compositions of HFC134a/Isobutane and Propane/HFC134a.

Key words: Nucleate boiling heat transfer coefficient(핵비등 열전달계수), Alternative refrigerant (대체냉매), Hydrocarbons(탄화수소), Binary mixtures(이원 혼합냉매), Pool boiling correlation(비등 상관식), Evaporator(증발기)

기 호 설 명

A : 관표면적 [m²]

C : 상수 혹은 지수

D : 직경 [m]

g : 중력가속도 [m/s²]

GTD : 온도구배차 [K 혹은 °C]

h : 열전달계수 [W/m²·K]

K : 감소인자

k : 열전도도 [W/m·K]

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7320; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: dsjung@inha.ac.kr

P	: 압력 [kPa]
q	: 열량 [W]
T	: 온도 [K 혹은 $^{\circ}\text{C}$]
ΔT	: 온도차 [K 혹은 $^{\circ}\text{C}$]
x	: 액체상태 물분율
y	: 기체상태 물분율

그리스 문자

β	: 접촉각 [$^{\circ}$]
μ	: 점성계수 [Pa·s]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]
σ	: 표면장력 [N/m]

하첨자

b	: 용적
bl	: 기포
bp	: 비등범위
cal	: 계산값
eff	: 효과
epf	: 등가 순수냉매값
exp	: 실험값
f	: 포화액체상태
g	: 포화기체상태
id	: 이상
Jung	: Jung et al.
r	: 환원값
S&K	: Stephan and Körner
sat	: 포화상태

1. 서 론

지난 수십 년 동안 CFC(Chlorofluorocarbon)는 뛰어난 화학적 열역학적 특성 때문에 다양한 냉동기에서 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나 CFC가 오존층을 파괴하는 물질로 알려지면서 1987년 CFC 폐기에 관한 몬트리얼 의정서가 체결되었고, 많은 대체냉매들이 제안되었다. 전통적으로 가연성 냉매는 안전성 문제 때문에 일반 냉동공조 분야에 적용되지 않았다. 그러나 최근에는 환경적 요구에 의해 이러한 경향이 많이 완화되었다. 그 결과 몇몇 가연성 냉매들이 순수작동 유체 혹은 혼합작동 유체 중의 한 성분으로서 냉동공조 분야

에 적용되었다.^(1,2) 실제로 Isobutane(R600a)은 지난 수십 년간 유럽의 냉장/냉동기에 사용되어 왔다.⁽¹⁾ 최근에는, 유럽에서 Propane(R290)과 Propylene(R1270) 같은 탄화수소 냉매들도 열펌프의 난방운전시 작동유체로 제안되었다.⁽³⁾ 탄화수소 계열의 냉매들은 가격이 저렴하며, 냉동장치에 쓰이는 물질들과 호환성이 좋고, 기존의 미네랄 오일을 그대로 사용할 수 있으며, 친환경적인 냉매로 기존의 CFC 냉매와 비교해 큰 장점이 있다.^(1,3) Jung et al.⁽⁴⁾은 Propane과 Isobutane의 혼합물이 CFC12를 대체할 수 있는 좋은 냉매임을 보인 바 있다.

탄화수소 냉매의 가연성을 줄이는 방법 중의 하나는 HFC134a와 같은 비가연성 냉매와 혼합하는 것이다. 이러한 탄화수소와 HFC 냉매의 혼합물이 증발기에서 잘 적용되려면 그것들의 비등 열전달계수가 규명되어야만 한다. 혼합냉매는 충전을 진행함에 따라 성분비의 변화가 수반되고 재충전시 기존 성분비를 맞추기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 그러나 실제로 잘 설계된 열교환기와 새로운 혼합냉매로 이루어진 냉동장치는 시스템의 효율을 증가시켜 지구 온난화를 완화하는 결과를 가져올 것이다.

냉동 분야에서 탄화수소와 HFC의 혼합냉매가 제안된 적은 있지만 그 혼합물에 대한 체계적인 비등 열전달에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 혼합냉매의 비등 열전달은 흐름 비등 열전달상관식 개발에 있어서도 중요하기 때문에 비등 과정을 체계적으로 해석하기 위한 기본 연구로써 중요하다.

1996년 Thome⁽⁵⁾은 새로운 냉매들의 비등에 대해 언급하였으며, 증발기 설계를 한때 원하는 수준의 정확도를 얻기 위해서는 기존의 상관식들에 대한 보완이 필요하다고 주장했다. 또, 2001년 Gorenflo⁽⁶⁾는 혼합냉매의 풀비등 열전달에 대해 최근에 빈번하게 사용되는 혼합냉매의 비등 상관식을 개선하는 것이 필요하다고 지적했다.

