

HFC32/134a 계의 기-액상평형에 관한 연구

Investigation of vapor-liquid equilibrium of HFC32/134a system

김 창 년*, 박 영 무**, 이 병 권***, 안 병 성***
 C. N. Kim, Y. M. Park, B. K. Lee, B. S. An

Key words : Vapor-liquid equilibrium(기-액상 평형), Equation of state(상태 방정식), Binary interaction parameter(2성분 상호작용계수), Bubble point pressure(비등점 압력), Mole fraction(몰분율)

Abstract

Vapor-liquid equilibrium apparatus is designed and set up. The vapor-liquid equilibrium data of the binary system HFC32/134a are measured in the range between 258.15 and 283.15K at compositions of 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 mole fraction of HFC32. Twenty-two equilibrium data are obtained. Based upon the present data, the binary interaction parameter for Carnahan-Starling-De Santis equation of state is calculated. Temperature range of data is extended to 313.04K using the data in the open literatures. Interaction parameters are determined at nine isotherms.

기 호 설 명

a_0, a_1, a_2	: 상태방정식에 관련된 계수	v	: 비체적, m^3/kg
AAD	: 절대평균오차, %	x	: 몰분율
b_0, b_1, b_2	: 상태방정식에 관련된 계수	y	: $b/4v$
deviation	: 상대오차, %		그리스문자
f	: 상호작용계수	Γ	: 목적함수
P	: 압력, kPa		
R	: 일반기체상수, kJ/kgK		하 첨 자
T	: 온도, K		

*정회원, 아주대학교 대학원 기계공학과
 **정회원, 아주대학교 기계 및 산업공학부
 ***한국과학기술연구원, 대체 CFC기술센터

1 : 성분1
 2 : 성분2
 cal : 계산
 i : 임의 데이터

l	: 포화액체상태
mea	: 측정
sat	: 포화상태
v	: 포화증기상태

1. 서 론

최근 HCFC계열 냉매의 사용이 규제되면서 대체냉매의 개발을 위해 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히, 냉동 및 냉방장치에서 기존에 사용하던 냉매와 유사한 성질을 가지면서 더욱 우수한 성능을 발휘할 수 있는 단일냉매 뿐만아니라 혼합냉매도 대체냉매로서 대두되고 있다. 현재 대체냉매로는 HFC(hydrofluorocarbon)계열 냉매와 천연물질인 HC(hydrocarbon)계열 냉매 및 이들의 혼합물이 가장 많이 검토되고 있으며 제품으로 생산되고 있다.

대체냉매가 새롭게 개발되면 냉동시스템의 재설계 및 성능평가를 수행하여야 한다. 이런 재설계 및 성능평가를 수행하기 위해서는 냉매의 열역학적 물성 및 전달 물성이 기본적으로 필요하게 된다.

보통 냉매의 열역학적 물성치는 기본적인 실험자료를 이용하여 계산한다. 냉매의 열역학적 물성치를 계산하기 위해서는 냉매에 적당한 상태방정식을 선정하고 선정된 상태방정식에 포함된 여러 계수값들을 기본 실험자료를 이용하여 계산한다. 기본 실험자료로는 순수냉매의 경우 증기압 및 PVT자료, 그리고 임계자료이며, 혼합냉매의 경우 기-액상평형과 PVTx자료 및 임계자료들이다.

따라서 현재 냉방장치의 대체냉매로 대두되고 있는 HFC 혼합냉매에 대한 기-액상평형 실험과 PVTx실험 및 임계점 측정실험이 활발히 진행되고 있다. 그 중 대표적인 기-액상평형 실험에 대한 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Fujiwara 등⁽¹⁾은 273.15K에서 HFC32/125, HFC32/134a, HFC32/143a 그리고 HFC32/152a 4종류의 2성분 혼합냉매에 대한 상평형실험을 수행하여 HFC32/125의 혼합냉매가 최저공비혼합물이고 HFC32/143a가 최대 공비혼합물이라는 것을 밝혀 내었다. 또한 Peng-Robinson(PR) 상태방정식과 Soave-Redlich-Kwong(SRK) 상태방정식 중

