

순수 및 혼합냉매의 유동증발 열전달 상관식

Correlation of Convective Boiling Heat Transfer in a Horizontal Tube for Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures

신 지 영*, 김 민 수**, 노 승 탁**
 J. Y. Shin, M. S. Kim, S. T. Ro

Key words : Refrigerant mixutre(혼합냉매), Convective boiling(대류비등), Nucleate boiling(핵비등), Heat transfer correlation(열전달상관식)

Abstract

Boiling heat transfer coefficients of pure refrigerants(R22, R32, R125, R134a, R290, and R600a) and refrigerant mixtures(R32/R134a and R290/R600a) are measured experimentally and compared with several correlations. Convective boiling term of Chen's correlation predicts experimental data for pure refrigerants fairly well(root-mean-square error of 12.1% for the quality range over 0.2). An analysis of convective boiling heat transfer of refrigerant mixtures is performed for an annular flow to study degradation of heat transfer. Annular flow is the subject of this analysis because a great portion of the evaporator in refrigeration or air conditioning system is known to be in the annular flow regime. Mass transfer effect due to composition difference between liquid and vapor phases, which is considered as a driving force for mass transfer at interface, is included in this analysis. Correction factor C_F is introduced to the correlation for the pure substances through annular flow analysis to apply the correlation to the mixtures. The flow boiling heat transfer coefficients are calculated using the correlation considering nucleate boiling effect in the low quality region and mass transfer effect for nonzazeotropic refrigerant mixtures.

기 호 설 명

A : 식 (7)에 사용되는 상수
 Bo : Boiling수 ($Bo = q'' / \lambda G$)
 C : 식 (6)에 정의된 수정인자

E : 열전달 실험 자료와 상관식과의 상대 오차 [%]
 F : Chen의 F 인자
 G : 질량유속 [kg/m^2s]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 J : 농도차에 의한 물질전달유속 [kg/m^2s]
 k : 열전도율 [W/mK]
 M : 질량유량 [kg/s], 분자량 [$kg/kmol$]

* 정회원, 서울대학교 대학원

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

- m^* : 질량유속[kg/m²s]
- n : 식 (7)에 정의된 상수
- P : 압력[kPa]
- Pr : Prandtl 수($Pr = \mu c_p / k$)
- P_R : 환산압력
- Q : 열전달량[kW]
- q^* : 열유속[kW/m²]
- r : 반경방향좌표
- Re : Reynolds수($Re = Gd / \mu$)
- S : 표준편차
- T : 온도[°C 또는 L]
- X : 저온증발매체의 액상성분비
- X_u : Martinelli 파라미터
- x : 건도
- Y : 저온증발매체의 기상성분비
- δ_l : 액막의 두께[m]
- λ : 증발잠열[kJ/kg]
- μ : 점도[kg/ms]
- ρ : 밀도[kg/m³]

하 첨 자

- b : 액상 평균
- CB : 대류비동항
- $conv$: 대류비동항의 인자
- f : 포화액 상태
- g : 포화기체 상태
- i : 계면
- in : 입구
- l : 액상
- m : 혼합물
- $meas$: 측정값
- NB : 핵비동항
- NcB : 핵비동항의 인자
- out : 출구
- $pool$: 풀 비동
- $pred$: 계산값
- s : 포화상태
- TP : 2상영역
- v : 기상
- w : 벽면
- wi : 내벽면

1. 서 론

혼합냉매는 크게 등온증발, 변온증발 혼합냉매의 두 종류로 나눌 수 있다. 등온증발 혼합냉매(azeotropic refrigerant mixture)는 특정한 성분비에서 등압 상변화과정 중에 증발온도가 변하지 않는 혼합냉매를 말하며, 반면에 변온증발 혼합냉매(non-azeotropic refrigerant mixture)는 등압증발 과정에서 온도가 변하는 특성(temperature gliding effect)이 있으며, 증발과정 중에 액상과 기상의 성분비가 초기 성분비와 같이 유지되지 않고 계속 변한다. 이러한 변온증발 혼합냉매는 성분비에 따라 증발온도, 잠열 등의 열역학적인 성질이 변하기 때문에 냉동기기 및 공기조화기에 적용하면 시스템의 용량을 조절할 수 있으며, 부하가 변동할 때에도 적절히 성분비를 바꿈으로써 해결 할 수 있다. 또한, 외기조건, 열교환 방법 등의 특정한 조건을 일정하게 유지한 상태에서 순수냉매를 사용할 때보다 성능계수가 향상될 수 있다고 알려져 있다^{(1)~(6)}.

한편, 냉동 및 공조 산업에 널리 사용되어온 CFC(chloro fluoro carbon) 및 HCFC(hydro chloro fluoro carbon) 계열의 냉매가 대기중으로 방출되면 온실효과와 지구 온난화를 유발하는 것으로 밝혀짐에 따라, 이로 인한 환경파괴를 방지하기 위하여 CFC 및 HCFC계열 냉매의 생산과 사용을 규제하게 되었다^{(7),(8)}. 이에 따라 기존의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 물질들의 개발과 이러한 대체냉매들을 사용하는 시스템에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 대체냉매는 지구환경을 파괴시키는 성분을 포함하고 있지 않아야 함은 물론이고, 열에너지 이용기에 적용했을 때 성능이 향상되고 효율이 증대되어야 한다. 순수냉매이면서 열역학적 물성치가 기존냉매와 유사하며, 성능, 효율, 안전성 면에서 모든 조건을 만족하는 물질이 없는 경우, 혼합냉매를 사용함으로써 특정냉매와 비슷한 열역학적 성질 및 성능을 가지도록 할 수 있다^{(9)~(13)}.

한편, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수가 각 순수냉매의 열전달계수를 성분비에 따라 선형보간한 값보다 작다는 것이 많은 연구결과에 의해 알려지고 있으며, 많은 연구자들이 이러한 이유를 변온증

발 혼합냉매의 증발시 성분비의 변화로 인해 존재하게 되는 물성치의 비선형 효과 및 물질전달의 영향으로 설명하고 있다^{(14)~(18)}. 이러한 혼합냉매의 열전달특성을 파악하기 위해 유동형태 별로 모델링하고 필요한 가정을 도입하여 해석하는데 아직도 기포생성 및 성장, 액상 및 기상의 계면에서의 전달현상, 기상 내의 액적의 존재로 인한 영향 등을 완전히 규명하지 못하고 있다. 또한, 많은 연구자들은 실험을 통해 열전달계수를 구하고, 물질전달 저항에 관련된 항을 기존의 상관식에 도입하기도 하며, 실험 자료를 이용하여 선형회귀분석을 통해 상관식의 계수들을 결정하고 있다. 그러나, 그 계수들의 형태가 매우 복잡하며, 또한 실험 자료와의 비교가 필요하기 때문에 다른 유체에 대해 적용할 경우 상관식의 사용에 제한이 따르게 된다. 증발열전달 과정의 이론적인 해석 또한 많이 이루어지고 있지만, 순수 물질에 대해서도 확립된 이론이 필요하며, 혼합물질에 대한 연구는 여러가지 해석방법이 시도되고 있는 실정이다. 따라서 많은 유체에 적용이 가능하면서도, 물리적 의미를 내포한, 간단한 형태의 상관식이 요구되며, 혼합물질에 대해서도 확장하여 사용할 수 있는 상관식이 필요하다. 이러한 연구는 혼합냉매의 사용이 확대되는 시점에서 이를 이용한 시스템 설계의 기초자료로 사용되리라 예측한다.

