

이산화탄소, HFC-134a, HCFC-22의 열역학적 상태량 계산 절차의 응용

박 형 준, 박 경 근^{†*}

국민대학교 기계공학과 대학원, *국민대학교 기계자동차공학부

Application of Procedures to Calculate Thermodynamic Properties of Carbon Dioxide, HFC-134a and HCFC-22

Hyoung Joon Park, Kyoung Kuhn Park^{†*}

Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received December 12, 2002; revision received March 28, 2003)

ABSTRACT: Systematic methods to calculate thermodynamic properties of carbon dioxide, HFC-134a and HCFC-22 are presented. First, application of a basic method to identify the saturation state with given temperature or pressure is attempted and the feasibility of auxiliary equations is tested. Next, detailed procedures are suggested to tell a phase when temperature/pressure and another property are specified. Finally Newton-Raphson method is applied to calculate unknown thermodynamic properties fixing the state with the two independent properties specified. The procedures described here are utilized to develop a computer program, which is used to find the relation between temperature and pressure with maximum isobaric heat capacity for super-critical carbon dioxide.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), HFC-134a, HCFC-22, Property calculation(상태량 계산), Thermodynamic property(열역학적 상태량)

기 호 설 명

a : Helmholtz 함수 [kJ/kg]
 C_p : 정압 비열 [kJ/kg K]
 C_v : 정적 비열 [kJ/kg K]
 g : Gibbs 함수 [kJ/kg]
 GWP : 지구온난화지수
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 NBP : 대기압 끓는점

ODP : 오존층 파괴지수
 P : 압력 [kPa]
 R : 기체상수 [kJ/kg K]
 s : 엔트로피 [kJ/kg K]
 T : 온도 [K]
 u : 내부 에너지 [kJ/kg]
 v : 비체적 [m³/kg]
 w : 음속 [m/s]

그리스 문자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4679; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: pkk@kookmin.ac.kr

ϕ : 무차원 Helmholtz 함수
 ρ : 밀도 [kg/m³]

- δ : 환산 밀도(= ρ/ρ_c)
 τ : 환산 온도의 역수(= T_c/T)
 μ_J : Joule-Thomson 계수 [K/kPa]

상첨자

- 0 : 이상 기체 Helmholtz 함수
 r : 잔류 Helmholtz 함수

하첨자

- c : 임계점
 f : 포화 액체
 g : 포화 증기
 n : 반복 계산 횟수
 r : 환산 상태량
 s : 포화

1. 서 론

열시스템을 설계하기 위하여 열역학적 특성 파악, 즉 상태량의 계산이 필요하다. 이러한 열역학적 상태량을 구하기 위해서는 이상 기체 비열과 상태방정식이 요구되며, 이들은 장기간의 정밀한 실험을 통해 얻어진 측정자료를 근거로 만들어진 다. 바람직한 상태방정식은 증기상과 액체상에서 물질의 거동을 잘 나타낼 수 있어야 하며 포화상태도 재현할 수 있어야 하므로 그 형태가 복잡하다. 따라서 상태방정식을 이용하여 열역학적 상태량을 수작업으로 계산하는 것은 거의 불가능하므로 컴퓨터를 주로 이용하여야 하며, 이러한 작업을 적절히 수행하는 전산 프로그램의 개발이 필요하다.

위의 내용과 관련된 기존 전산 프로그램의 예로서 ASME 수증기표를 재현하는 H2OCALC,⁽¹⁾ 일본 큐슈대의 PROPATH,⁽²⁾ 미국 Idaho대의 ALLPROP,⁽³⁾ 그리고 주로 혼합냉매의 상태량 계산을 위해 개발된 NIST의 REFPROP⁽⁴⁾ 등이 있다. 또한, 스프레드시트형 프로그램인 H2OTAB과 CO2TAB,⁽⁵⁾ 웹 상에서 온라인으로 상태량값을 제공하는 NIST의 Webbook⁽⁶⁾ 등도 있다.

이러한 외국의 다양한 전산 프로그램과 비교되는 국내의 프로그램은 아직까지는 없다고 판단된

다. 따라서 본 연구에서는 두 개의 독립 상태량이 주어진 상태에서 이산화탄소, HFC-134a, HCFC-22의 미지 상태량을 계산하기 위해 필요한 체계적인 절차를 검토하고 이를 활용하는 전산 프로그램을 개발하며, 응용예로서 초임계 이산화탄소의 정압 비열이 최고가 되는 온도와 압력의 관계식을 파악하고자 한다.