PR 상태방정식이 실험자료와 더 잘 일치하는 것을 발견하였다. Higashi^(2,3)는 283.15K~313.04K의 온도범위에서 HFC32/125와 HFC32/134a의 2성분 혼합냉매의 기-액상평형 실험을 수행하였으며 PR 상태방정식, SRK 상태방정식, 그리고 Carnahan-Strarling-De Santis(CSD) 상태방정식을 이용하여 각각의 상호작용계수를 온도에 따라 계산, 비교하였다. Nagel과 Bier^(4,5)는 HFC32/125/134a 및 HFC125/143a/134a의 2성분 및 3성분 혼합물의 기-액상평형 실험을 205K에서 임계온도까지 넓은 온도범위에서 수행하였으며 여러 상태방정식을 이용하여 각각의 상호작용계수를 계산 비교하였다. 그러나 Nagel과 Bier는 넓은 온도범위에서 실험을 수행하였으나 등온조건에서 실험을 수행하지 않아 온도에 따른 상호작용계수의 영향을 살펴볼 수 없었다. 정의엽과 김민수⁽⁶⁾는 283.15K~303.15K의 온도범위에서 HFC32/134a의 2성분 혼합냉매에 대한 기-액상평형 실험을 수행하였다. 또한 PR 상태방정식과 RKS 상태방정식을 이용하여 상호작용계수를 계산하였으며, 온도변화에 따른 상호작용계수의 변화를 제시하였다. 그러나 위의 기-액상평형 자료는 상온이상으로 온도가 제한되어 있으며 실험자료도 많지 않으므로 본 연구에서는 더 확장된 온도범위와 좀 더 정확하고 많은 기-액상평형 자료를 실험을 통하여 제시하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 HFC32/134a의 기-액상평형 실험을 258.15~283.15K의 온도범위에서 수행하여 보다 더 많은 상평형 자료를 제시하고, 기존의 자료와 함께 보다 정확한 혼합물의 열역학적 물성치를 제시할 수 있는 상호작용계수를 계산하려 한다.

2. 기-액상평형 실험

2.1 실험장치

상평형 실험방법에는 정지법, 유동법, 순환법⁽⁷⁾ 등이 있다. 본 연구에서는 순환법으로 실험장치를 구성하였으며, Fig.1은 혼합물의 기-액상평형을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 크게 평형장치, 시료 채집 및 분석장치, 냉매공급장치

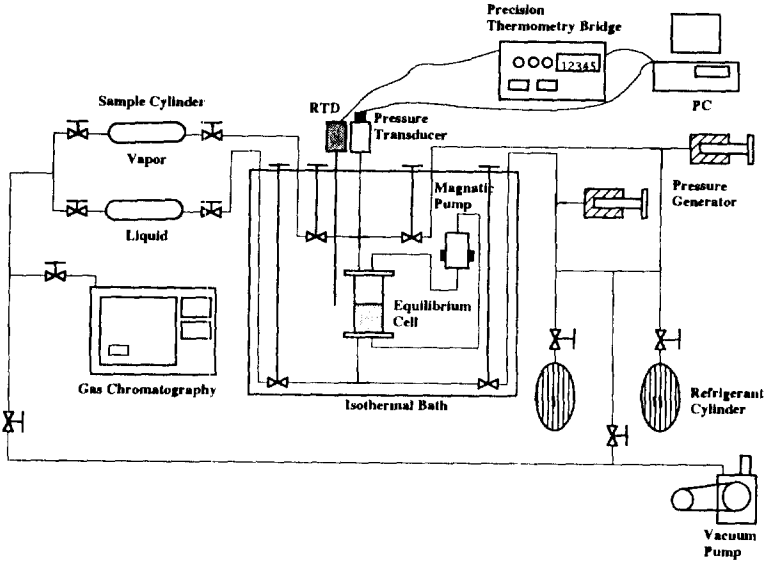


Fig.1 Schematic diagram of the vapor-liquid equilibrium apparatus

로 구성된다. 이 중 가장 핵심부분은 평형장치이며, 평형셀과 마그네틱 펌프로 구성되어 있다.

평형셀은 셀내부를 관찰할 수 있도록 특수유리관으로 제작하였다. 셀의 내경은 20mm, 길이는 80mm로 체적이 대략 25ml이다. 마그네틱 펌프는 혼합냉매의 평형이 빠르게 그리고 잘 이루어지도록 기체와 액체 냉매를 순환시켜주는 역할을 한다. 평형셀과 마그네틱 펌프는 항온조에 설치되어 있으며 항온조의 온도는 외부 온도제어장치에 의해 조절된다. 항온조의 열전달 매체로는 실리콘 오일이 사용되었다.