본 연구에서는 변온증발 혼합냉매의 증발열전달 계수를 예측할 수 있는 상관식을 제시하고자 한다. 상관식에는 혼합냉매가 순수냉매와 다른 특성을 고려하기 위하여 혼합냉매의 증발시 액상과 기상의 성분비 차이 때문에 생기는 물질전달저항을 새로운 인자로 도입하고, 상관식과 증발열전달 실험자료⁽¹⁹⁾를 비교하고자 한다. 새로운 인자를 도입함에 있어서 기존의 상관식들은 그 형태가 복잡하거나 실험 자료와의 비교를 통한 실험상수의 도입으로 새로운 조합의 혼합냉매를 사용하고자할 경우 그 적용에 어려움이 있으므로, 본 연구에서는 상관식의 계수들을 실험자료에 의존하지 않고 혼합냉매의 환상유동에 대한 해석으로부터 도출된 결과⁽²⁰⁾를 사용한다.

2. 순수 및 혼합냉매의 증발열전달 실험

2.1 증발열전달 실험 개요

증발열전달 실험의 대상냉매는 앞으로 대체가 될 예정인 HCFC 계열의 R22와 그 대체 가능성이 검토되고 있는 HFC(hydro fluoro carbon) 계열의 R32, R125, R134a 및 변온증발 혼합냉매인 R32/R134a, HC(hydro carbon) 계열의 R290, R600a 및 R290/R600a를 선정하였다. 본 연구에서 사용된 순수냉매의 물성을 Table 1에 나타내었다. 이들 냉매에 대하여 수평원관 내를 순환하는 경우에 대한 냉매의 유동증발 열전달계수를 실험적으로 구하였다⁽¹⁹⁾. 실험자료는 새롭게 사용이 고려되고 있는 혼합냉매의 열전달 특성에 대한 기초 자료를 구축한다는 의미를 가지고 있으며, 변온증발 혼합냉매의 열전달 상관식을 검증하기 위한 기초자료로서 매우 중요하다.

실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다. 실험장치는 기본적으로 냉매 펌프, 질량유량계, 예열기, 시험부, 냉각부로 구성되어 있으며, 냉매의 순환과정은 다음과 같다. 마그네틱 액체 펌프는 과냉된 냉매를 예열기로 보내며, 예열기에서는 원하는 시험부 입구건도를 맞추기 위한 열량이 공급된다. 한편, 예열기 전에는 질량유량계를 설치하여 냉매의 질량유량을 액체상태에서 측정하고, 냉매는 예열기를 거쳐서 시험부로 보내지며, 여기에서 교류 직접가열 방식으로 가열되어 증발된다. 시험부에서 가열된 냉매는 냉각부에서 냉각되어 수액기(liquid receiver)로 들어가고, 다시 냉매 펌프를 통해 순환된다. 시험부는 스테인레스 스틸로 만들어진 원관을 사용하였으며, 유효가열길이는 5.9m, 관의 내경 및 두께는 각각 7.7mm, 두께 0.9mm이다.

열전달계수를 결정하기 위해서는 열유속, 냉매 온도 및 벽면온도를 측정하여야 한다. 본 연구에서는 외벽면온도를 측정한 뒤 1차원 열전도식을 이용하여 내벽면온도를 계산하였다. 혼합 냉매의 온도를 결정하기 위하여 냉매관 내의 압력을 측정하고, 공급열량과 냉매가 얻은 열량이 같다는 에너지 보존에 의해 건도를 계산한 뒤, 이 압력과 건도에 해당하는 포화온도를 구하여 냉매의 온도로 하였다. 시험부 및 예열기에 공급되는 열량은 전력계로 측정하였다. 본 실험의 조건은 참고문헌⁽¹⁹⁾에 나타

Table 1 Physical properties of pure refrigerants in this study.

	R22	R32	R125	R134a	R290	R600a
Chemical Formula	CHClF ₂	CH ₂ F ₂	CF ₃ CHF ₂	CF ₃ CH ₂ F	C ₃ H ₈	CH(CH ₃) ₃
Molecular Weight(kg/kmol)	86.48 [‡]	52.024 [†]	120.020 [†]	102.03 [†]	44.10 [‡]	58.13 [‡]
Critical Temperature(K)	369.15 [‡]	351.56 [†]	339.4 [†]	374.21 [†]	369.80 [‡]	408.15 [‡]
Critical Pressure(MPa)	4.974 [‡]	5.830 [†]	3.631 [†]	4.056 [†]	4.242 [‡]	3.645 [‡]
Critical Density(kg/m ³)	525 [‡]	430 [†]	572 [†]	515 [†]	219 [‡]	221 [†]
Normal Boiling Temperature(K)	232.4 [‡]	221.4 [†]	224.6 [†]	247.0 [†]	231.07 [‡]	261.42 [‡]
Density @ 101.3kPa(kg/m ³)						
Saturated liquid	1409.1 [‡]	1202.1 [†]	1514.1 [‡]	1374.3 [‡]	580.65 [‡]	593.81 [‡]
Saturated vapor	4.705 [‡]	2.976 [†]	6.777 [‡]	5.259 [‡]	2.419 [‡]	2.813 [‡]
Dynamic viscosity(μ Pa·s)						
Saturated liquid	210.1 [‡]	156.6 [¶]	190.8 [¶]	278.5 [¶]	140 [‡]	214.0 [^]
	(@273.2K)	(@273.2K)	(@279.15K)	(@271.26K)	(@270K)	(@270.0K)
Saturated vapor	11.96 [‡]	11.412 [*]	12.399 [*]	10.94 [‡]	7.78 [‡]	6.99 [^]
	(@273.6K)	(@273.5K)	(@273.48K)	(@273.15K)	(@270K)	(@270.0K)