Collier and Thome,⁽⁷⁾ Balakrishnan⁽⁸⁾은 여러 혼합물의 비등 현상을 이론과 함께 잘 정리하였다.

본 연구에서는 수평관을 사용하여 Propane/Isobutane, HFC134a/Isobutane, 그리고 Propane/HFC134a의 세 종류의 이원 혼합냉매를 여러 가지 조성으로 혼합하여 풀비등 열전달계수를 측정하고 그 결과를 비교하여 기존 냉매에 맞게 설계

된 증발기에 적용 가능한 산업계가 필요로 하는 증발기 설계의 기초 자료로 제시하고자 한다. 본 연구는 2003년도에 Jung et al.⁽⁹⁾이 수행한 HFC 계열 혼합냉매에 대한 연구의 후속 연구이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험과정

Fig. 1은 상온에서 다양한 증기압을 갖는 냉매들의 풀비등 열전달계수를 안전하게 측정할 수 있는 실험장치의 개략도를 나타내고, Fig. 2는 비

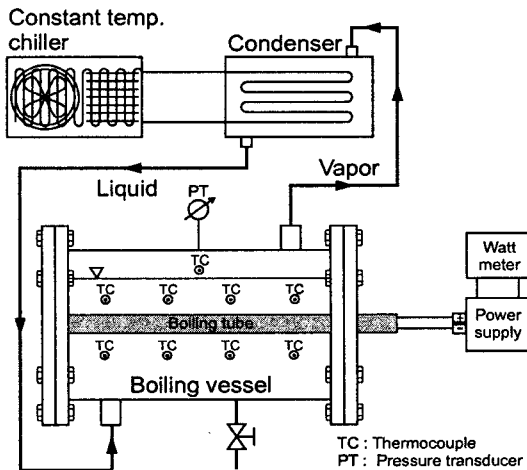


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

등이 일어나는 열전달 튜브를 나타낸다. 실험장치는 크게 냉매순환부와 열원부로 나누어진다. 실험장치는 고압에서도 견딜 수 있도록 설계되었으며 가시화 유리를 설치했다. 열전달 튜브에 균일한 열유속을 발생시키기 위해 카트리지 히터를 사용했다. 모든 실험에서 풀온도는 7°C로 고정하였고 데이터는 열유속을 80 kW/m²에서 10 kW/m²씩 낮추어 가며 측정하였다. 실험장치와 실험과정에 대한 자세한 내용은 Jung et al.⁽¹⁰⁾의 연구에 나타나 있다. 본 실험에서 발생하는 실험오차를 계산하기 위해서 Kline and McClintock⁽¹¹⁾이 제안한 방법을 사용하였다. 오차의 원인은 대부분 정밀도 ±0.1°C인 열전대에서 비롯된 것이며 모든 열유속 구간에서 7% 이내의 오차를 보였다. 또한 실험의 재현율은 5% 이내로 매우 우수하였다.

2.2 혼합냉매

본 연구에서는 하나의 이원 비공비 혼합냉매와 두 가지의 이원 공비 혼합냉매를 선정하여 실험을 수행하였다. Propane/Isobutane은 비공비 혼합냉매로서 Propane의 몰 조성이 57%일 때 최대 온도구배차가 8.06°C이었다. HFC134a/Isobutane은 공비 혼합냉매로서 HFC134a의 몰 조성이 76%일 때 공비혼합이었으며, 최대 온도구배차는 HFC134a의 몰 조성이 23%일 때 9.59°C이었다.

Propane/HFC134a 역시 공비 혼합냉매이며 Propane의 몰 조성이 65%일 때 공비 혼합이었으며, 최대 온도구배차는 Propane의 몰 조성이 15%일

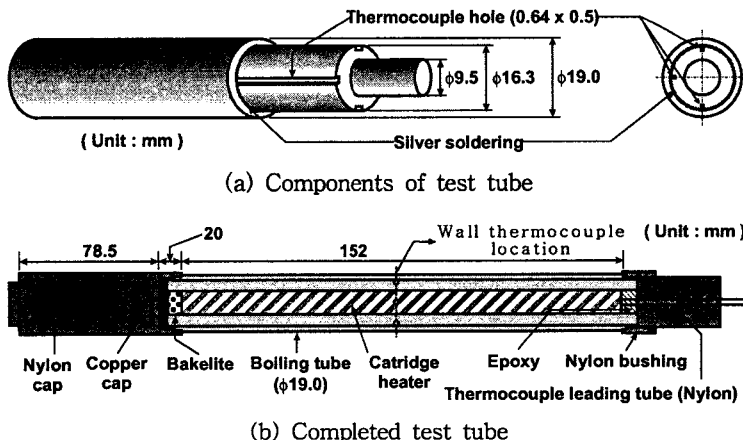


Fig. 2 Heat transfer tube specimen.