온도는 25Ω 표준백급저항온도센서 (ISOTECH)를 온도측정브리지(Model F700, Automatic Systems Laboratories)에 연결하여 측정하였다. 온도계는 ITS-90에 의거하여 교정하였으며 정확도는 ±2mK이다. 압력은 압력변환기(Model ATS, Heise, Dresser)를 이용하여 측정하였으며, 압력계의 정밀도는 0.01kPa이다. 그리고 압력측정의 정확도는 약 ±0.02%이다.

기상와 액상 시료를 분석하기 위하여 채집실린더를 설치하였으며, 시료의 물분율은 가스분석기(HP 5890 II)를 이용하여 계산하였다. 가스분석에 사용

한 검측기는 열전도도 검측기(TCD, Thermal Conductivity Detector)이며 컬럼은 Porapak-Q Packed column을 사용하였다. 사용된 컬럼은 80/100mesh이며, 길이 1.83m(6ft), 외경 3.18mm(1/8in)인, 스테인레스강관으로 되어있다. 가스분석기는 순수냉매를 이용하여 교정하였으며 물분율 측정의 불확도는 ±0.2mole%로 평가된다.

2.2 실험방법

기-액상평형 실험은 다음과 같은 방법으로 수행한다. 먼저, 항온조의 온도를 설정한다. 다음 공기와 이물질들을 제거하기 위하여 진공펌프를 이용하여 평형셀 및 진체 시스템을 진공시킨다. 진공은 원하는 진공도(약 1×10^{-2} torr)가 얻어질 때까지 진행한다. 진공이 얻어지고 항온조의 온도가 설정온도가 되면 평형셀에 먼저 증기압이 낮은 HFC134a를 주입하여 상평형을 만든다. 이 때, 냉매는 액체 체적이 셀 체적의 1/3 정도가 될 때까지 주입한다. 다음 HFC32를 원하는 액체 몰 비율이 될 때까지 주입한다. 원하는 액체 몰 분율은 압력을 이용하여 대략적으로 계산할 수 있다. 냉매를 주입하는 동안 연속적으로 마그네틱 펌프를 작동시켜 혼합 및 상평

형이 잘 이루어지도록 한다. 냉매 주입후 상평형이 이루어지면 온도와 압력을 측정하고 기상과 액상의 시료를 미소량 채취한다. 채취한 시료는 가스분석기로 보내어 분석한다. 한 물분율에서 실험이 끝나면 HFC32를 더 주입하여 다음 물분율에서 실험을 수행하며, 한 등온에서 실험이 끝나면 다음 등온으로 실험을 반복 수행한다.

3. CSD 상태방정식

냉매의 열역학적 물성치를 계산하기 위해서는 적당한 상태방정식을 선정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 냉매의 열역학적 물성치 계산에 널리 사용되는 CSD 상태방정식을 채택하였다.

CSD 상태방정식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$\frac{Pv}{RT} = \frac{1+y+y^2-y^3}{(1-y)^3} - \frac{a}{RT(v+b)} \quad (1)$$

$$y = \frac{b}{4v} \quad (2)$$

$$a = a_0 \exp(a_1 T + a_2 T^2) \quad (3)$$

$$b = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 \quad (4)$$

CSD 상태방정식을 혼합물에 적용할 때에는 혼합물의 a , b 가 그 혼합물과 PVT 특성이 같은 가상적인 순수물질의 a , b 와 같다는 가정하에서 순수물질에 적용한 상태방정식과 같은 형태의 식을 혼합물에 적용한다. 따라서 혼합물의 a 와 b 를 추산하려면 다음과 같은 혼합법칙이 필요하다.⁽⁸⁾

$$a = \sum \sum x_i x_j a_{ij} \quad (5)$$

$$b = \sum \sum x_i x_j b_{ij} \quad (6)$$

$i=j$ 인 경우, a_{ii} , b_{ii} 의 값은 순수물질의 값이며, a_{ij} , b_{ij} 의 값은 해당 혼합물의 실험자료로부터 구할 수 있다. 두 개의 구형강성체가 가장 근접할 수 있는 거리는 이들의 반경의 합이므로 변수 b_{12} 의 물리적 의미로부터 Lorentz 법칙을 이용하여 다음 식으로 표시할 수 있다.⁽⁹⁾

$$b_{12} = \frac{(b_{11}^{1/3} + b_{22}^{1/3})^3}{8} \quad (7)$$

a 의 값은 분자사이의 인력과 관련이 있으므로 a_{12} 에 대한 혼합법칙은 분자의 양자역학모형에서 유추할 수 있다. 즉 상호작용에너지는 순수성분의 힘-에너지 상수의 기하학적 평균으로 표시할 수 있으므로 Morrison과 McLinden⁽⁸⁾은 a_{12} 를 다음과 같이 표시한다.