† :McLinden(1990); ‡ :ASHRAE(1993); ¶ :Ripple & Matar(1993); § :Oliveira & Wakaham(1993a);
 *:Oliveira & Wakeham(1993b); ^ :Touloukian et. al.(1970)

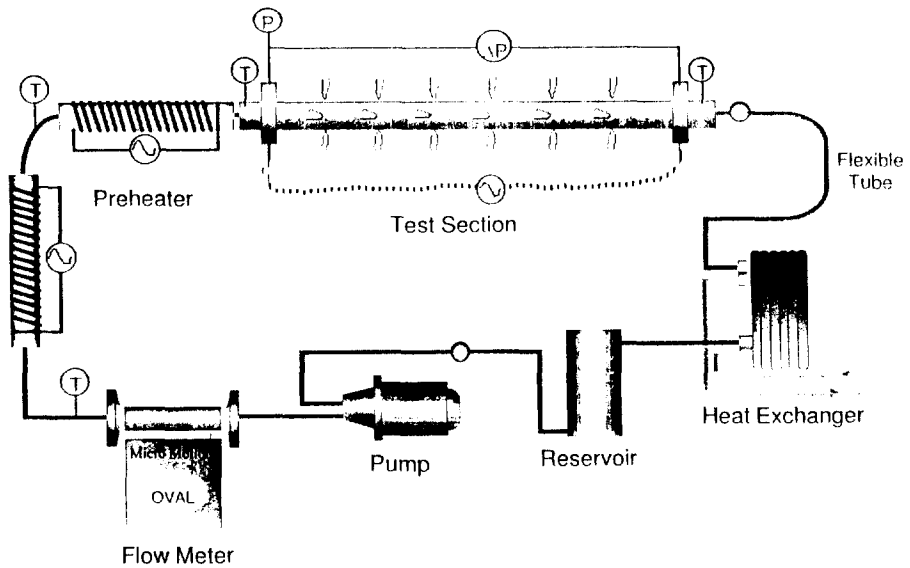


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

내었다.

열전달계수는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$h_k = \frac{q''}{T_{wi,k} - T_s} \quad (1)$$

q'' 는 열유속 T_{wi} 는 계측한 외벽면온도를 1차원 열전도식을 고려하여 보정한 내벽면온도, T_s 는 순수냉매의 경우 측정된 압력을 이용하여 계산한 포화온도이며, 혼합냉매의 경우에 T_s 는 측정된 압력과 건도를 이용하여 계산한 온도를 의미한다. 하첨자 k 는 각각 윗면, 아랫면, 좌측면, 우측면을 나타낸다. 포화압력으로부터 냉매의 온도를 계산하기 위해서는 수정된 Carnahan-Starling 상태방정식⁽²¹⁾을 사용하였다.

국소위치에서 반경방향 평균열전달계수는 윗면, 아랫면, 양 옆면의 4곳에서 계측한 값을 평균한 식 (2)로 계산한다.

$$h = \frac{\sum_k h_k}{4} \quad (2)$$

본 연구의 상관식을 도출하기 위한 실험자료는 참고문헌⁽¹⁹⁾에 나타나 있으며, 측정된 열전달 계수의 측정오차는 약 5.8%이다.

2.2 순수 및 혼합물질에 대한 열전달 상관식과 실험자료와의 비교

순수냉매 R22, R32, R125, R134a, R290 및 R600a에 대한 실험자료들을 각각 다른 연구자의 상관식에서 구한 열전달계수와 비교하여 건도에 따

른 각 상관식과의 상대오차를 Fig.2에 각각 나타내었고, 상대오차의 RMS(Root Mean Square)값을 Table 2에 정리하였다. 괄호안의 수는 건도가 0.2보다 큰 경우의 자료만에 대한 결과이다. 건도가 0.2보다 큰 경우 상관식과의 오차는 작아지는데 이는 기존의 상관식들로는 저건도 지역의 핵비등에 의한 영향을 잘 반영할 수 없다는 것을 시사한다. 상대오차 E 는 식 (3), RMS 값은 식 (4)와 같이 계산되는 값이다. N 은 실험자료의 총수이다.

$$E = \frac{(h_{meas} - h_{pred})}{h_{pred}} \times 100, \% \quad (3)$$

$$R.M.S = \sqrt{\frac{E^2}{N}} \quad (4)$$

기존의 순수냉매에 관한 상관식들을 실험의 조건과 동일한 조건에서 비교하였다. Chen⁽²²⁾의 상관식은 핵비등에 의한 영향을 제외한 대류비등항만을 사용하였는데 증발초기를 제외하면 실험과 Chen의 상관식이 잘 일치하며, 열전달계수의 변화 경향을 정성적으로나 정량적으로나 잘 설명해주고 있다. Shah⁽²³⁾의 경우 동일한 질량유속 조건에서도 저건도 지역에서 핵비등이 크게 나타나기 때문에 열유속이 열전달에 미치는 영향을 정성적으로 잘 예측하고 있다. 또한 증발이 진행되면서 열유속의 영향이 사라지고, 열전달 특성이 질량유속 및 건도에 의존하는 특성도 잘 반영하고 있다. Gungor & Winterton⁽²⁴⁾의 식은 Chen의 경우와 유사한 형태를 가지지만 열전달계수의 건도에 따른 변화 정도가 실험이나 Chen의 식에 비해 완만하게 나타나고 있고, 건도가 어느 정도 높아져도 열유속에 대한

Table 2 Root mean square error(%) between predicted and experimental heat transfer coefficients (numbers in parenthesis represent RMS error for the experimental data of quality over 0.2)

Refrigerants	Chen ⁽²²⁾	Shah ⁽²³⁾	Gugor & Winterton ⁽²⁴⁾	Kandlikar ⁽²⁵⁾
R22	32.0(10.7)	17.2(13.9)	29.9(15.6)	22.8(18.9)
R32	43.2(8.6)	13.4(10.8)	39.4(13.2)	29.5(25.2)
R134a	77.8(13.6)	19.4(15.7)	72.8(17.2)	23.8(20.9)
R125	35.0(12.5)	12.4(10.9)	31.2(14.2)	18.0(18.2)
R290	34.8(16.4)	19.3(13.8)	32.3(14.1)	30.8(30.8)
R600a	34.8(15.6)	35.2(24.4)	38.1(28.0)	38.5(38.5)