2. 상태방정식

본 연구에서 다루고자 하는 대상물질인 이산화탄소, HFC-134a, HCFC-22의 상태방정식은 신뢰성이 있으며 가장 최근에 발표된 논문에서 제시된 것으로서 Span and Wagner,⁽⁷⁾ Tillner-Roth and Baehr,⁽⁸⁾ Kamei et al.⁽⁹⁾의 식을 각각 선정·사용하였으며, 모두 다음과 같은 무차원 Helmholtz 함수 형태이다.

$$\phi = \frac{a}{RT} \quad (1)$$

여기서 $a = u - Ts$ 이다. 이렇게 Helmholtz 함수를 사용하는 이유는 모든 열역학적 상태량을 미분과 간단한 대수 연산을 통해 유도할 수 있어 정확성과 열역학적 일관성(thermodynamic consistency)을 유지할 수 있기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 단순히 $P-v-T$ 상태방정식과 이상 기체 비열을 사용하는 경우에는 상태량을 유도할 때 적분을 해야

Table 1 Summary on the equations of state

Carbon dioxide	HFC-134a	HCFC-22
Equation of state		
Span & Wagner (1996)	Tillner-Roth & Baehr (1994)	Kamei et al. (1995)
Temperature range (K)		
216~1100	170~455	200~550
Pressure range (MPa)		
0~800	0~70	0~60
Uncertainty		
Density 0.03~0.05%	Density 0.05%	Density 0.1%
Speed of sound 0.03~1%	Vapor pressure 0.02%	Speed of sound 0.1%
Heat capacity 0.15~1.5%	Heat capacity 0.5~1.0%	Heat capacity 0.5%

Table 2 Characteristic data for carbon dioxide, HFC-134a and HCFC-22

Property / Index	Carbon dioxide	HFC-134a	HCFC-22
Chemical formula	CO ₂	CF ₃ -CH ₂ F	CHClF ₂
Molecular weight	44.0098 kg/kmol	102.032 kg/kmol	86.469 kg/kmol
Gas constant	0.188924 kJ/kg · K	0.0814889 kJ/kg · K	0.096156 kJ/kg · K
Critical point			
Temperature	304.1282 K	374.21 K	369.295 K
Pressure	7.3773 MPa	4.0593 MPa	4.990 MPa
Density	467.6 kg/m ³	511.95 kg/m ³	523.85 kg/m ³
Triple point			
Temperature	216.592 K	169.85 K	115.73 K
Pressure	0.51795 MPa	0.391 kPa	0.37904 Pa
Others			
NBP	194.65 K	225.92 K	232.34 K
GWP	1	1300	1700
ODP	0	0	0.05

하며 이때 상수가 나타나는 불편함이 있다. 식(1)의 $\phi(\delta, \tau)$ 는 다음과 같이 이상기체항 $\phi^0(\delta, \tau)$ 와 잔류항 $\phi^r(\delta, \tau)$ 로 구성된다.

$$\phi(\delta, \tau) = \phi^0(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau) \quad (2)$$

여기서, $\delta = \rho/\rho_c$, $\tau = T_c/T$ 이며 ρ 는 밀도, T 는 절대온도, ρ_c 는 임계밀도, T_c 는 임계온도를 각각 나타낸다. 식(2)의 $\phi^0(\delta, \tau)$ 와 $\phi^r(\delta, \tau)$ 의 형태에 대한 자세한 내용은 참고문헌^(7,8,9)에 있으며, 각 상태방정식의 적용범위와 예상 최대 오차는 Table 1에, 대상물질의 특성치는 Table 2에 나열하였다.

3. 포화상태의 결정

3.1 포화온도가 주어진 경우

주어진 온도에 대응하는 포화상태는 Gibbs 함수의 특성을 이용하여 결정할 수 있다. 포화상태에서 액체의 Gibbs 함수 g_f 와 증기의 Gibbs 함수 g_g 는 서로 같다. 즉

$$g_f = g_g \quad (3)$$

이다. 또한

$$g_g - g_f = \int_f^g v dP = 0 \quad (4)$$

이므로

$$I \equiv \int_f^g v dP \quad (5)$$

로 정의하면

$$I = g_g - g_f = - \int_f^g (P - P_s) dv = 0 \quad (6)$$

이 성립된다. 여기서 P_s 는 주어진 온도 T 에 대응하는 포화압력이다. 식(6)의 포화압력 P_s 대신 임의의 압력 P_x 를 대입하면

$$I = (P_x - P_s)(v_g - v_f) \neq 0 \quad (7)$$

이 된다. 여기서 v_g 는 온도 T , 압력 P_x 에서 상태방정식을 이용하여 계산한 증기 영역에서의 비체적이며, v_f 는 액체 영역에서의 비체적이다.