$$a_{12} = (1-f_{12})(a_{11} a_{22})^{1/2} \quad (8)$$

$(1-f_{12})$ 는 두 혼합물의 극성의 차이와 가장 근접한 거리의 영향을 고려한 상호작용계수이다. Knobler⁽⁹⁾와 Pesuit⁽¹⁰⁾들은 f_{12} 를 분자의 직경과 전기포텐셜을 이용하여 이론적으로 계산하는 방법을 제시하였으나 이론적인 방법으로 f_{12} 를 계산하는 것은 만족스럽지 않으며 실험 자료를 이용하여 f_{12} 를 정량적으로 계산하는 것이 가장 정확한 방법이라고 하였다. 이론적으로 혼합물에 대한 최소한의 기-액상평형 자료만 있으면 f_{12} 를 계산할 수 있다. 그러나 실험 자료가 많을수록 f_{12} 의 계산의 신뢰도가 더 커진다.

혼합법칙의 상호작용 계수 f_{12} 는 기-액상평형 자료를 이용하여 다음과 같은 목적함수를 최소화 하도록 f_{12} 를 결정한다.

$$\Gamma(T, x_i, f_{12}) = \sum \left(\frac{P_{\text{sat, mea}} - P_{\text{sat, cal}}}{P_{\text{sat, mea}}} \right)^2 + \sum (x_{v, \text{mea}} - x_{v, \text{cal}})^2 \quad (9)$$

f_{12} 계산에 있어서 P_{sat} , x_v 와 순수물질의 a , b 값이 필요하며 실험자료가 많을수록 신뢰도가 증가한다.

4. 결 과

4.1 시료의 순도

순수 냉매 HFC32와 HFC134a의 순도는 제조자의 정보에 의하면 99.9%이다. 따라서 본 연구에서는 별도의 정제과정없이 그대로 사용하였다.

4.2 순수냉매 HFC134a의 증기압측정

기-액상평형 실험을 실행하기에 앞서 실험장치의 검증을 위하여 순수냉매 HFC134a의 증기압을 측정하여 McLinden 등⁽¹¹⁾이 제시한 증기압식을 이용하여 계산한 값과 비교하였다. 측정된 증기압과 계산한 증기압의 결과는 Table 1에 제시하였으며 Fig.2는 측정된 증기압과 계산한 증기압의 상대오차를 보여준다. -10~10°C 온도범위에서 증기압식으로 계산한 값과 측정된 증기압과의 상대오차가 0.25~0.37%이며 절대평균오차는 0.33%이다. 따라서 본 실험장치의 온도 및 압력측정은 정확하다고 볼 수 있다. 여기서 상대오차와 절대평균오차는 식(10)과 (11)을 각각 이용하여 계산하였다.

$$deviation \% = \frac{P - P_{cal}}{P_{cal}} \times 100 \quad (10)$$

$$AAD = \frac{1}{N} \sum_i \frac{|P_i - P_{cal,i}|}{P_{cal,i}} \times 100 \quad (11)$$

4.3 상호작용계수

기-액상평형 실험에서 측정된 온도, 압력 및 각 상의 물분율을 식(9)에 적용하여 상호작용계수를 계산하였다.

Fig.3은 CSD 상태방정식을 이용하여 계산한 상호작용계수를 보여주고 있다. 온도 258.15~283.15K에서는 본 연구에서 측정된 실험결과를 이용하

Table 1 Comparison of the measured vapor pressures of HFC134a from the calculated values by correlation of McLinden et al.

T (K)	P _{mea} (kPa)	P _{cal} (kPa)	P _{mea} - P _{cal} (kPa)
263.15	201.265	200.578	0.687
268.15	244.207	243.316	0.891
273.15	293.839	292.775	1.064
278.15	350.737	349.627	1.110
283.15	415.646	414.571	1.075

여 계산하였고, 293.15K, 303.15K에서는 정의엽과 김민수⁽⁶⁾의 실험결과를 313.04K에서는 Higashi⁽³⁾의 실험결과를 이용하여 계산하였다.