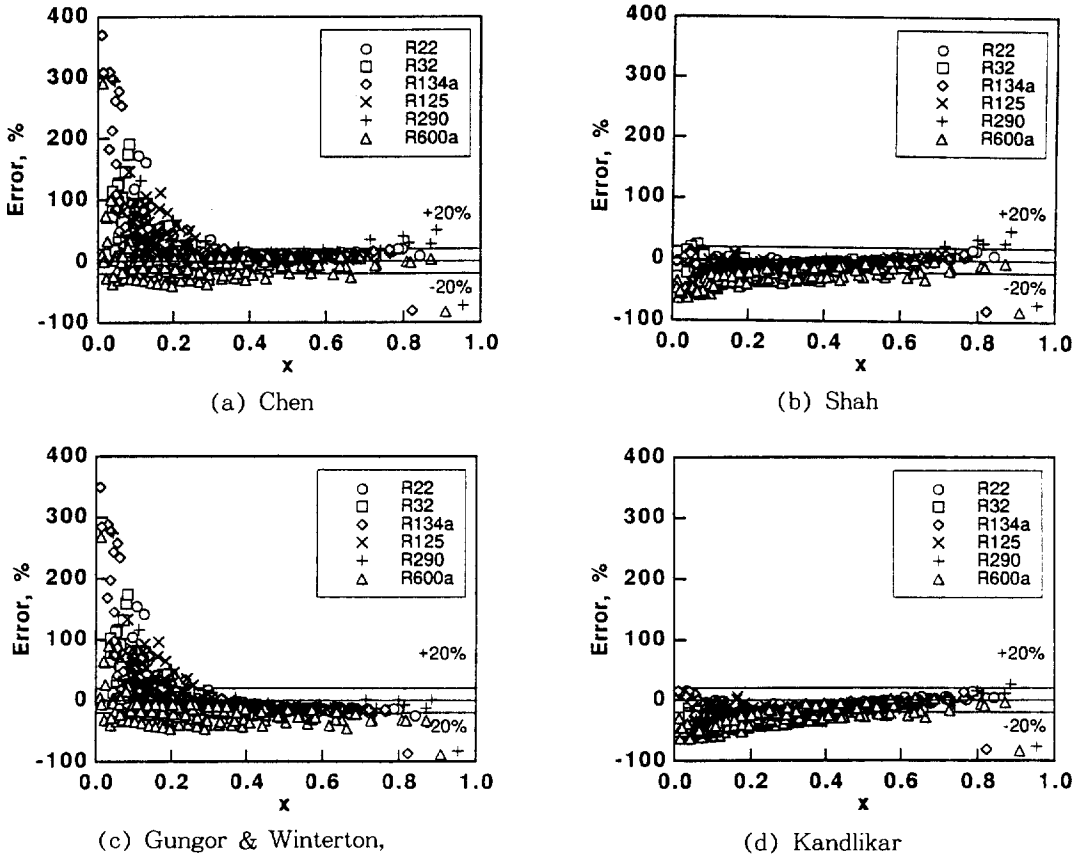


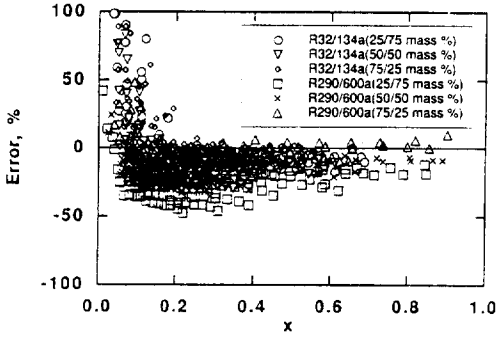
Fig.2 Relative error between predicted and experimental heat transfer coefficients of the pure refrigerants with respect to quality

영향이 계속 나타난다. Kandlikar⁽²⁵⁾는 핵비등항과 대류비등항 중 큰 값으로 2상유동 열전달계수를 결정한다. 여기에는 작동유체에 따라 보정계수 F_{fi} 이 필요하다는 단점이 있으며 실험에 비해 계산값이 전반적으로 크게 나타난다. 또한, 열유속의 영향이 넓은 건도 범위에서 나타난다.

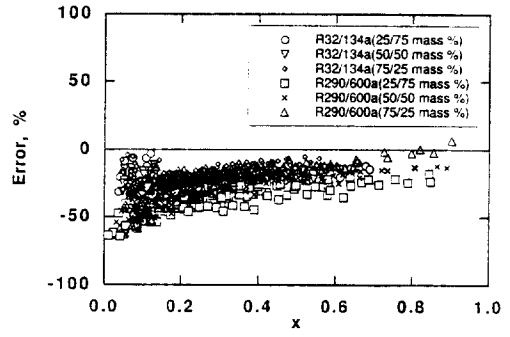
상관식들간의 정량적인 차이들은 상관식에 포함 되어 있는 계수들이 실험자료와의 비교를 통해 결정되었기 때문에, 새로운 실험조건, 방법 및 대상 냉매에 따라 이 계수들을 다시 결정함으로써 어느 정도 해결할 수 있을 것이다. 하지만, 오차의 폭은 열전달 상관식이 증발의 진행에 따른 열전달 특성의 정성적인 변화를 설명할 수 있는 인자의 선택에 좌우되는 문제이므로 이러한 점을 고려하여 상관식

을 선택하여야 할 것이다.

순수물질에 사용하던 열전달 상관식을 혼합냉매의 열전달계수 자료와 비교한 뒤, Chen과 Shah의 상관식에 대하여 건도에 따른 상대오차를 Fig.3에 나타내었다. 변온증발 혼합냉매 R32/R134a(질량비 25/75, 50/50, 75/25), R290/R600a(질량비 25/75, 50/50, 75/25)의 자료들을 정성적으로 잘 표현하고 있지만, 절대적인 크기를 예측하는데에는 큰 오차가 내포된다. 즉, 서론에서 서술하였던 바와 같이 변온증발 혼합냉매의 열전달계수는 순수냉매의 열전달계수를 선형적으로 보간한 값보다는 작게 나타나며, 순수냉매에 적용하던 열전달상관식으로 계산한 값보다도 낮게 나타나고 있음을 시사한다. 이로부터 변온증발 혼합냉매의 2상유동 증발열



(a) Chen



(b) Shah

Fig.3 Relative error between predicted and experimental heat transfer coefficients of the refrigerant mixtures with respect to quality

전달 특성을 기술하기 위한 새로운 인자의 도입이 필요함을 판단할 수 있다⁽¹⁹⁾.

