

R-134a의 열역학적 물성치 계산과 냉동 성능에 관한 연구

Calculation of the Thermodynamic Properties of R-134a and A Preliminary Study of the Refrigeration Performance

박 영 무* 이 홍 원**
Y. M. Park, H. W. Lee

Key Words: CFC Alternatives (대체냉매), R134a, Thermodynamic Properties(열역학적 물성치), Refrigeration Performance(냉동성능)

ABSTRACT

The thermodynamic properties of R134a, the prospective R12 alternative, have been computerized using Martin-Hou equation of state and the coefficients given by Willson-Basu. Several experimental results in literatures for PVT data, saturated vapor pressure, saturated liquid density are compared with the calculated results to investigate the accuracy. The average deviation (max. deviation) is 0.13% (0.25%) for saturated liquid density, 0.25% (0.8%) for PVT data. Thermodynamic properties, enthalpy, entropy are compared with the NIST's. The maximum percent difference is 3% for saturated liquid enthalpy, 1.5% for saturated vapor enthalpy, 4% saturated liquid entropy, and 0.7% for saturated vapor entropy. Correction of W-B's coefficients and inclusion of the sixth term of M-H EOS for improvement of accuracy are recommended.

R134a and R12 are compared with respect to refrigeration performance. COP's are different from each other within 3%. Refrigeration effect of R134a is superior to that of R12 but refrigeration capacity of R134a is inferior to that of R12 because the volumetric efficiency of the system using R134a is lower than that of the system using R12.

기 호 설 명

<p>C : 압축기 틸세 체적율</p> <p>D : 압축기 배제 체적</p> <p>dT_{sc} : 응축기 과냉도</p> <p>dT_{sh} : 증발기 과열도</p>	<p>E_{ci} : 압축기 등엔트로피 효율</p> <p>E_{con} : 응축기 효율</p> <p>E_{va} : 압축기 실제 체적 효율</p> <p>E_{vi} : 압축기 이론 체적 효율</p> <p>C_p : 정압비열(kJ/kgK)</p> <p>C_v : 정적비열(kJ/kgK)</p>
--	--

* 정회원, 아주대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 삼성전자종합연구소

- d_f : 포화액 밀도(kg/m³)
- h : 엔탈피(kJ/kg)
- h_o : 기준점에서의 엔탈피(kJ/kg)
- h_{fg} : 잠열(kJ/kg)
- mc_p : 냉각수 열용량(kW/K)
- P : 압력(kPa)
- P_c : 임계압력(kPa)
- P_s : 포화증기압력(kPa)
- Q_{com} : 응축기 용량(kW)
- Q_{evp} : 증발기용량(kW)
- r : 압축기 체적 효율비(E_{va}/E_{vi})
- s : 엔트로피(kJ/kgK)
- s_o : 기준점에서의 엔트로피(kJ/kgK)
- T : 온도(°C)
- T_{ai} : 응축기 냉각수 입구온도(°C)
- T_c : 임계온도(°C)
- T_{com} : 응축기 온도(°C)
- v : 비체적(m³/kg)
- Vs : 음속(m/sec)
- W_{com} : 압축기 소요동력(kW)

1. 서 론

지금까지 중요한 냉매로 사용되어 왔던 R-11, R-12, R-114, R-115 등이 오존층파괴와 지구 기온 상승의 주된 요인의 하나임이 밝혀짐에 따라^{1,2)} 급세기 말까지 이들의 사용이 완전히 금지되게 되었다.³⁾ 따라서 이들을 대체할 수 있는 새로운 냉매의 개발은 국제적인 연구의 중요한 과제가 되었다.

대체냉매의 개발은 크게 두가지로 모색되고 있다. 그 한가지는 기존냉매의 특성을 가지며 오존층의 파괴효과가 없거나 작은 새로운 순수물질 개발하는 것이며 다른 한가지는 기존냉매 중에서 오존층 파괴효과가 적은 것들을 적절히 혼합하여 필요한 냉매의 특성을 얻는 것이다. 후자의 생각은 열역학적 측면에서 이미 오래전부터 언급되어 왔다.⁴⁾ 어떠한 방식을 택하건간에 대체냉매를 이용하는 새로운 시스템의 설계를 위해서는 대체냉매의 개발과 함께 이들의 열역학적 물성치에 관한 연구가 필요하다. 공통의 물질을 이용하는 시