Table 1 Compositions and GTDs of mixtures tested in this study at 7°C

Mixture	Mass fraction	Mole fraction	GTD(°C)	Symbol
Propane/Isobutane	0.25/0.75	0.31/0.69	6.54	A
	0.50/0.50	0.57/0.43	8.06	B
	0.75/0.25	0.80/0.20	5.91	C
HFC134a/Isobutane	0.10/0.90	0.06/0.94	5.27	D
	0.35/0.65	0.23/0.77	9.59	E
	0.55/0.45	0.41/0.59	6.89	F
	0.85/0.15	0.76/0.24	0.04	G
	0.95/0.05	0.92/0.08	0.59	H
Propane/HFC134a	0.07/0.93	0.15/0.85	15.41	I
	0.10/0.90	0.20/0.80	15.20	J
	0.25/0.75	0.44/0.56	8.12	K
	0.45/0.55	0.65/0.35	0.08	L
	0.70/0.25	0.87/0.13	2.94	M

Table 2 Some properties of pure refrigerant at 7°C

Refrigerant	P_{sat} (kPa)	P_r	T_r	k_f (W/m·K)	k_v (W/m·K)	$\mu_f \times 10^{-6}$ (Pa·s)	$\mu_v \times 10^{-6}$ (Pa·s)	σ (N/m)
Propane	584.0	0.1375	0.7575	0.1019	0.01664	117.4	8.04	0.00923
HFC134a	374.6	0.0924	0.7487	0.0889	0.01213	248.0	11.02	0.01060
Isobutane	199.0	0.0584	0.6869	0.1036	0.01446	184.1	7.175	0.01220

때 15.41°C이었다. Table 1은 각 조성에서의 온도 구배차를 나타내고 있으며, Table 2는 실험에 쓰인 순수냉매들의 몇 가지 물성치를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 온도구배차를 비롯한 모든 열역학적 물성치는 REFPROP 6.0⁽¹²⁾에서 계산된 값이며, 모든 조성은 다른 언급이 없으면 몰 조성값이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비공비 혼합냉매의 풀비등 열전달계수

본 연구에서는 Propane, Isobutane, HFC134a로 이루어진 세 종류의 이원 혼합냉매의 풀비등 열전달계수를 측정하였다. 포화온도는 7°C이고, 열유속을 80 kW/m²에서 10 kW/m²까지 10 kW/m²씩 낮추면서 측정하였다.

Fig. 3은 Propane/Isobutane 이원 혼합냉매의 조성의 변화와 20, 40, 60, 80 kW/m²의 네 가지 열유속에 따른 휘발성이 높은 성분(혹은 낮은 성분)

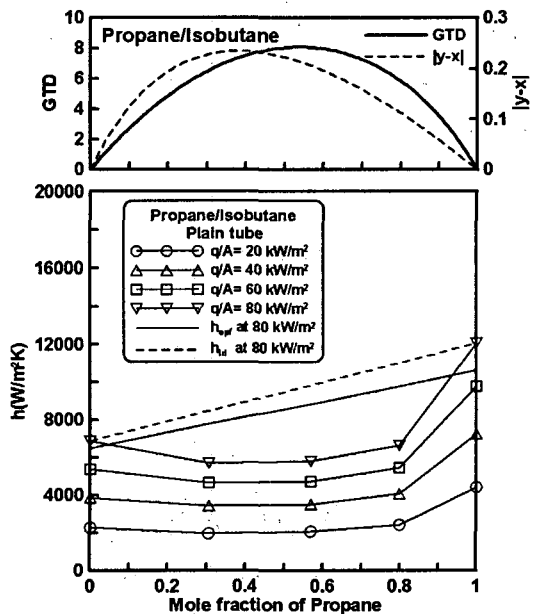


Fig. 3 Nucleate boiling HTC, GTD, (y-x) of Propane/Isobutane mixture.