3. 환상유동 해석

본 연구에 사용된 해석모델은 신지영 등⁽²⁰⁾에 의해 제시된 것으로, Fig.4에 나타낸 바와 같이 액체가 관벽을 따라서 액막의 형태로 흐르고, 기체는 관 중심부분을 따라서 흐르는 형태의 환상유동에 대하여 적용이 가능하다. 벽면에서 일정한 열유속이 공급되는 것으로 가정하였고, 저전도 지역에서 핵비등의 영향은 고려하지 않았다. 실제 수평관에서 환상유동 형태는 중력으로 인해 하부의 액막이 상부의 액막에 비해 상대적으로 두껍다. 그러나, 증발이 조금만 진행되어도 기체의 유속이 아주 빨라져서 관성력에 의한 영향이 중력에 의한 영향보다 커지므로, 해석에서는 중력의 영향은 무시하고 원주방향으로 액막의 두께는 일정한 것으로 가정하였다. 실제 환상유동에서는 액상에서 기상으로의 액적 유입(entrainment), 반대로 기상에서 액상으로의 액적 점착(deposition)도 존재하나 해석의 편의를 위하여 고려하지 않았다. Fig.4에서 X_i , Y_i 는 각각 저온증발냉매(more volatile component)의 액상 및 기상 성분비, T 는 온도, M 는 질량유량, J 는 물질전달량, Q 는 열량을 나타낸다. 하첨자 l, v 는 각각 액상, 기상을 의미하며, i 는 계면, b 는 액상 평균, wi 는 내벽면을 뜻한다.

Fig.4에 나타낸 검사체적을 바탕으로 계면에서

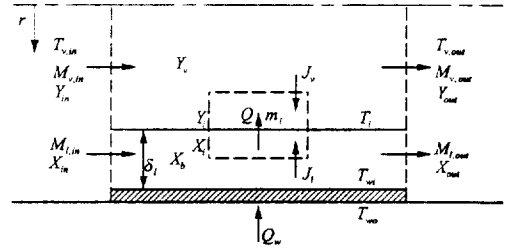


Fig.4 Control volume for the annular flow analysis in this study

저온증발매체의 질량 보존식을 식 (5)에 나타내었다.

$$-m_i^* X_i - J_i = -m_i^* Y_i + J_v \tag{5}$$

여기서 m_i^* 는 계면에서의 증발량, X_i, Y_i 는 각각 계면에 인접한 지역에서의 액상과 기상의 성분비를 뜻한다. 좌변에서 농도차에 의한 액상에서의 물질 전달량 J_i 는 기상에서의 물질전달량 J_v 에 비해 아주 작은 값이다. 따라서, 주어진 총성분비에서 증발이 진행되는 동안 기상 성분비가 항상 액상성분비보다 크다는 것으로부터 유추하여 볼 때, 기상에서 계면으로의 물질 전달이 존재하여야 계면에서 저온증발매체의 질량보존이 성립한다.

변온증발 혼합냉매의 경우 압력과 전도가 주어지면 2상상태에서의 기상 온도를 상대방정식으로부터 계산할 수 있다. 벽면온도와 계면온도를 가정하고 반복계산을 통해 물질전달 보존식인 식 (5)를

만족하는 온도를 주어진 건도, 압력으로부터 구할 수 있다. 즉, 질량보존식과 에너지보존식에서 구해지는 증발량과 계면에서 저온증발매체의 질량보존식에 의해 구해지는 증발량이 같아지는 계면온도 T_i 를 반복계산에 의해 구하는 것이다.

계산결과로부터 변온증발 혼합냉매의 유동증발 과정시 계면과 기상의 온도 차이로 인해 생기는 열전달계수의 감소를 고려하기 위해 식 (6)~(8)과 같이 새로운 수정계수 C_F 를 결정하였다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T + \Delta T_i} = 1 - C_F \quad (6a)$$

$$\Delta T = T_w - T_i \quad (6b)$$

$$\Delta T_i = T_i - T_v \quad (6c)$$

C_F 는 열전달계수의 감소비율을 나타내는 인자이

Table 3 The coefficients A and n in Eq.(7)

Refrigerant mixture	A	n
R32/R134a	0.569	0.860
R290/R600a	0.533	0.828

며, 액상과 기상의 성분비 차, $|Y-X|$ 를 도입하여 식 (7)과 같은 형태로 곡선 맞추어 표현할 수 있다. 본 연구에서는 R32/R134a 및 R290/R600a에 대해 계산하였고, 식 (7)의 형태로 곡선 맞춤한 계수 A 와 지수 n 을 Table 3에 나타내었다. 이 값들은 실험자료와는 무관하게 환상유동 해석으로부터 결정된 값이다.

$$C_F = f(|Y-X|) = A|Y-X|^n \quad (7)$$

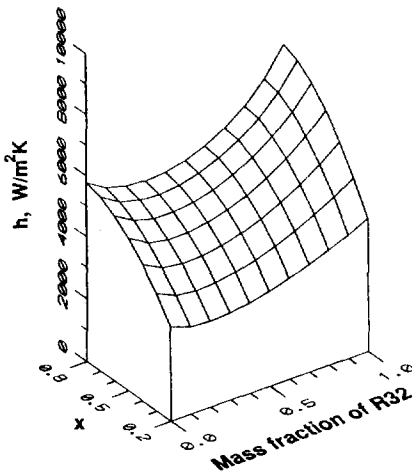
A, n 이 주어지면 변온증발 혼합냉매의 열전달 계수의 감소폭을 예측할 수 있다. 즉, 식 (8)에 주어진 바와 같이 혼합냉매의 열전달계수는 순수물질에 적용하였던 Chen 상관식의 F 인자에 혼합 효과를 고려하여 계산될 수 있다.

$$h = F_m \cdot h_{conv} \quad (8a)$$

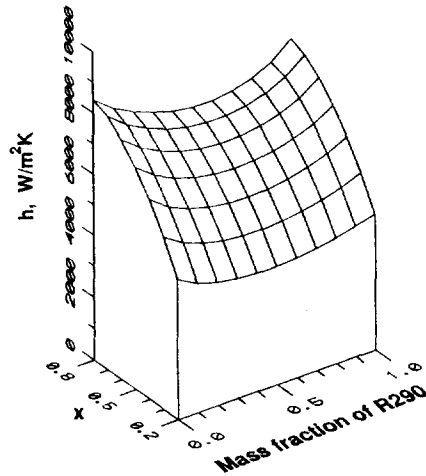
$$F_m = (1 - C_F) \cdot F \quad (8b)$$

$$h_{conv} = 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.4} \frac{k_l}{d} \quad (8c)$$

$$Re_i = \frac{m''(1-x)d}{\mu_l} \quad (8d)$$



(a) R32/R134a ($x=0.5$)



(b) R290/R600a ($x=0.5$)

Fig.5 Heat transfer coefficients with respect to quality and mass fraction for $G=424\text{kg/m}^2$ and $P_R=0.15$. (Calculated by Chen's correlation with mass transfer correction from the annular flow analysis in this study)