스템의 성능해석의 정확성과 일관성을 위하여 그 물질에 관한 표준 혹은 공인된 열-물리적 성질에 관한 물성표가 필요하며 요구되는 정밀도 내에서 편리하게 계산할 수 있어야 한다. R134a에 관한 아직 표준 혹은 공인된 물성표는 없으나 NIST¹⁰⁾의 결과가 가장 최근의 물성표이며 대체냉매의 열물리물성 연구결과의 공용을 위한 노력이 세계적으로 이루어지고 있다.²³⁾

본 연구에서는 R-12 대체용 냉매로서 유력한 R134a의 열역학적 물성치를 Martin-Hou 상태식²⁰⁾과 Willson-Basu¹¹⁾의 연구결과를 이용하여 계산하였으며 열역학의 원리에 입각하여 두개의 물성치(증기영역에서)가 주어지면 다른 물성치를 계산할 수 있도록 열역학적 물성표를 전산화하였다. Willson-Basu¹¹⁾의 계수를 이용한 계산결과의 정확도를 보기위하여, Willson-Basu¹¹⁾ 및 그 이후의 Kubota et al⁵⁾, Kabata et al⁶⁾, Webber⁸⁾와 Piao et al⁹⁾의 실험치를 이용하여 증기압, 포화액의 밀도, PVT실험치와 계산결과를 비교하였다. 열역학적 물성치는 수정 BWR 상태식을 이용하여 계산한 NIST의 결과¹⁰⁾와 비교하였다.

간단한 냉동기 전산모형을 이용하여 R-134a와 R-12 그리고 R-22와 R-502의 냉동 성능을 비교하였다.

2. R-134a의 열역학적 성질

R-134a는 정상 비등점, 증기압, 임계온도, 임계압력 및 임계비체적이 R-12와 유사하나 R-12의 오존파괴 지표(Ozone Depletion Potential, ODP)가 1일때 R-134a의 ODP는 0인 새로운 냉매로서 R12의 유력한 대체냉매로 지목되고 있다.(Table 1)

R-134a의 독성시험은 1993년에 완료예정이라고 하나 R-12의 대체 가능성이 높은 새로운 냉매로서 자동차용 공기조화 장치의 대체냉매로서 연구되었으며^{13,14)} 열펌프 혹은 기타 소형 냉동기의 대체 냉매로 연구되고 있다.^{15,16,17)}

정확한 열-물리적 물성치를 알기위하여 임

Table 1 Thermophysical Properties of R-134a and R-12^{10,11)}

	R-134a	R12
Chemical Formula	CF ₃ CH ₂ F	CCl ₂ F ₂
Molecular Weight	102.3	120.93
Freezing Point (C)	-101.	-158
Normal Boiling Point (C)	-26.5	-29.8
Critical Temperature (C)	101.1	112.1
Critical Pressure(kPa)	4067.	4116.
Critical Density(kg/m ³)	512.2	558.1
Liquid Density at 26.7 °C	1201.1	1304.7
Vapor Pressure at 10 C(kPa)	414.6	423.5
Specific Heat of Liquid at 26.7 °C (kJ/kg K)	1.431	0.871
Specific Heat of Vapor at Constant Pressure (1 atm) (kJ/kg K)	.854	.590
Heat of Vaporization at NBP (kJ/kg)	217.8	167.24
Flammability Limits, vol. %	Non.	Non.
Ozone Depletion Potential	0	1

계값, 증기압, 비등점, 포화액의 밀도, PVT, 열전도계수, 점성 등에 관한 적지 않은 실험적 연구가 수행되고 있으며^{5,6,7,8,9)} 상태식을 이용한 열역학적 성질의 계산에 관한 연구도 있다.^{10,11,12)} 시스템의 성능해석의 정확성과 일관성을 위하여 그 물질에 관한 표준 혹은 공인된 열 물리적 성질에 관한 물성표가 필요하다.

대체냉매의 열물리물성의 공동연구 및 결과의 공유를 위한 노력이 세계적으로 이루어지고 있으나²³⁾ R134a에 관한한 아직 표준 혹은 공인된 물성표는 없으며 NIST¹⁰⁾의 결과가 가장 최근의 물성표이다. 따라서 기존의 물성표를 사용할때 그 물성치의 정밀도를 검토하기 위하여 최근까지 누적된 실험자료와 비교할 필요가 있다.