식(6)과 식(7)을 이용하면 주어진 온도에 대한

포화압력을 반복 계산을 거쳐 결정할 수 있으며 열역학적 일관성을 유지할 수 있다. 그러나 계산 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 이를 피하기 위한 수단으로서 포화액체 밀도, 포화증기 밀도, 포화증기압 상관식이 상태방정식과 함께 제시되어 있다.^(7,8,11) 이러한 보조방정식을 이용하는 경우 계산시간은 상당히 단축되지만 열역학적 일관성은 다소 잃어버리게 되므로 보조방정식의 정확도를 확인할 필요가 있다.

각 대상물질의 상태방정식을 이용하여 계산한 포화압력과 함께 제시된 포화증기압 상관식을 이용하여 계산한 포화압력을 비교한 결과 이산화탄소의 경우는 0.002%, HCFC-22의 경우는 0.01% 정도의 아주 작은 편차를 보였다. 따라서 증기압 상관식이 충분히 정확하므로 제시된 증기압 상관식^(7,11)을 그대로 사용하여 계산시간을 단축하기로 하였다. 포화액체 밀도, 포화증기 밀도 상관식도 1.0% 이내의 편차를 보였으므로 각종 계산에서 초기값을 구하는 수단으로 활용하기로 하였다. 그러나 HFC-134a의 경우⁽⁸⁾ 계산한 결과에 무시할 수 없는 차이(최대편차 1.7%)가 있음을 발견하였다. 마찬가지로 포화증기 밀도의 경우에도 최대 4.1%의 편차가 있었다. 반면에 그들이 제시한 포화액체 밀도 상관식의 편차는 최대 0.02%이었다. 따라서 열역학적 일관성의 유지와 빠른 계산을 위하여 성능이 향상된 새로운 증기압 곡선식과 포화증기 밀도 상관식이 필요하다고 판단하였다.

본 연구에서 증기압 곡선식을 사용하는 목적은 실제 실험데이터를 재현하는 것이 아니라 상태방정식을 이용하여 구한 포화압력을 충실히 나타내는 것이다. 따라서 HFC-134a의 경우 주어진 온도에서의 포화압력을 상태방정식을 이용하여 생성한 후 그 자료를 정확히 재현하는 상관식⁽¹²⁾을 다음과 같이 구하였다.

$$\ln P_s/P_c = b_1\beta + b_2\beta^{1.5} + b_3\beta^2 + b_4\beta^{3.5} \quad (8)$$

여기서 $\beta = \tau - 1$, P_c 는 임계압력이다. 마찬가지로 방법으로 다음과 같이 포화증기 밀도 상관식⁽¹³⁾도 새로 구하였다.

$$\ln \rho_g/\rho_c = c_1\beta^{1/3} + c_2\beta^{2/3} + c_3\beta^{1/2} + c_4\beta^{1.5} + c_5\beta^2 \quad (9)$$

Table 3 Coefficients of auxiliary equations

Coefficient	Value	Note
b_1	-7.686556	Eq. (8)
b_2	2.311791	
b_3	-2.039554	
b_4	-3.583758	
c_1	-2.0043	Eq. (9)
c_2	-4.0986	
c_3	1.0277	
c_4	-2.4757	
c_5	0.62373	

식(8)과 식(9)의 계수값은 Table 3에 나열되어 있다. 이렇게 구한 보조방정식을 이용하여 계산한 결과와 상태방정식의 결과를 비교하면 최대편차가 포화압력에 대하여 0.025%, 포화증기 밀도에 대하여 0.5%가 되어 원래의 보조방정식보다 향상된 결과를 보였다.

3.2 포화압력이 주어진 경우

주어진 포화압력에 대응하는 포화온도는 다음과 같이 Newton-Raphson 방법으로 구할 수 있다.

$$T_{n+1} = T_n - \frac{P_s(T_n) - P_s}{dP_s/dT} \quad (10)$$

여기서 n 은 반복 계산 횟수이며, dP_s/dT 는 포화증기압 상관식을 이용하여 계산한다. 이렇게 포화온도를 결정한 뒤의 계산 절차는 3.1절과 같다.