의 기체/액체에서의 물분율의 차이($y-x$), 온도구배차(GTD), 그리고 열전달계수를 나타낸다. 또한, 이상 열전달계수 h_{id} 는 열유속 80 kW/m^2 에서 이미 측정된 순수냉매의 열전달계수를 측정하고자하는 혼합냉매의 물분율로 가중치를 주어 선형적으로 계산한 값이다. 그리고 등가 순수냉매 열전달계수 h_{epf} 는 순수냉매의 풀비등 상관식에 혼합냉매의 물성치를 대입하여 계산한 값이다. 이렇게 계산된 열전달계수는 Collier and Thome⁽⁷⁾가 설명했듯이 비선형 변화 효과를 포함하고 있다. h_{epf} 의 계산은 Jung et al.⁽¹³⁾의 순수냉매 상관식이 사용되었다.

식(1)은 Propane, Isobutane, HFC134a를 비롯한 13종류의 순수냉매들의 데이터들로 개발한 Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식이다. 이 상관식에서 실험에 사용된 모든 순수냉매들의 절대 평균 오차는 5.3%였다.

$$h = 41.4 \times \frac{k_f}{D_{bl}} \times \left[\frac{(q/A)D_{bl}}{k_f T_{sat}} \right]^{C_1} \times (-\log_{10} P_r)^{-1.52} \times \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.53} \quad (1)$$

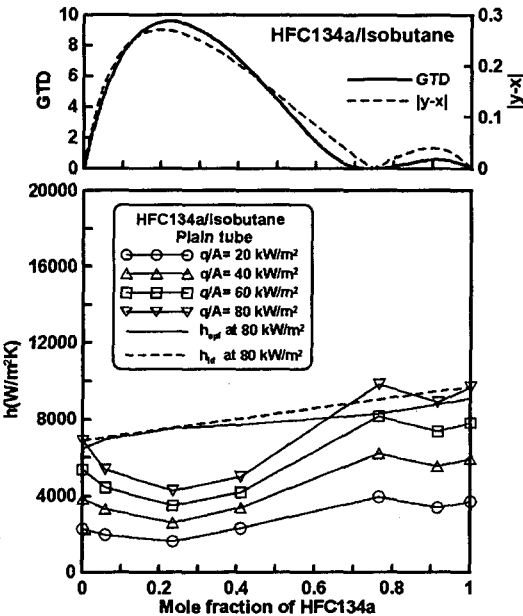


Fig. 4 Nucleate boiling HTC, GTD, ($y-x$) of HFC134a/Isobutane mixture.

$$C_1 = 0.835 \times (1 - P_r)^{1.33} \quad (2)$$

$$D_{bl} = 0.0146 \times \beta \times \left[\frac{2\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{0.5} \quad (3)$$

비공비 혼합냉매인 Propane/Isobutane의 경우, GTD 혹은 ($y-x$)가 증가함에 따라 열전달계수가 h_{id} 에 비해 최대 41% 감소했다.

Propane/Isobutane 혼합냉매는 비공비 혼합냉매이기 때문에 혼합냉매를 구성하는 순수냉매들의 비등점 차이로 인한 질량전달저항과 벽면 과열도의 손실에 의해 열전달계수가 모든 조성 영역에서 이상적인 값보다 감소하였다. 이러한 현상은 선행 연구자들의 다른 혼합냉매에 대한 연구에서 밝힌 바 있다.^(7-9,14,15)

3.2 공비 혼합냉매의 풀비등 열전달계수

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 HFC134a/Isobutane, Propane/HFC134a 이원 혼합냉매의 조성의 변화와 20, 40, 60, 80 kW/m^2 의 네 가지 열유속에 따른 휘발성이 높은 성분(혹은 낮은 성분)의 기체/액체에서의 물분율의 차이($y-x$), 온도구배차(GTD), 그리고

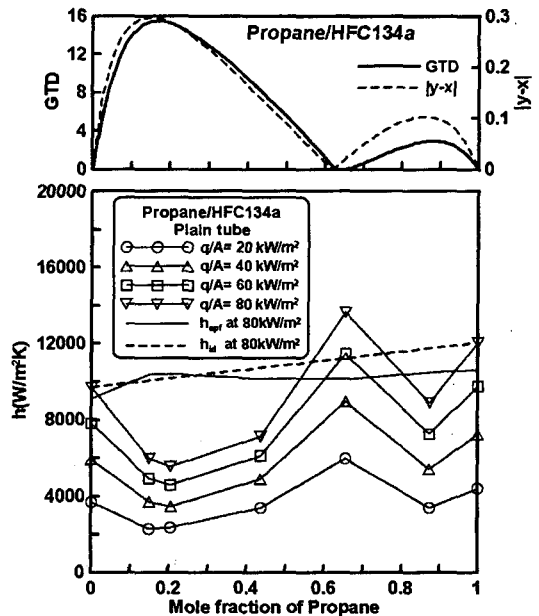


Fig. 5 Nucleate boiling HTC, GTD, ($y-x$) of Propane/HFC134a mixture.