계산결과를 살펴보면 상호작용계수가 온도에 따라 어떤 경향을 보이지 않고 -0.0151~-0.0107 내에 존재하였다. Higashi⁽³⁾의 연구결과를 살펴보면, 비록 온도 범위가 283.07K~313.04K로 제한되어 있으나 CSD 상태방정식을 사용하여 계산한 상호작용계수는 온도가 증가하면 감소하는 경향을

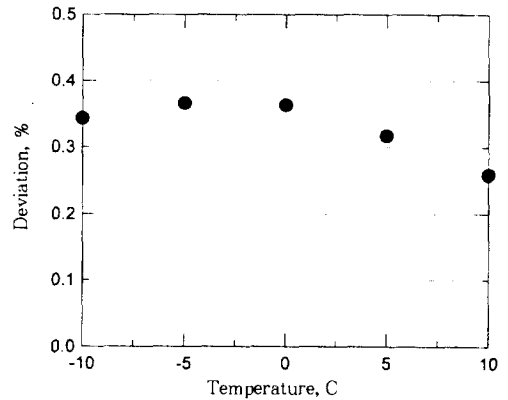


Fig.2 Comparison of the measured vapor pressure of HFC134a from the calculated values by correlation of McLinden et al

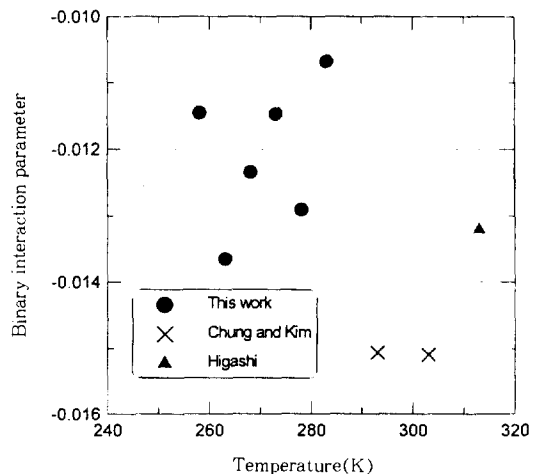


Fig.3 The binary interaction parameter of CSD equation of state for HFC32/134a system

보이고 있다. 따라서 이 부분에 대해서는 더 많은 실험결과를 토대로 연구가 더 진행되어야 한다고 생각된다.

참고로 REFPROP⁽¹²⁾에서는 HFC32/134a의 상호작용계수 값을 -0.01 로 온도에 무관하게 사용하고 있다.

4.4 기-액상평형

본 연구에서는 HFC32의 액체 몰비율을 대략 0.2, 0.4, 0.6, 0.8로 변화시켜 가면서 258.15~283.15K에서 5K 간격의 등온과정에서 포화압력과 각 상의 몰비율을 총 22점 측정하였다. 측정 결과는 Table 2와 같으며 Fig.4와 Fig.5에 나타내었다. 그림에서 곡선은 CSD 상태방정식으로 계산한 값이다.

Fig.4는 258.15K, 263.15K, 268.15K, 273.15K, 278.15K 5개의 등온과정에 대하여 나타내었으며, Fig.5는 283.15K, 293.15K, 303.15K, 313.04K에 대하여 제시하였다. 본 연구에서는 293.15K이상의 온도에서는 실험을 수행하지 않으므로

정의엽과 김민수⁽⁶⁾ 및 Higashi⁽³⁾의 결과를 이용하여 제시하였다.

본 연구에서 얻은 실험결과와 기존 연구결과와의 비교를 Fig.6~Fig.9에 나타내었다. Fig.6(a), 7(a), 8(a)는 각각 263.15K, 273.15K, 283.15K에서의 P-x-y 결과를 기존 연구결과와 같이 보여주고 있다. 그리고 Fig.6(b), 7(b), 8(b)는 각각 263.15K, 273.15K, 283.15K에서 앞에서 계산한 상호작용계수를 이용하여 CSD 상태방정식으로 계산한 비등점 압력을 기준으로 기존연구결과와 REFPROP으로 계산한 결과와의 상대오차를 보여주고 있다.