본 연구에서는 기존냉매의 열역학적 성질 계산에 많이 사용되었던 Martin-Hou²⁰⁾ 상태식과 Willson and Basu¹¹⁾의 연구결과를 이용하여 R134a의 열역학적 물성을 계산하고 그 결과의 정확도를 Willson and Basu¹¹⁾이후에 발표된 자료와 비교한다.

Martin-Hou 상태식은 포화증기 이상 가스 영역에서 유효한 식이므로 포화액의 비체적은

별도의 실험식¹¹⁾으로부터 계산되며, 계산의 편리를 위하여 상태방정식을 이용한 기-액 평형식으로부터 증기압을 계산하지 않고 실험에서 얻은 증기압식¹¹⁾을 이용하여 증기압을 계산한다. 상태식, 증기압식 및 포화액의 비체적식간의 열역학적 일관성은 Clapeyron 식을 통하여 유지한다. 상태식, 증기압, 포화액 밀도 및 이상기체 비열에 관한 일반식은 Martin-Hou²⁰⁾와 같으며, 엔탈피, 엔트로피 계산식은 M-H 상태식에서 유도되며,²⁰⁾ 실제 기체의 비열과 음속에 관한 식은 열역학적 관계식²¹⁾으로부터 유도되며 계산에 필요한 모든 계수는 Willson and Basu¹¹⁾를 이용한다.

상태식 :

$$P = \sum_{i=1}^5 \frac{A_i + B_i + C_i \exp(-KT_r)}{(v-b)^i} + \frac{A_6 + B_6 + C_6 \exp(-KT_r)}{\exp(av)[1 + C' \exp(av)]} \dots\dots (1)$$

$$\left(\frac{dP}{dv}\right)_T = - \sum_{i=1}^5 \frac{i[A_i + B_i + C_i \exp(-KT_r)]}{(v-b)^{i+1}} + [A_6 + B_6 + C_6 \exp(-KT_r)] \times$$

$$\frac{a[1 + 2C' \exp(av)]}{\exp(av)[1 + C' \exp(av)]^2}$$

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_v = \frac{A_1}{(v-b)} + \sum_{i=2}^5 \frac{[B_i - KC_i \exp(-KT_r)T_c]}{(v-b)^i} + \frac{[B_6 - KC_6 \exp(-KT_r)T_c]}{\exp(av)[1 + C' \exp(av)]}$$

증기압 :

$$\ln Ps = g_1 + g_2/T + g_3 T + g_4 T^2 + g_5 (g_6 - T) \ln(g_6 - T)/T \dots\dots\dots (2)$$

포화액의 밀도 :

$$d_f = D_1 + \sum_{i=1}^4 D_i (1 - T_r)^{i/3} \dots\dots\dots (3)$$

엔탈피 :

$$h = h_0 + c_1 T + c_2 T^2/2 + c_3 T^3/3 + c_4 T^4/5 + c_5 \ln(T) - RT + Pv$$

$$\begin{aligned}
 & + \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{A_{i+1}}{i(v-b)^i} + \frac{A_6}{a} \left\{ \frac{1}{\exp(av)} - C' \ln \right. \right. \\
 & \left. \left. \left(1 + \frac{1}{C' \exp(av)} \right) \right\} \right\} + \exp(-KT_r) \\
 & (1+KT_r) \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{C_{i+1}}{i(v-b)^i} + \frac{C_6}{a \exp(av)} \right. \\
 & \left. - \left(\frac{C_6 C'}{a} \right) \ln \left(1 + \frac{1}{C' \exp(av)} \right) \right\} \dots (4)
 \end{aligned}$$

엔트로피 :

$$s = s_0 + c_1 \ln(T) + c_2 T + c_3 T^2/2 + \frac{C_5}{T} + R \ln(P_{ref}(v-b)/RT)$$

$$\begin{aligned}
 & - \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{B_{i+1}}{i(v-b)^i} + \frac{B_6}{a} \left\{ \frac{1}{\exp(av)} \right. \right. \\
 & \left. \left. - C' \ln \left(1 + \frac{1}{C' \exp(av)} \right) \right\} \right\} \\
 & + \frac{K \exp(-KT_r)}{T_c} \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{C_{i+1}}{i(v-b)^i} \right. \\
 & \left. + \frac{C_6}{a \exp(av)} - \left(\frac{C_6 C'}{a} \right) \ln \right. \\
 & \left. \left(1 + \frac{1}{C' \exp(av)} \right) \right\} \dots (5)
 \end{aligned}$$

$$P_{ref} = 101.325 \text{ kPa}$$

잠열 :

$$h_{fg} = T(v_g - v_f) \left(\frac{dP_s}{dT} \right) \dots (6)$$

기준점 :

-40 °C에서 포화액의 엔탈피와 엔트로피의 값이 영이 되도록 h_o 와 s_o 를 결정한다.