열전달계수를 나타낸다. 또한, 열유속 80 kW/m^2 에서의 이상 열전달계수 h_{id} 와 등가 순수냉매 열전달계수 h_{epf} 가 다양한 조성에 대하여 나타나 있다. h_{epf} 를 계산하기 위해 Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식인 식(1)이 다시 사용되었다. 두 혼합냉매 모두는 GTD 혹은 $(y-x)$ 가 큰 값을 갖는 경우 이상적인 값에 비해 46%까지 감소하였다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5에서 보듯이 GTD와 $(y-x)$ 가 0인 공비점에서는 열전달계수가 이상적인 값과 비슷하거나 오히려 더 크다는 것을 알 수 있다. 공비 혼합냉매는 마치 순수냉매처럼 질량전달저항이 영향을 미치지 않기 때문이다. Happel and Stephan⁽¹⁵⁾은 에탄올과 벤젠을 이용하여 이러한 작용을 설명했다. Jung et al.⁽⁹⁾도 역시 HFC32/HFC125 혼합냉매에 대하여 이러한 사실을 보인 바 있다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 보이듯이 공비점에서의 열전달계수는 이상적인 값보다 더 높은 것을 알 수 있는데 이것은 순수냉매가 혼합되었을 때 증기압이 변하기 때문이다. 일반적으로, 일반 냉매와 탄화수소가 공비 혼합냉매를 형성하면 그 증기압은 각 순수냉매의 증기압보다 상승하게 된다. Fig. 6에서와 같이 HFC134a/Isobutane의 공비혼합 조성에서의 증기압은 HFC134a나 Isobutane의 증기압보다 높은 것을 알 수 있다. 또한 Propane/HFC134a 혼합냉매의 경우도 마찬가지이다. 이러한 사실은 REFPROP 6.0⁽¹²⁾을 통해 쉽게 알 수 있

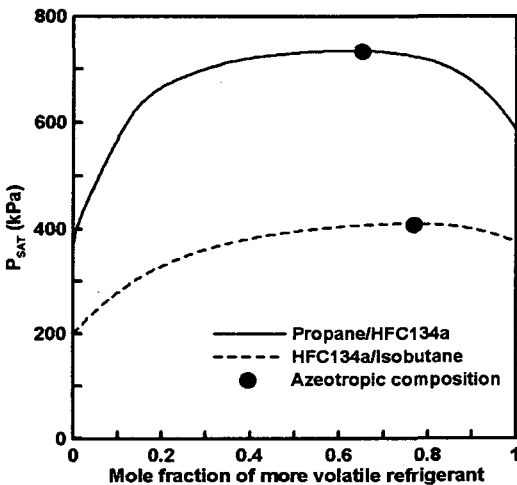


Fig. 6 Saturation pressure of liquid at 7°C for Propane/HFC134a and HFC134a/Isobutane mixtures.

다. 비등 열전달계수가 증기압의 상승에 따라 같이 증가한다는 사실은 이미 잘 알려져 있다.^(10,13,16) 따라서, Fig. 4와 Fig. 5에서 보인 HFC134a/Isobutane과 Propane/HFC134a의 공비조성 근처에서의 열전달계수는 옳은 경향을 나타낸다고 할 수 있다. 그리고 측정된 열전달계수의 이상 열전달계수에 대한 절대 감소치는 Propane/HFC134a가 HFC134a/Isobutane보다 더 컸다. 이것은 Table 1에서 알 수 있듯이 Propane/HFC134a의 GTD 혹은 $(y-x)$ 가 더 커서 질량전달저항이 HFC134a/Isobutane보다 크기 때문이다.

3.3 혼합냉매의 기존 상관식과의 비교

혼합냉매의 핵비등에 대한 많은 연구로부터 혼합냉매의 열전달계수가 혼합냉매와 같은 열역학적 물성치를 갖는 동등한 순수매체의 열전달계수보다 상당히 낮은 값을 갖게 된다는 것이 입증되었다.