Fig.9는 전 온도범위에서 CSD 상태방정식으로 계산한 결과와 기존결과와의 상대오차를 보여주고 있다. 상대오차는 식(10)으로 계산하였다. 그림을 살펴보면, Nagel과 Bier⁽⁴⁾의 실험결과는 전 온도범위에서 상대오차 1.1%내로 본 연구결과와 잘 일치하였으며, 정의엽과 김민수⁽⁶⁾의 실험결과도 0.85%내로 잘 일치하고 있다. 그러나 Fujiwara 등⁽¹⁾의 실험결과는 본 연구결과와 상대오차 1.1~4.3%로

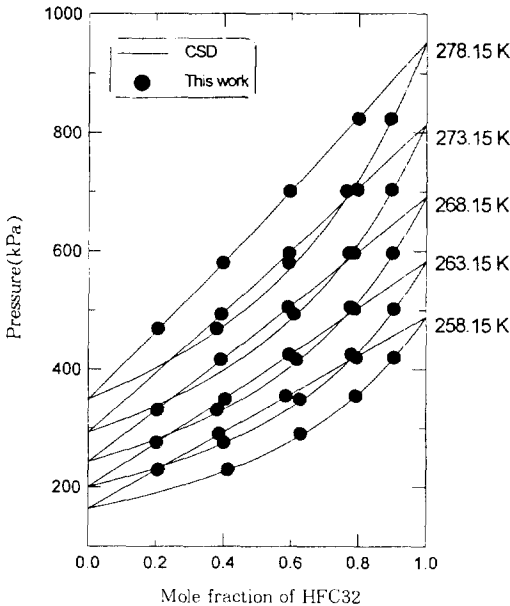


Fig.4 Vapor-liquid equilibrium for the HFC32/134a system in the temperature range of 258.15~278.15K

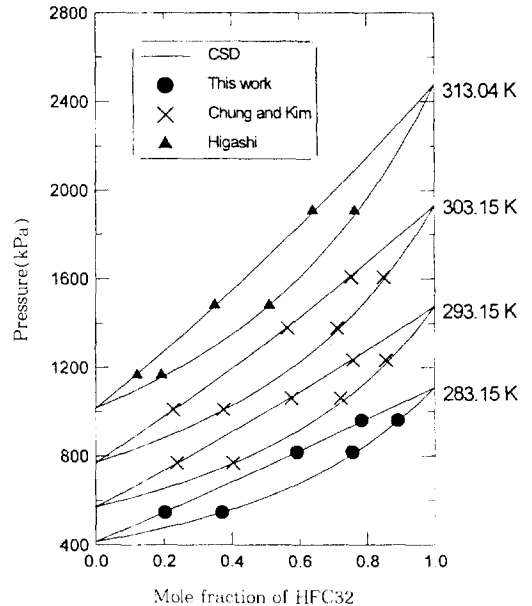
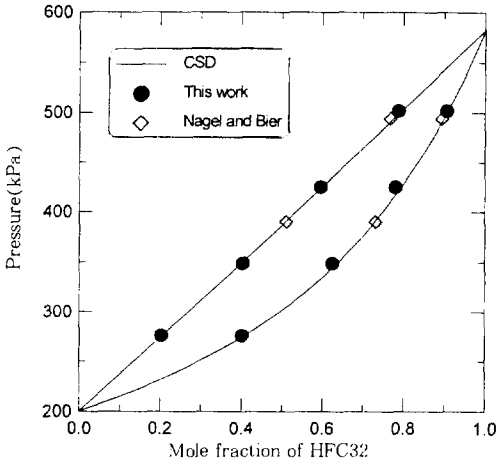
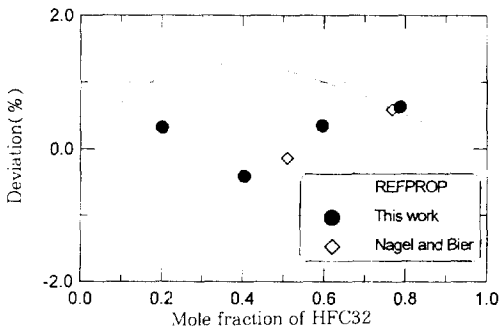