F_N 는 순수물질의 상관식에 사용한 Chen의 F 인자이며 F_m 은 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 예측하기 위해 물질전달에 의한 열전달계수의 감소를 고려하여 수정된 인자이다. 결국 식 (8)에서 F 와 F_m 을 식 (8b)와 같이 정의함으로써 순수냉매의 대류비등항에 포함된 액상만의 열전달계수 h_{conv} 와 Chen의 F 인자를 그대로 사용하면서, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 계산할 수 있다. Fig.5에 질량유속 424kg/m²s, 환산압력 0.15인 조건에서 R32/R134a, R290/R600a의 열전달계수 계산 결과를 성분비와 건도의 변화에 대해 나타내었다. 두 냉매 모두 변온증발 혼합냉매로 성분비의 변화에 따라 열전달계수가 선형으로 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

4. 순수 및 혼합냉매의 열전달 상관식

4.1 순수냉매의 유동증발 열전달 상관식

본 실험에서 구한 열전달계수의 정성적 변화를 가장 잘 반영하는 열전달 상관식은 Chen과 Shah의 상관식으로 판단된다. Shah는 핵비등의 영향을 포함하므로 실험 자료와 비교적 잘 일치하나 실험 결과를 정리하여 함수적으로 표현한 것이어서, 새로운 냉매, 새로운 실험 조건에 대한 결과에 확대하여 적용하는데에는 정확도가 떨어지며, 이론 또는 실험에 의한 검증이 필요하다. 반면에 Chen의 식은 대류비등항만을 고려할 경우 증발열전달계수의 정성적인 변화를 잘 예측하고, 고건도 지역, 대류비등의 영향이 강하게 나타나는 영역의 실험자료를 잘 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, Chen의 식 또한 실험 자료와 무관하지는 않지만, 식을 구성하는 인자들이 어느 정도 이론적인 해석을 통해 얻어진 것이고 많은 연구자들에 의해 검증되었기 때문에 이를 본 연구의 기본적인 모델로 삼고자 한다.

Chen의 2상유동 열전달 상관식은 다음과 같이 표현된다.

$$h_{TP} = S \cdot h_{NB} + F \cdot h_{conv} \quad (9)$$

핵비등에 의한 영향 $S \cdot h_{NB}$ 은 실험을 통해 증발

초기에만 큰 영향을 미치는 것으로 판별할 수 있기 때문에, 이 항을 제외한 대류비등항만으로써 일단 Chen의 F 인자를 고찰하였다. F 인자는 2상유동에 의한 열전달의 향상 정도를 의미한다. h_{TP} 는 2상유동 열전달계수를 뜻하며, h_{conv} 는 주어진 건도에 해당하는 액상의 단상유동 열전달계수에 해당하는 값이다. Martinelli파라미터 X_{tt} 는 2상유동에서 액상과 기상의 압력강하의 비로 표시할 수 있으며 그 역수는 건도와 밀접하게 연관된다. 실험결과 저건도 지역에서는 핵비등의 영향이 강하게 나타나며, 이러한 영향을 고려한 상관식이 보다 넓은 건도 영역에서 열전달계수를 예측할 수 있다고 판단된다. 2상 유동열전달계수를 핵비등항과 대류비등항으로 나누어 고려하는 방법을 식 (10)~(13)에 정리하였다. 실험으로부터 구한 열전달계수 h_{meas} 는 전술한 바와 같이 핵비등의 영향 h_{NB} 과 대류비등의 영향 h_{CB} 의 합으로 표시하면 식 (10)과 같다. S , F 는 각각 핵비등의 억제인자, 대류비등의 촉진인자로 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_{meas} &= h_{NB} + h_{CB} \\ &= S \cdot h_{pool} + F \cdot h_{conv} \end{aligned} \quad (10)$$

실험자료의 분석을 통해 대류비등항의 기본 모델을 Chen의 것으로 택하였기 때문에 핵비등항은 실험자료와 식 (11)을 이용해 계산할 수 있다.

$$h_{NB} = h_{meas} - h_{CB} \quad (11)$$

이때 S 를 식 (12)와 같이 정의할 수 있다. 핵비등의 중요한 인자는 우선 냉매의 열역학적 상태, 즉 건도와 유동 조건 및 열유속을 생각할 수 있다. 건도는 Martinelli파라미터(X_{tt}), 유동조건 및 열유속은 무차원 증발 수(Bo)를 도입하는 것이 보통이다. 풀비등의 열전달계수는 Cooper⁽²⁶⁾의 식을 사용하였다.

$$S = h_{NB}/h_{pool} \quad (12a)$$

$$h_{pool} = 55 P_R^{0.12} (-\log_{10} P_R)^{-0.55} M^{-0.55} q^{0.67} \quad (12b)$$

식 (12)에서 S 인자를 계산해 내고, 이 값을 Martinelli 파라미터와 Bo 수의 함수로 생각하면, 식 (13)에 제시한 형태의 함수로 식 (12)와 식

(13)으로 표현되는 S의 값을 최소로하는 최소자승 오차법(Least Square Method)에 의해 식 (13)의 계수 a_0, a_1, a_2 를 결정할 수 있으며, 그 값은 각각 0.0592, 0.668, 1.38 이다.

$$S = a_0 X_{ii}^{a_1} B \sigma^{a_2} \quad (13)$$

Fig.6에는 수정된 상관식으로부터 계산한 열전달계수와 실험자료를 비교하여 나타내었고, Table 4에 각 냉매별로 오차의 RMS 값을 나타내었다. 현재의 상관식은 연구 대상 냉매에 대하여 열유속, 질량유속, 작동압력 조건에서의 실험자료를 20%의 오차범위에서 예측하였다. 기존의 상관식을 바꾸지 않은 순수냉매에 대한 본 연구결과는 만족할 만한 결과를 보인다. 너무 복잡한 형태의 상관식은 사용에 어려움이 따르고, 작동유체에 대한 인자를 도입하는 것은 일반성이 부족하기 때문에 대류비동향에 대해서는 많은 연구자들에 의해 검증되어 온 Chen의 식을 기본적으로 채택하고, 핵비동향을 실험자료와의 비교를 통해 수정하여 상관식을 제시하였다.