Fig. 7은 벌크상태 액체 조성을 x_b 로 나타냈고, 벌크상태에서 기포가 형성되고 그에 따라 기포주변의 액체영역에서는 증기압이 높은 물질이 금방 없어지는 것에 의해 바뀐 액체의 조성으로 x_i (A점), 그에 상응하는 기체조성으로 y_i (B점)을 나타내었다. 또 그때의 온도가 T_i 임을 보여준다. Fig. 7에서와 같이 이용 가능한 벽면과열도가 $(T_w - T_b)$

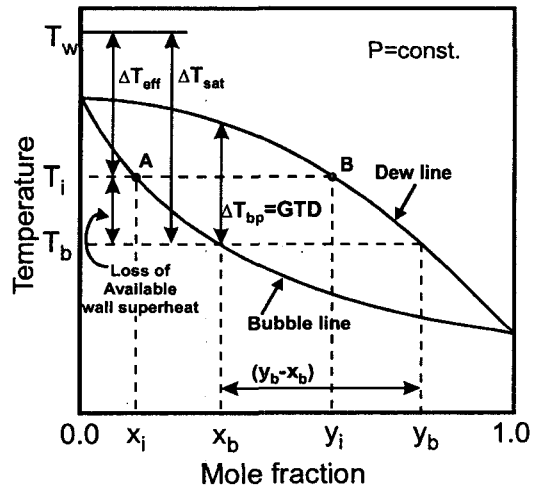


Fig. 7 Temperature and composition profiles for the nucleation of a nonazeotropic binary mixtures.

Table 3 Comparison of the present data with various correlations

	Stephan & Körner	Schlünder	Thome	Thome & Shakir	Jung et al.
Avg. dev.(%)	-8.16	-3.30	-27.22	-14.42	-8.46
Mean dev.(%)	11.13	13.28	27.22	15.07	11.05

$$\text{Avg. dev.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(h_{cal} - h_{exp}) \times 100}{h_{exp}} \right], \quad \text{Mean dev.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS \left[\frac{(h_{cal} - h_{exp}) \times 100}{h_{exp}} \right]$$

에서 ($T_w - T_i$)로 감소하게 된다. 이러한 현상을 벽면과열도손실(Loss of available wall superheat)이라 하며 이로 인해서 혼합냉매의 열전달계수가 감소하게 된다. 또한, 기포주변의 액체영역에서는 조성구배가 생기게 되며 혼합냉매를 구성하는 성분 중에서 휘발성이 높은 성분은 이 같은 조성구배를 극복하고 기포를 형성해야 한다. 따라서 조성구배가 열전달을 방해하는 인자로 작용하게 되며 이를 질량전달저항(Mass transfer resistance)이라고 한다.^(7,17-19)

많은 핵비등 열전달 상관식들이 혼합물의 효과를 설명하기 위해 액체와 기체 조성차이, ($y-x$), GTD 등을 이용하여 개발되었다. 일반적으로 혼합냉매의 열전달계수를 예측하는 상관식은 이상 열전달계수 h_{id} 와 감소인자 K 로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h}{h_{id}} = \frac{1}{1+K} \quad (4)$$

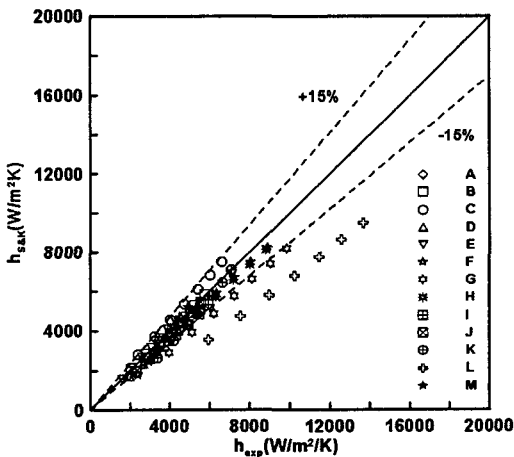


Fig. 8 Comparison of Stephan and Körner's correlation against the binary mixture data.

본 연구에서는 Stephan and Körner,⁽¹⁴⁾ Schlünder,⁽²⁰⁾ Thome,⁽¹⁷⁾ Thome and Shakir,⁽¹⁸⁾ 그리고 Jung et al.⁽¹³⁾의 다섯 가지 상관식과 측정된 데이터를 비교했다. 상관식에 관한 자세한 내용은 Jung et al.⁽¹³⁾의 연구에 설명되어 있으므로 다시 언급하지 않겠다.