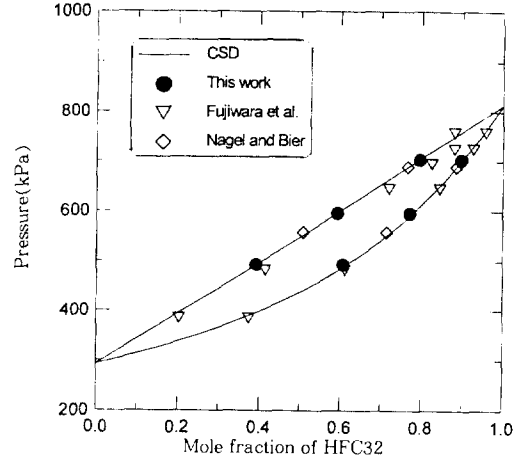
Fig.5 Vapor-liquid equilibrium for the HFC32/134a system in the temperature range of 283.15~314.04K



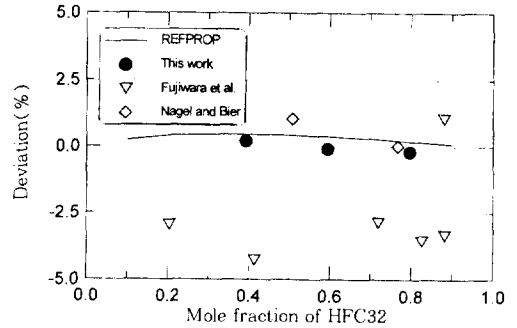
(a) pressure-composition data



(b) relative deviation of bubble point pressure from CSD equation of state



(a) pressure-composition data



(b) relative deviation of bubble point pressure from CSD equation of state

Fig.6 Vapor-liquid equilibrium for the HFC32/134a system at 263.15K

Fig.7 Vapor-liquid equilibrium for the HFC32/134a system at 273.15K

약간의 차이를 보였으며, Higashi⁽³⁾의 실험결과는 상대오차 0.5~9.0%로 가장 큰 차이를 보이고 있다.

REFPROP으로 계산한 결과는 전 온도범위에서 상대오차 0.05~1.3%로 본 연구결과와 잘 일치하였다. REFPROP⁽¹²⁾의 경우는 HFC32/134a의 2 성분 상호작용계수를 -0.01로 온도에 무관한 상수로 사용하고 있다.

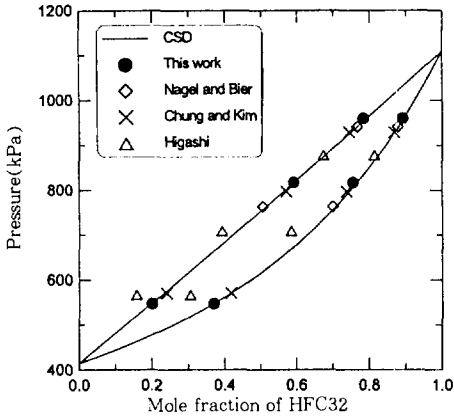
5. 결 론

본 연구에서는 기-액상평형 실험장치를 구성하여

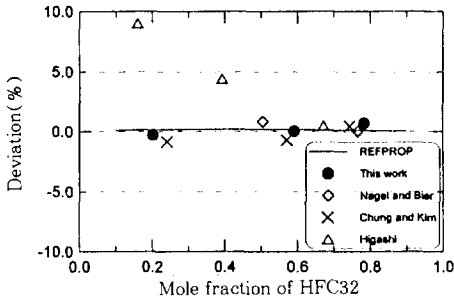
HFC32/134a의 기-액상평형 실험을 4가지 물분율에 대하여 258.15K~283.15K 온도범위에서 수행하였으며 그 결과를 토대로 CSD 상태방정식으로 상호작용계수를 구하였다. 또한 다른 연구자의 연구 결과를 이용하여 313.04K까지 온도 범위를 확대하여 총 9개의 등온과정에 대한 상호작용 계수를 구하였다.

CSD 상태방정식으로 계산한 상호작용계수는 온도에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 -0.015~ -0.011내에 존재하였다.