이상기체 정압비열 :

$$C_p^* = c_1 + c_2 T + c_3 T^2 + c_4 T^3 + c_5/T \quad (7)$$

정압비열 :

$$C_p = C_v - T \frac{(dP/dT)_v^2}{(dP/dv)_T} \dots (8)$$

정적비열 :

$$C_v = c_1 + c_2 T + c_3 T^2 + c_4 T^3 + c_5/T - R$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{K^2 T \exp(-KT_r)}{T_c^2} \left\{ \sum_{i=1}^4 \frac{C_{i+1}}{i(v-b)^i} \right. \\
 & \left. + \frac{C_6}{a \exp(av)} - \left(\frac{C_6 C'}{a} \right) \right. \\
 & \left. \ln \left(1 + \frac{1}{C' \exp(av)} \right) \right\} \dots (9)
 \end{aligned}$$

음속 :

$$V_s = v \left(\frac{T(dP/dT)_v^2}{C_v} - (dP/dv)_T \right)^{1/2} \dots (10)$$

3. 열역학적 물성치 계산결과 및 비교 검토

Table 2. 3. 4에서 포화액의 밀도, 증기압 및 PVT의 계산값과 실험값을 비교한다.

3.1 포화액의 밀도

Table 2와 Fig. 1에서 실험값과 계산값을 비교한다. 온도범위 -34 ~ +98.5 °C에서 15개의 실험값과 비교결과 오차의 백분율은 -0.25%에서 +0.125%내에 있으며 오차의 절대값의 평균은 0.127, 0.03 절대오차의 표준편차는 0.06, 0.023이다. Piao의 측정범위가 Willson-Basu의 측정범위내에 있음을 고려하면 두 실험값에 다소의 불일치가 예상되며 포화액의 밀도에 관한 충분한 많은 자료를 수집하여 새로운 포화액 밀도 식을 만들 필요도 있다.

Table 2 Comparison of Calculated Saturated Liquid Density(kg/m³) by Eq³⁾ with Ref.⁹⁾ and Ref.¹¹⁾

Reference	Temperature Range (°C)	No. Data	Error Range % , d.	Mean* Dev.%	Standard** Dev. %
Piao et al[9]	40.43 - 98.91	6	-0.25 - +0.125	0.127	0.066
Willson and Basu [11]***	-34.21 - 98.48	9	-0.075 - +0.05	0.030	0.0231

* Mean Deviation $d_m = (\sum |d_i|)/n$ ** Standard Deviation $= [\sum (|d_i - d_m|)^2/n]^{1/2}$ *** Willson and Basu의 실험치

Table 3 Comparison of Calculated Saturated Vapor Pressure by Eq(2 with Ref⁸⁾⁹⁾ and¹¹⁾

Reference	Temperature Range (°C)	No. Data	Error Range % · d _v	Mean* Dev.%	Standard** Dev. %
Webber[8]	40.095 - 95.009	21	-0.03 - -0.001	0.015	0.020
Piao et al[9]	34.86 - 101.1	35	-0.275 - +0.161	0.092	0.057
Willson and Basu [11]***	-62.19 - 95.99	50	-0.703 - +0.561	0.161	0.164

* Mean Deviation $d_m = (\sum |d_i|) / n$ ** Standard Deviation $= (\sum (|d_i| - d_m)^2 / n)^{1/2}$
 *** Willson and Basu 의 실험치