상관식들의 적용을 위해서는 이상 열전달계수 h_{id} 와 등가 순수냉매 열전달계수 h_{epf} 의 혼합냉매의 각 조성에 대한 값을 필요로 하게 된다. 현재 순수냉매의 플비등 열전달계수를 예측하기 위해 많이 사용되고 있는 상관식은 Stephan and Abdelsalam⁽²¹⁾과 Cooper⁽²²⁾의 상관식이다. 그러나 최근에 Jung et al.⁽¹³⁾의 연구에서 탄화수소의 경우 이들의 상관식이 약 70~80%의 오차를 보여 매우 좋지 않음을 보였다. 그래서 본 연구에서는 순수냉매 열전달계수와 혼합냉매의 등가 순수냉매 열전달계수를 계산하기 위해 Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식인 식(1)을 사용하였다.

Table 3은 실험에 사용된 세 가지 이원 혼합냉

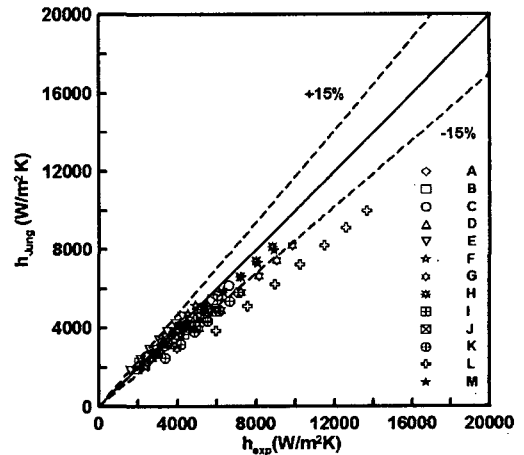


Fig. 9 Comparison of Jung et al's correlation against the binary mixture data.

매의 실험값과 위에서 언급한 상관식에 적용한 값을 비교한 결과를 보여준다. Thome⁽¹⁷⁾의 상관식을 제외하면 다른 상관식들은 평균 15% 이내의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 실험데이터를 비교적 잘 예측한 Stephan and Körner⁽¹⁴⁾와 Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식과 실험데이터를 비교한 결과를 보여준다. 그림 안의 모든 기호는 Table 1에 표시되어 있다. 비공비 혼합냉매인 Propane/Isobutane은 이 두 상관식에서 평균절대 오차가 7%였다. 공비 혼합냉매인 HFC134a/Isobutane과 Propane/HFC134a는 공비조성일 때를 제외하면 평균절대오차가 14% 이내였다. HFC134a/Isobutane과 Propane/HFC134a가 공비조성일 때는 각각 20%와 30%의 절대 평균 오차를 보였다. 이는 공비점에서의 증기압 상승에 의한 것으로 보인다.

위에서 열전달계수의 예측에 사용된 Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식은 Cooper⁽²²⁾의 접근방식에 기반을 두고 있다. 그리고 환산압력을 필요로 하기 때문에 혼합냉매의 각 조성에서의 임계압력을 알아야만 한다. 본 연구에서는 혼합냉매의 임계압력을 REFPROP 6.0⁽¹²⁾으로 계산했다. 그러나 이미 알려진 바와 같이 이렇게 계산된 혼합냉매의 임계압력값은 10~15%의 오차를 포함하고 있다.⁽²³⁾ 이러한 불확실성은 공비 혼합냉매의 공비조성에서 열전달계수를 예측하는 데 매우 큰 오차를 가져올 수 있다. 실제로 혼합냉매의 임계압력은 각 순수성분의 물분율에 의해 선형적으로 계산되기 때문에, Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식은 Propane/HFC-134a에 대하여 평균 7.7%, 최대 17%, 공비조성에서는 30%의 절대오차를 보였다. 이것은 혼합냉매의 열전달계수를 예측하는 데 미치는 환산압력 또는 임계압력의 영향을 잘 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수평관에서 비공비 혼합냉매인 Propane/Isobutane의 이원 혼합냉매와 공비 혼합냉매인 HFC134a/Isobutane, Propane/HFC134a의 이원 혼합냉매의 풀비등 열전달계수를 측정하였고 기존 혼합냉매의 열전달 특성과 비교, 분석하였다. 모든 실험은 풀온도 7°C에서 열유속을 80 kW/m²에서 10 kW/m²씩 낮추어 가며 측정하였다. 실험을 통해 얻은 데이터를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 비공비 혼합냉매인 Propane/Isobutane의 이원 혼합냉매의 열전달계수는 이상 열전달계수보다 최대 41%까지 감소했다. 이러한 현상은 모든 조성영역에 걸쳐 나타났다.

(2) 공비 혼합냉매인 HFC134a/Isobutane과 Propane/HFC134a의 이원 혼합냉매의 열전달계수는 공비조성을 제외한 모든 조성에서 최대 44%까지 감소했다. 그러나 공비조성에서는 증기압의 상승으로 인해 이상 열전달계수보다 오히려 높았다. 이러한 경향은 기존 혼합냉매의 열전달 특성과 일치하였다.