4. 온도가 주어진 경우 상태량 계산

4.1 온도와 비체적이 주어진 경우

우선 온도가 임계온도 이상인 경우에는 Helmholtz 함수를 이용하여 다음과 같이 압력을 바로 결정할 수 있다.

$$P = \rho RT(1 + \delta\phi_s^r) \quad (11)$$

여기서 R 은 기체상수 $\phi_s^r = \partial\phi^r/\partial\delta$ 이다.

다른 상태량들도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = RT[1 + \tau(\phi_\tau^o - \phi_\tau^r) + \delta\phi_\delta^r] \quad (12)$$

$$s = R[\tau(\phi_\tau^o + \phi_\tau^r) - \phi^o - \phi^r] \quad (13)$$

$$u = h - Pv \quad (14)$$

$$g = h - Ts = a + Pv \quad (15)$$

$$C_v = -R\tau^2(\phi_{\tau\tau}^o - \phi_{\tau\tau}^r) \quad (16)$$

$$C_p = C_v - T[(\partial P/\partial T)_v]^2/(\partial P/\partial v)_T \quad (17)$$

$$w = v\sqrt{T/C_v(\partial P/\partial T)_v^2 - \partial P/\partial v}_T \quad (18)$$

$$\mu_j = \frac{v(\partial P/\partial v)_T + T(\partial P/\partial T)_v}{T(\partial P/\partial T)_v - C_v(\partial P/\partial v)_T} \quad (19)$$

$$\partial P/\partial v)_T = -\rho^2(\partial P/\partial \rho)_T \quad (20)$$

$$\partial P/\partial \rho)_T = RT(1 + 2\delta\phi_\delta^r - \delta^2\phi_{\delta\delta}^r) \quad (21)$$

$$\partial P/\partial T)_v = \rho R(1 + \delta\phi_\delta^r - \delta\tau\phi_{\delta\tau}^r) \quad (22)$$

여기서, $\phi_\tau^o = \partial\phi^o/\partial\tau)_\delta$, $\phi_\tau^r = \partial\phi^r/\partial\tau)_\delta$, $\phi_\delta^o = \partial\phi^o/\partial\delta)_\tau$, $\phi_{\tau\tau}^o = \partial^2\phi^o/\partial\tau^2)_\delta$, $\phi_{\tau\tau}^r = \partial^2\phi^r/\partial\tau^2)_\delta$, $\phi_{\delta\delta}^o = \partial^2\phi^o/\partial\delta^2)_\tau$ 이다. 엔탈피와 엔트로피의 기준값은 온도 273.15 K의 포화 액체상태에서 각각 200 kJ/kg, 1 kJ/kg·K을 사용하였다. 온도가 임계온도 이상인 경우 Fig. 1의 $P-v$ 선도에 나타

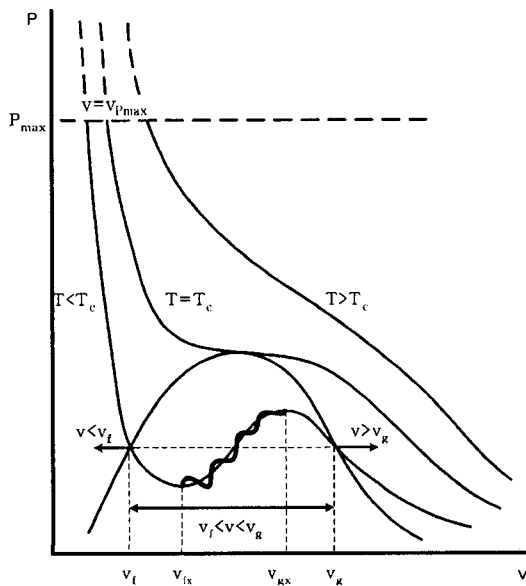


Fig. 1 $P-v$ diagram.

Table 4 Coefficients of equation (22)

Substance	Coefficient		
	A	B	C
Carbon dioxide	1773.11	-0.96148	3.16110e-4
HFC-134a	2034.95	-2.34027	7.33299e-4
HCFC-22	1901.23	-1.83736	0

낸 바와 같이 비체적의 최소값 v_{Pmax} 가(상태방정식의 적용이 가능한) 최고 압력 P_{max} 에서 존재하며, $v \geq v_{Pmax}$ 이어야 한다는 것에 주의하여야 한다. v_{Pmax} 는 상태량표^(7,8,9)에 나와 있는 자료를 이용하여 다음과 같이 수식화하였다.

$$v_{Pmax} = A + BT + CT^2 \quad (23)$$

여기서 계수 A, B, C의 값은 Table 4에 있다.