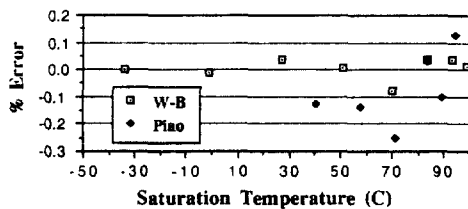


Fig. 1 Comparison of experimental saturated liquid density data with correlation

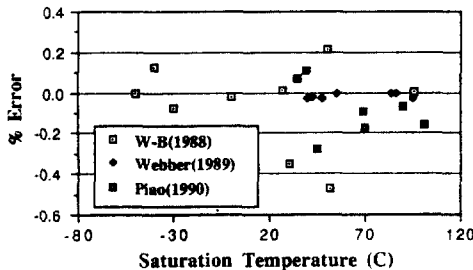


Fig. 2 Comparison of experimental vapor Pressure data with correlation

3. 2 포화증기압

온도범위 - 62 ~ 101 C 사이에 있는 87 개의 자료와 비교하였다. 백분율 오차는 -0.7 %에서 +0.56%에 있다. Webber 및 Piao의 실험치와의 오차가 Willson-Basu의 범위내에 있다. Willson-Basu의 실험값과의 오차가 다른 자료에 비하여 큰것은 온도범위가 넓기때 문이라 생각된다. 상세한 비교는 Table 3에 있으며 Fig. 2는 백분율 오차의 분포를 보여 준다.

3. 3 증기 영역 PVT

밀도범위 2.0 kg/m³에서 508 kg/m³ 과 온도 범위 48 °C에서 175 °C 사이의 121 점의 값을 비교하였다. 최대백분율 오차는 Piao et al의 실험값과 비교할때이며 -0.8%에서 +0.8% 사이에 있다. 평균 절대오차는 0.25%, 표준 편차는 0.24%이다. Willson-Basu의 평균오차 0.0876%에 비하여 Webber 및 Piao et al의 오차는 0.18~0.25%에 이른다. 새로운 자료를 첨가하여 M-H 상태식의 Willson-Basu의 계수를 수정할 필요가 있으며 특히 Willson-Basu가 무시하고 있는 상태식, 식(1), 마지막항의 계수(A₆, B₆, C₆, a)에 대한 수정의 필요가 있다.

Table 4 Comparison of Calculated Pressure or Density by Eq¹⁾ with Ref^{8),9)} and¹¹⁾

Reference	Temp.(°C) Density(kg/m ³)	No. Data	Error Range %	Mean* Dev.%	Standard** Dev. %
Webber[8]	48.0 - 130.041 - 2.32 ¹⁾	65	-0.43 - +0.829	0.179	0.29
Piao et al[9]	39.97 - 149.9836.93 - 508.1	96	-0.785 - +0.795	0.25	0.238
Willson and Basu [11]***	81.88 - 174.581.929 - 6.409	50	-0.215 - +0.185 ²⁾	0.0876 ³⁾	0.065

¹⁾ [D] = mol/L; ²⁾ Volume % Error; ³⁾ Volume RMS
 * Mean Deviation $d_m = (\sum |d_i|) / n$ ** Standard Deviation $= (\sum (|d_i| - d_m)^2 / n)^{1/2}$
 *** Willson and Basu 의 실험치

Table 5 Selected Saturation Properties for R-134 a ; SI Units

T _s °C	P _s kPa	d ₁ ---kg/m3---	d ₂ ---kg/m3---	h ₁ ---kJ/kg---	h ₂ ---kJ/kg---	s ₁ ---kJ/kgK---	s ₂ ---kJ/kgK---	c _{p2} kJ/kgK	c _{v2} kJ/kgK
-40.	52.	1417.	2.8	0.0	222.9	0.0	0.956	0.754	1.149
-30.	85.	1388.	4.46	11.9	229.1	0.050	0.943	0.789	1.154
-20.	133.	1358.	6.83	24.3	235.3	0.100	0.933	0.828	1.161
-10.	201.	1327.	10.10	37.0	241.4	0.149	0.925	0.870	1.170
0.	293.	1295.	14.52	50.0	247.2	0.197	0.919	0.918	1.183
10.	415.	1261.	20.35	63.5	252.9	0.245	0.914	0.971	1.200
20.	572.	1226.	27.95	77.3	258.4	0.292	0.910	1.031	1.222
30.	770.	1188.	37.76	91.5	263.5	0.340	0.907	1.101	1.252
40.	1016.	1147.	50.36	106.2	268.2	0.387	0.904	1.184	1.292
50.	1318.	1103.	66.58	121.4	272.5	0.434	0.901	1.288	1.349
60.	1681.	1054.	87.67	137.4	276.0	0.481	0.897	1.428	1.435
70.	2116.	997.3	115.78	154.3	278.4	0.530	0.892	1.639	1.580
80.	2632.	928.8	155.09	172.7	279.1	0.581	0.883	2.024	1.869
90.	3243.	836.9	216.54	193.7	276.3	0.638	0.866	3.064	2.694