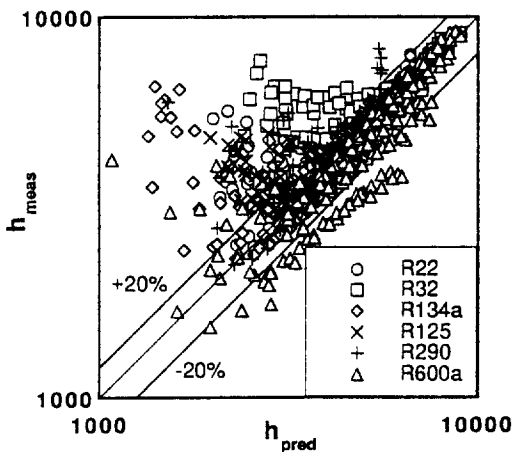
4.2 변온증발 혼합냉매의 유동증발 열전달 상관식

변온증발 혼합냉매의 열전달계수 예측을 위해 물질전달저항을 고려하기 위한 방법은 전술한 바와 Table 4 Root-mean-square error between predicted and experimental heat transfer coefficients for the pure refrigerants

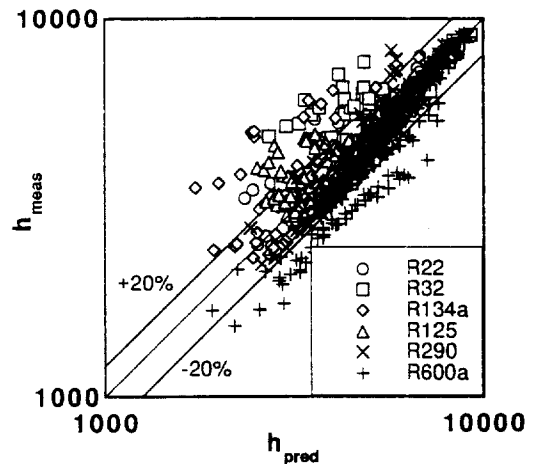
Refrigerants	RMS	
	I	II
R22	32.0	22.5
R32	43.2	12.3
R134a	77.8	18.5
R125	35.0	26.0
R290	34.8	21.7
R600a	34.8	12.1

I : Convective boiling term of Chen's correlation

II : Correction of nucleate boiling effect with the Chen's convective boiling term



(a) using convective boiling term of Chen's correlation



(b) using modified form of Chen's correlation including nucleate boiling effect at low quality region.

Fig.6 Relative error between predicted and experimental heat transfer coefficients of the pure refrigerants with respect to quality

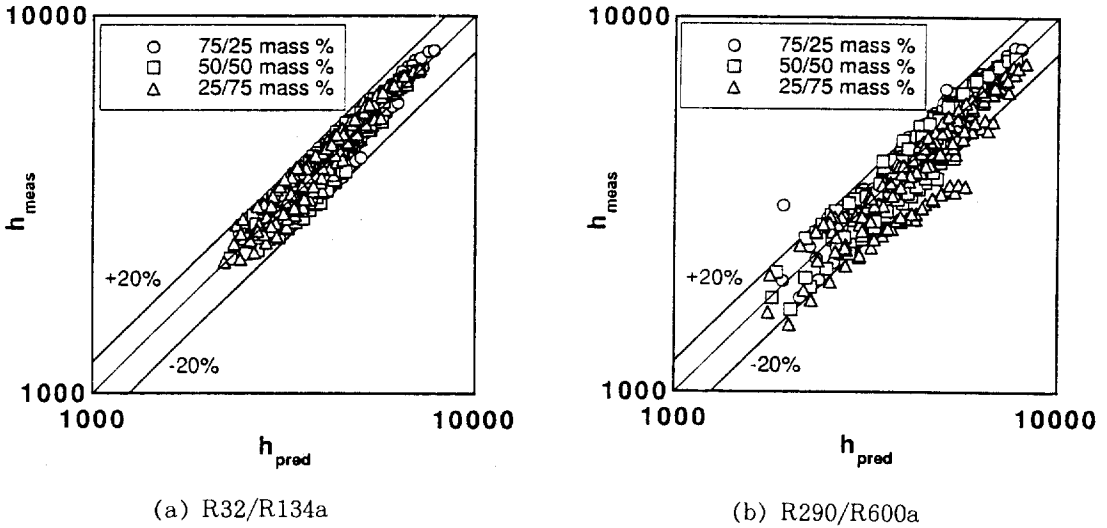


Fig.7 Comparison between predicted and experimental heat transfer coefficients for refrigerant mixtures

같이 액상과 기상의 성분비 차, $|Y-X|$ 를 도입하는 것이다. 앞절에서 변온증발 혼합냉매의 증발 과정을 모델링하고, 계면에서의 농도차와 이로 인해 발생하는 물질전달이 계면과 기상간의 미소한 온도차를 유발한다는 것을 고찰하였다. 한편, 이러한 온도차를 액상과 기상의 성분비차의 함수로 생각하고 혼합냉매의 열전달계수의 감소폭을 예측한 바 있다.

혼합냉매에 대한 열전달계수의 예측결과로부터, 실험자료와 예측값에 대한 상대오차의 RMS 값을 구해 보면, 순수냉매에 사용하던 Chen 상관식의 대류비등항만을 사용한 경우 R32/R134a에 대하여 25.0%, R290/R600a에 대하여 19.4%로 나타났다. 반면, 앞절의 환상 유동 해석 결과로부터 도입된 물질전달의 영향을 고려하고, 여기에 핵비등에 의한 영향까지 고려하여 계산한 경우 R32/R134a에 대하여 8.9%, R290/R600a에 대하여 14.6%로 나타났다. 저건도 지역, 즉, 핵비등이 우세한 지역에 대한 상관식의 보정은 혼합냉매의 경우에도 식 (13)을 그대로 이용하였으며, 물질전달을 고려한 수정인자, F_m 을 도입하여 저건도 이외 지역의 보정을 하였다. 실험자료와 본 연구의 열전달 상관식으로 계산한 열전달계수를 비교하여 Fig.

7에 나타내었다. 혼합냉매에 대한 본 연구의 상관식은 저건도 지역의 핵비등에 의한 열전달계수의 향상 효과 및 물질전달에 의한 효과를 포함한 식으로서 본 연구의 대상인 혼합냉매 R32/R134a와 R290/R600a의 실험자료를 잘 예측하였다.

5. 결 어

변온증발 혼합냉매의 증발 열전달계수를 예측하기 위하여, 수평원관 내 유동 증발 현상을 실제 냉동기 및 공조기의 증발기에서 대부분을 차지하는 환상유동 형태로 모델링하고, 물질전달 현상이 전체적인 증발 열전달 과정에 미치는 영향을 고려하여 해석을 수행하였다. 대상냉매로는 HCFC 계열의 냉매로서 대체에 대한 연구가 진행 중인 R22와 그 대체가능성이 검토되고 있는 HFC 계열의 R32, R125, R134a 및 변온증발 혼합냉매인 R32/R134a와 환경보호 측면에서 유리한 HC 계열의 R290, R600a 및 R290/R600a를 선정하여, 이들 냉매의 증발 열전달 실험을 통해 얻은 자료를 바탕으로 열전달계수를 예측할 수 있는 상관식을 구하였다.