온도가 임계온도 이하인 경우에는 다음과 같이 상을 판단한 후 상태량을 계산한다.

- (1) $v < v_f$ 이면 압축액체
- (2) $v > v_g$ 이면 과열증기
- (3) $v_f \leq v \leq v_g$ 이면 포화상태

압축액체의 경우에도 $v \geq v_{Pmax}$ 를 만족해야 한다. 포화상태인 경우 $x = (v - v_f)/v_{fg}$ 를 이용하여 건도를 구할 수 있다.

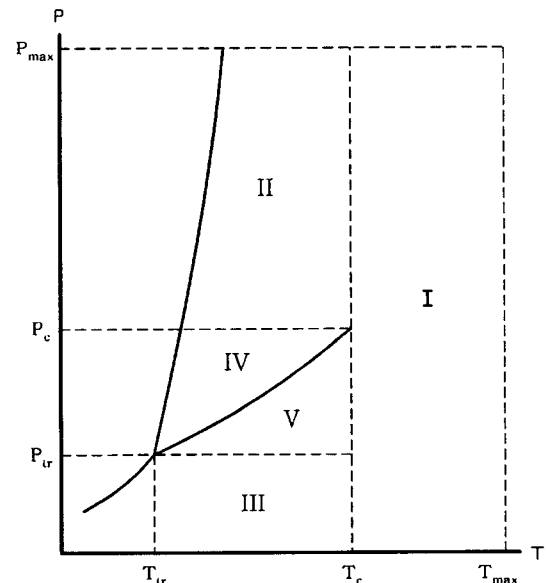


Fig. 2 $P-T$ diagram.

4.2 온도와 압력이 주어진 경우

먼저 $P-T$ 선도상의 영역을 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 초임계(영역 I), 과열증기(영역 III, V), 압축액체(영역 II, IV) 등으로 나눈다. 온도값과 압력값에 따라 영역과 비체적의 구간을 확정할 수 있다.

비체적의 구간을 확정된 뒤에는 그 구간 내에서 다음과 같이 Newton-Raphson 방법을 이용하여 비체적을 최종 결정한다.

$$v_{n+1} = v_n - \frac{P(T, v_n) - P}{\partial P / \partial v}_T \quad (24)$$

여기서 n 은 반복계산 횟수이며, 편도함수 $\partial P / \partial v}_T$ 는 식(20), (21)을 이용하여 계산한다.

4.3 온도와 엔트로피가 주어진 경우

온도와 엔트로피가 주어진 경우는 비체적을 조절하여 정해지는 (T, v) 상태에서 계산한 엔트로피가 주어진 엔트로피와 같아지도록 한다. 온도값과 엔트로피값에 따라 영역과 비체적의 구간을 확정할 수 있다. 압축액체의 경우에 $s \geq s_{P_{\max}}$ 를 만족해야 한다. $s_{P_{\max}}$ 는 최고압력(Table 1의 P_{\max} 또는 용해곡선을 이용하여 결정함)에서 압축액체의 엔트로피이다. 포화상태이면 $x = (s - s_f) / s_{fg}$ 를 이용하여 건도를 계산한다.

비체적의 구간을 확정된 뒤에는 그 구간 내에서 다음과 같이 Newton-Raphson 방법을 이용하여 비체적을 최종 결정한다.

$$v_{n+1} = v_n - \frac{s(T, v_n) - s}{\partial s / \partial v}_T \quad (25)$$

여기서는 Maxwell 관계식 $\partial s / \partial v}_T = \partial P / \partial T}_v$ 을 적용하며, 편도함수 $\partial P / \partial T}_v$ 는 식(22)를 이용하여 계산한다.