(3) 실험한 모든 혼합냉매는 온도구배차가 커질수록 열전달량이 감소했다.

(4) Stephan and Körner⁽¹⁴⁾와 Jung et al.⁽¹³⁾의 상관식은 혼합냉매의 열전달계수를 절대 평균 오차 11% 이내로 예측하였다. 가장 큰 오차는 HFC134a/Isobutane과 Propane/HFC134a의 이원 혼합냉매의 공비조성에서 나타났다.

후 기

본 연구를 위해 지원해 주신 인하대학교와 인하대학교 대학원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kruse, H., 1996, The state of the art of the hydrocarbon technology in household refrigeration, Proc. of the Int. Conferences on Ozone Protection Technologies, Washington (DC), pp. 179-188.
2. Jung, D., Kim, C., Song, K. and Park, B., 2000, Testing of propane/isobutane mixture in domestic refrigerators, Int. J. Refrigeration, Vol. 23, pp. 517-527.
3. Int. Energy Agency's Heat Pump Center, Informative fact sheet, 2002, Hydrocarbons as refrigerants in residential heat pumps and air-conditioners.
4. Jung, D., Park, B. and Lee, H., 1999, Evaluation of supplementary/retrofit refrigerants for automobile air-conditioners charged with CFC12, Int. J. Refrigeration, Vol. 22, pp. 558-568.

5. Thome, J. R., 1996, Boiling of new refrigerants: a state-of-the-art-review, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 19, pp. 435-457.
6. Gorenflo, D., 2001, State of the art in pool boiling heat transfer of new refrigerants, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 24, pp. 6-14.
7. Collier, J. H. and Thome, J. R., 1996, *Convective Boiling and Condensation*, 3rd ed., Oxford University Press, pp. 535-584.
8. Balakrishnan, A. R., 1998, Pool boiling of saturated pure liquids and binary mixtures: effects of surface characteristics, *Proc. of the 11th Int. Heat Transfer Conf. 1998*, Kyongju, pp. 71-87.
9. Jung, D., Song, K., Ahn, K. and Kim, J., 2003, Nucleate boiling heat transfer coefficients of mixtures containing HFC32, HFC-125, and HFC134a, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 26, pp. 764-771.
10. Jung, D., Kim, Y., Ko, Y. and Song, K., 2003, Nucleate boiling heat transfer coefficients of pure halogenated refrigerants, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 26, pp. 240-248.
11. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single-sample experiments, *Mechanical Engineers*, Vol. 75, pp. 3-9.
12. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, NIST thermodynamics and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures, REFPROP Version 6.0.
13. Jung, D., Lee, H., Bae, D. and Oho, S., 2004, Nucleate boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants, *Int. J. Refrigeration*, Vol. 27, pp. 409-414.
14. Stephan, K. and Körner, M., 1969, Calculation of heat transfer in evaporating binary liquid mixtures, *Chemie-Ingenieur Technik*, Vol. 41, No. 7, pp. 409-417.
15. Happel, O. and Stephan, K., 1974, Heat transfer from nucleate to beginning of film boiling in binary mixtures, *Proc. of the 5th Int. Heat Transfer Conf. 1974*, Tokyo (Paper B7.8).
16. Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Ganic, E. N., 1985, *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, 2nd ed. McGraw-Hill, Chapter 12, p. 22.
17. Thome, J. R., 1983, Prediction of binary mixture boiling heat transfer coefficients using only equilibrium data, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 7, pp. 965-974.
18. Thome, J. R. and Shakir, S., 1987, A new correlation for nucleate pool boiling of aqueous mixtures, *AIChE Symposium Series*, Vol. 83, No. 257, pp. 46-51.
19. Inoue, T., Kawae, N. and Monde, M., 1998, Characteristics of heat transfer coefficient during nucleate pool boiling of binary mixtures, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 337-344.
20. Schlünder, E. U., 1986, Heat transfer in nucleate boiling of mixtures, *Proc. of the 8th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 4, San Francisco, pp. 2073-2079.
21. Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1980, Heat transfer correlations for natural convection boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 73-87.
22. Cooper, M. G., 1984, Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling a wide-ranging examination using reduced properties, *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, Vol. 16, pp. 157-239.
23. Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Sherwood, T. K., 1977, *The Properties of Gases and Liquids*, 3rd ed., McGraw-Hill, pp. 145-149.