CSD 상태방정식의 계산결과와 Nagel과 Bier, Fujiwara 등, Higashi, 정의엽과 김민수등의 실험



(a) pressure-composition data



(b) relative deviation of bubble point pressure from CSD equation of state

Fig.8 Vapor-liquid equilibrium for the HFC32/134a system at 283.15K

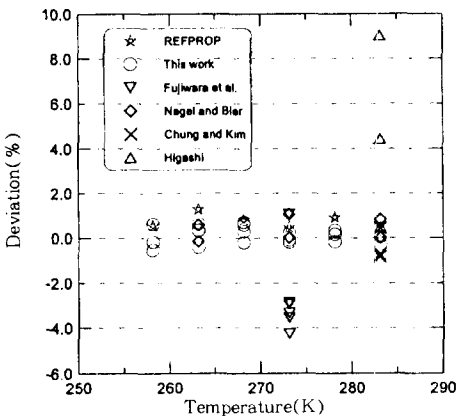


Fig.9 Relative deviation of bubble point pressure from CSD equation of state for HFC32/134a system with respect to temperature

Table 2 Vapor-liquid equilibrium data for HFC32/134a mixture

T(K)	P(kPa)	Mole fraction of HFC32	
		Liquid	Vapor
258.15	229.455	0.2070	0.4121
	290.424	0.3865	0.6279
	354.546	0.5835	0.7910
	420.146	0.7938	0.9066
263.15	275.818	0.2021	0.4004
	349.036	0.4035	0.6249
	502.088	0.7876	0.9053
268.15	331.250	0.2045	0.3810
	416.683	0.3915	0.6163
	505.227	0.5915	0.7768
273.15	596.825	0.7865	0.9015
	493.330	0.3923	0.6080
	596.784	0.5938	0.7724
278.15	703.556	0.7966	0.8984
	468.673	0.2059	0.3789
	580.657	0.3978	0.5927
	700.902	0.5967	0.7649
283.15	823.856	0.7987	0.8944
	547.511	0.2019	0.3704
	817.642	0.5923	0.7563
	960.186	0.7844	0.8917

결과, 그리고 REFPROP의 계산결과를 비교하였다. REFPROP 계산결과는 0.05~1.3% 내에서 본 연구결과와 잘 일치하였으며, Nagel과 Bier의 결과는 1.1% 내에서, 정과 김의 결과는 0.85% 내에서 잘 일치하였다. 그러나 Fujiwara 등의 결과는 약 1.1~4.3%로 약간의 차이가 있었으며 특히 Higashi의 결과는 0.5~9.0%로 가장 큰 차이를 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원(KIST)의 대체 CFC 기술 센터의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Fujiwara, K. Momoto, H., and Noguchi, M., 1992, "Vapor-Liquid Equilibria of HFC-32 Mixtures," Proc. of the 13th Japanese Symp. on Thermophys. Prop., pp.61~64.
2. Higashi, Y., "Vapor-liquid equilibrium, coexistence curve and critical locus for binary R-32/125 mixture," 개인접촉.
3. Higashi, Y., 1995, "Vapor-liquid equilibrium, coexistence curve and critical locus for binary R-32/134a mixture," Int. J. of Thermophysics, Vol.16, No.5, pp.1175~1184.
4. Nagel, M. and Bier, K., 1995, "Vapor-liquid equilibrium of ternary mixtures of the refrigerants R32, R125 and R134a," Int. J. Refrig., Vol.18, No.8, pp.534~543.
5. Nagel, M. and Bier, K., 1996, "Vapor-liquid equilibrium of ternary mixtures of the refrigerants R125, R143a and R134a," Int. J. Refrig., Vol.19, No.4, pp.264~271.
6. 정의엽, 김민수, 1996, "R-32/134a 혼합냉매의 기상-액상 평형," 공기조화 냉동공학회, 하계학술발표논문집, pp.66~70.
7. 김선옥, 1989, "고압 상평형 측정 실험," 화학공업과 기술, 제7권, 제4호, pp.10~18.
8. Morrison, G. and McLinden, M. O., 1986, NBS Technical Note, 1226.
9. Knoler, C. M., 1978, "Volumetric Properties of Gaseous Mixtures, in Specialist Periodical Reports," Chemical Thermodynamics, vol.2, pp.199~237.
10. Pursuit, D. R., 1957, Ind. Eng. Chem. Fundam., 8, 151.
11. McLinden, M. O., Huber, M. L., and Octcalt, S. L., 1993, "Thermophysical Properties of Alternative Refrigerants: Status of the HFCs," ASME Winter Annual Meeting, Nov.28-Dec.3, New Orleans, Louisiana.
12. NIST, 1993, REFPROP version 4.01, Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.