5. 압력이 주어진 경우 상태량 계산

5.1 압력과 비체적이 주어진 경우

우선 주어진 압력에 대해 $T = T_c$ 일 때 비체적

v_x 를 계산한다. 그후 압력값과 비체적값에 따라 영역과 온도구간을 확정할 수 있다. 포화상태인 경우 $x = (v - v_f) / v_{fg}$ 를 이용하여 건도를 구할 수 있다. 구간이 확정되면 다음과 같이 Newton-Raphson 방법으로 온도를 최종 결정한다.

$$T_{n+1} = T_n - \frac{v(T_n, P) - v}{\partial v / \partial T}_P \quad (26)$$

여기서 열역학 관계식

$$\partial v / \partial T}_P = - \frac{\partial P / \partial T}_v}{\partial P / \partial v}_T \quad (27)$$

을 이용하며 $\partial P / \partial v}_T$ 와 $\partial P / \partial T}_v$ 는 각각 식(20), (21), (22)를 이용하여 구할 수 있다.

5.2 압력과 엔탈피가 주어진 경우

압력과 엔탈피가 주어진 경우는 온도를 조절하여 정해지는 (T, P) 상태에서 계산한 엔탈피가 주어진 엔탈피와 같아지도록 한다. 우선 주어진 압력에 대해 $T = T_c$ 일 때 엔탈피 h_x 를 계산한다. 그후 압력값과 엔탈피값에 따라 영역과 온도구간을 확정한다. 구간이 확정되면 다음과 같이 Newton-Raphson 방법으로 온도를 최종 결정한다.

$$T_{n+1} = T_n - \frac{h(T_n, P) - h}{\partial h / \partial T}_P \quad (28)$$

여기서 $\partial h / \partial T}_P = C_P$ 이며, C_P 는 식(17)을 이용하여 구한다.

5.3 압력과 엔트로피가 주어진 경우

압력과 엔트로피가 주어진 경우에도 5.1절의 압력과 비체적이 주어진 경우와 유사한 방법으로 온도를 조절하여 정해지는 (T, P) 상태에서 계산한 엔트로피가 주어진 엔트로피와 같아지도록 한다. 구간이 확정되면 다음과 같이 Newton-Raphson 방법으로 온도를 최종 결정한다.

$$T_{n+1} = T_n - \frac{s(T_n, P) - s}{\partial s / \partial T}_P \quad (29)$$

여기서 $\partial s/\partial T)_P = C_P/T$ 이며, C_P 는 식(17)을 이용하여 구한다.

6. 상태량 계산 절차의 활용

이상과 같은 절차를 활용하여 두 개의 독립 상태량이 주어지는 경우 이산화탄소, HFC-134a, HCFC-22의 열역학 상태량을 계산하는 전산 프로그램을 개발하였다. 계산결과와 정확성은 NIST Webbook⁽⁶⁾의 결과와 비교하여 확인하였다. 또한 초임계 이산화탄소의 정압비열이 최대가 되는 온도와 압력에 대한 관계를 파악하였다.

이산화탄소를 사용하는 냉동시스템은 초임계 사이클이 된다. 따라서 초임계 과정이 일어나는 가스쿨러(gas cooler)의 열전달 특성에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. Olson⁽¹⁴⁾은 가스쿨러 열전달 특성에 대한 실험적 연구에서 열교환 온도가 정압비열이 최대가 되는 온도(T_m)에 근접할 때 열전달계수가 증대된다고 보고하였다. 따라서 주어진 압력에 대한 T_m 값을 파악하는 것이 중요하다. Fig. 3은 주어진 압력에서 온도에 따른 정압비열의 변화이며, 최대 정압비열이 존재함을 알 수 있다. 정압비열의 최대값은 임계압력에 접근할수록 증대하며 임계점에서는 무한대가 된다. 반면에 압력이 커질수록 최대 정압비열은 작아지며 14 MPa 이상에서는 최대점이 거의 관측되지 않는다. T_m 과 압력의 관계는 Fig. 4와 같다. 그래프에 약간의 곡률이 있으므로 다음과 같은 식을 이

용하여 나타내었다.

$$y = ax + bx^2 \tag{30}$$

여기서 $x = P_r - 1$, $y = T_r - 1$ 이고, $P_r = P/P_c$, $T_r = T/T_c$ 이다. 곡선 접합의 결과 $a = 0.14282$, $b = -0.035465$ 이며 이 관계식의 최대편차는 0.25%이다. 식(30)은 압력범위 $P_c \leq P \leq 14 \text{ MPa}$, 온도범위 $T_c \leq T \leq 335 \text{ K}$ 에서 사용이 가능하다.