순수물질에 대하여는 Chen의 식을 기본 모델로

삼고, 핵비등에 의한 영향을 고려하여 열전달계수를 예측한 결과 본 연구의 상관식은 연구 대상 냉매에 대하여 열유속, 질량유속, 작동압력 조건에서의 실험자료를 20%의 오차범위에서 예측하였다.

변온증발 혼합냉매에 대해서도 대류비등항의 기본 모델로서 Chen의 상관식을 사용하고, 액상과 기상의 성분비 차, $|Y-X|$ 를 이용하여 구한 수정인자 C_f 를 도입한 뒤, 핵비등에 의한 영향을 고려하여 열전달계수를 예측한 결과, 실험자료와의 RMS 오차는 R32/R134a에 대하여 8.9%, R290/R600a에 대하여 14.6%로 나타났다. 혼합냉매에 대한 본 연구의 상관식은 저건도 지역의 핵비등에 의한 열전달계수의 향상 효과 및 물질전달에 의한 효과를 포함한 식으로서 적용이 간단하면서도, 혼합냉매에 대한 열전달 계수를 잘 예측하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 및 서울대학교 터보·동력기계연구센터의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Schwind, H. O. H., 1960, "Multiple Fluid Refrigerating System", United States Patent 2938362.
- Kruse, H., 1981, "The Advantages of Non-Azeotropic Refrigerant Mixtures for Heat Pump Application", *Int. J. Refrig.* Vol. 4, pp. 119~125.
- Kauffeld, M., Mulroy, W., McLinden, M., and Didion, D. A., 1990, "An Experimental Evaluation of Two Nonazeotropic Refrigerant Mixtures in a Water-to-Water Breadboard Heat Pump", *NISTIR 90-4290*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- Vineyard, E. A. and Sand, J. R., 1988, "Evaluation of Nonazeotropic Refrigerant Mixtures for Capacity Modulation", *Proc. DOE/ORNL Heat Pump Conf.*, pp. 47~54.
- 김동섭, 신지영, 노승탁, 1992, "혼합냉매를 사용한 열펌프 시스템의 성능과 열전달 특성", *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 4권, 제 4호, pp.360~369.
- Kim, T. S., Shin, J. Y., Chang, S. D., Kim, M. S., and Ro, S. T., 1994, "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.
- UNEP, 1987, Montreal Protocol on substances that Deplete the Ozone Layer.
- UNEP, 1992, Copenhagen Decision, the Fourth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol.
- Didion, D. and Bivens, D. B., 1990, "Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs", *Int. J. Refrig.* Vol. 13, pp. 163~175.
- Domanski, P. A. and Didion, D. A., 1993, "Thermodynamic Evaluation of R-22 Alternative Refrigerants and Refrigerant Mixtures", *ASHRAT Trans.*, Vol. 99, Part 2, pp. 636~648.
- 장세동, 신지영, 노승탁, 1993, "R12 및 R22 대체냉매의 열역학적 물성치 및 냉동기의 성능 비교", *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 5권, 제 1호, pp. 73~83.
- 장영수, 신지영, 노승탁, 1994, "R134a, R152a, R22/R142b를 이용한 냉동기의 성능 실험", *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 6권, 제 1호, pp. 39~46.
- 장세동, 노승탁, 1994, "R22의 대체냉매를 사용한 공기조화기의 성능 시뮬레이션", *공기조화·냉동공학 논문집*, 제 6권, 제 1호, pp. 39~46.
- Ross, H., Radermacher, R., Di Marzo, M., and Didion, D., 1987, "Horizontal Flow Boiling of Pure and Mixed Refrigerants", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 5., pp. 979~992.
- Jung, D. S., McLinden, M., and Rader-

- macher, R. and Didion, 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.
16. Murata, K. and Hashizume, K., 1993, "Forced Convective Boiling of Nonazeotropic Refrigerant Mixtures inside Tubes", *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 680~688.
17. Torikoshi, K. and Ebisu, T., 1993, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R-134a, R-32, and a Mixture of R-32/R-134a inside a Horizontal Tube", *ASHRAE Trans.*, Vol. 99, Part 2, pp. 90~96.
18. 신지영, 김동섭, 노승탁, 1993, "수평원관내에서 R22/R142b 혼합냉매의 증발과정 열전달에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제17권, 제 4 호, pp. 971~979.
19. 신지영, 김민수, 노승탁, 1995, "순수 및 혼합냉매의 원관내 증발열전달 실험", 대한기계학회 논문집 B, 제 19권, 제 2 호, pp. 730~740.
20. 신지영, 김동섭, 노승탁, 1991, "수정된 Carnahan-Starling 상태방정식을 이용한 혼합냉매의 물성계산", 대한기계학회 논문집, 제 15권, 제 6 호, pp. 2189~2205.
22. Chen, J. C., 1996, "Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow", *I & EC Process Design and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 322~329.
23. Shah, M. M., 1982, "Chart Correlation for Saturated Boiling Heat Transfer Equations and Further Study", *ASHRAE Trans.*, Vol. 88, Part II, pp. 66~86.
24. Gungor, K. E. and Winterton, R. H. S., 1986, "A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 3, pp. 351~358.
25. 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.
26. Cooper, M. G., 1984, "Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling-A Wide-Ranging Examination Using Reduced Properties", *Advanced in Heat Transfer*, Vol. 16, pp. 157~239.
27. McLinden, M. O., 1990, "Thermodynamic Properties of CFC Alternatives : A Survey of the Available Data", *Int. J. Refrig.*, Vol. 13, pp. 149~162.
28. ASHRAE, 1993, *ASHRAE Handbook-1993 Fundamentals*, ASHRAE.
29. Ripple, D. and Marar, O., 1993, "Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Six Halogenated Compounds and Three Mixtures", *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 38, pp. 560~564.
30. Oliveira, C. M. B. P. and Wakeham, W. A., 1993a, "The Viscosity of Liquid R134a", *Int. J. Thermophysics*, Vol. 14, pp. 33~44.
31. Oliveira, C. M. B. P. and Wakeham, W. A., 1993b, "The Viscosity of R32 and R125 at Saturation", *Int. J. Thermophysics*, Vol. 14, pp. 1131~1143.
32. Tolukian, Y. S. and Dewitt, D. P., 1970, *Thermophysical Properties of Matter : Thermal Radiative Properties*, IFI/PLENUM.