7. 결론

이산화탄소, HFC-134a, HCFC-22의 열역학 상태량을 계산하는 절차를 검토하였다. 열역학적 일관성을 유지하고, 계산속도를 향상시키며, 적용범위를 적절히 제한하기 위해 필요한 보조방정식들을 개발하였다. 온도와 비체적, 온도와 압력, 온도와 엔트로피, 압력과 비체적, 압력과 엔탈피, 압력과 엔트로피가 주어진 경우에 상을 결정하고 비체적 또는 온도를 구하여 다른 미지의 상태량을 계산하는 방법을 표준화하여 제시하였다. 이 절차를 이용하여 이산화탄소, HFC-134a, HCFC-22의 열역학 상태량 계산을 위한 전산 프로그램을 작성하였으며, 그 응용예로 초임계 이산화탄소의 정압비열이 최대가 되는 온도와 압력의 관계를 나타내는 새로운 상관식을 개발·제시하였다.

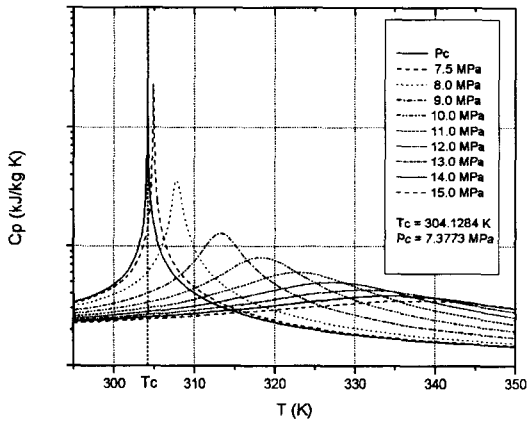


Fig. 3 Isobaric heat capacity versus temperature diagram for CO₂.

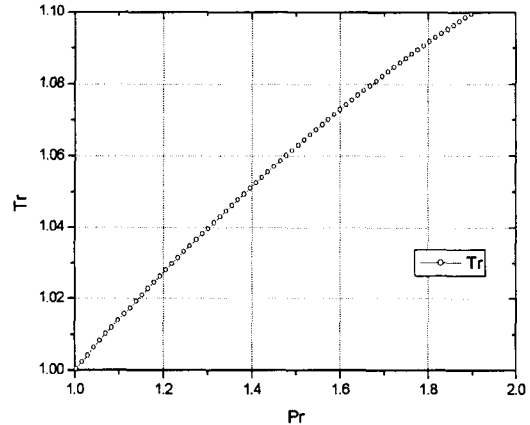


Fig. 4 $P_r - T_r$ diagram for carbon dioxide.

참고문헌

1. <http://www.winsim.com/steam/steam.html>
2. <http://www.propath.mech.kyushu-u.ac.jp/>
3. <http://www.uidaho.edu/~cats/>
4. McLinden, M. O., Klein, S. A., Lemmon, E. W. and Peskin, A. P., 1998, NIST Thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures database (REFPROP), version 6.0, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
5. <http://www.chemicalogic.com/>
6. <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
7. Span, R. and Wagner, W., 1996, A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 25, No. 6, pp. 1509-1596.
8. Tillner-Roth, R. and Baehr, H. D., 1994, An international standard formulation for the thermodynamic properties of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC-134a) for temperatures from 170 K to 455 K and pressures up to 70 MPa, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 23, No. 5, pp. 657-729.
9. Kamei, A., Beyerlein, S. W. and Jacobsen, R. T., 1995, Application of nonlinear regression in the development of a wide range formulation for HCFC-22, International Journal of Thermophysics, Vol. 16, No. 5, pp. 1155-1164.
10. Moran, M. J. and Shapiro, H. N., 1993, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, SI ed., John Wiley and Sons, New York, p. 472.
11. Wagner, W., Mark, V. and Pruß, A., 1993, A new equation of state for chlorodifluoromethane (R22) covering the entire fluid region from 116 K to 550 K at pressures up to 200 MPa, Int. J. Refrig., Vol. 16, No. 6, pp. 373-389.
12. Park, K. K., 2001, A preliminary study on the form of vapor pressure equation for refrigerants, Proceedings of the SAREK 2001 Winter Annual Conference, pp. 133- 137.
13. Park, K. K., 1998, A new type of saturated vapor density correlation for refrigerants, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 550-557.
14. Olson, D. A., 2000, Heat transfer of supercritical carbon dioxide flowing in a cooled horizontal tube, IIF-IIR Commission B1, BE, E1, and E2, Purdue University, USA, pp. 251-258.