3. 4 포화액 및 포화증기표

Table 5는 R-134a의 포화액 및 포화증기의 열역학 표이다. Willson-Basu¹¹⁾의 계산결과와 본 연구의 계산결과는 수치계산 오차 이내로 일치하므로 Fig. 3~Fig. 7에서 McLinden et al¹⁰⁾의 계산결과와 본 계산결과와 비교한다. 포화액의 엔탈피는 최대 %차이가 3%이며, 포화증기는 1.5%, 포화액의 엔트로피는 4%, 포화증기의 엔트로피는 0.7%내에서 서로 일치한다. 포화액의 밀도, 증기압 및 PVT의 오차를 고려하면 정상적으로 예상되는 오차이다. 대체로 최대오차는 임계점부근에서 발생한다.

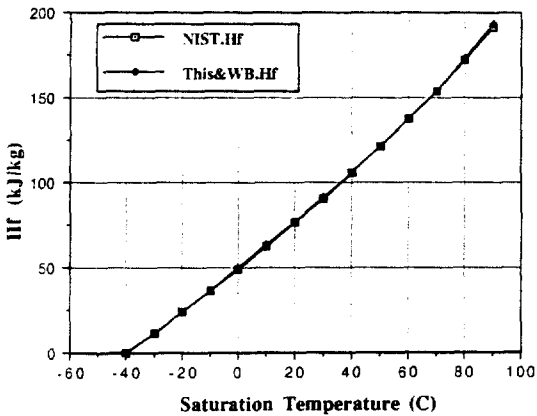


Fig. 3 Comparison of saturated liquid enthalpy with NIST¹⁰⁾

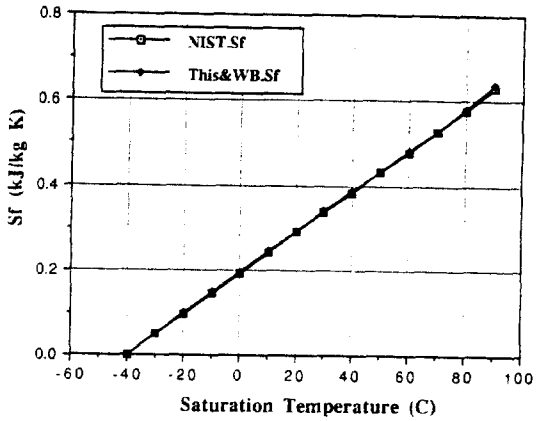


Fig. 5 Comparison of saturated liquid entropy with NIST¹⁰⁾

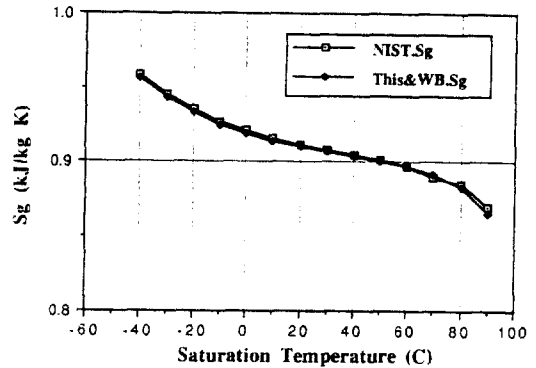


Fig. 6 Comparison of saturated vapor entropy with NIST¹⁰⁾

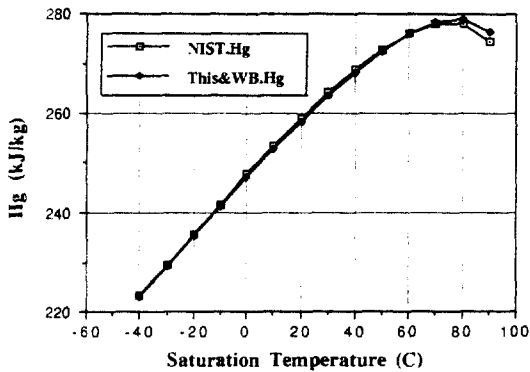


Fig. 4 Comparison of saturated vapor enthalpy with NIST¹⁰⁾

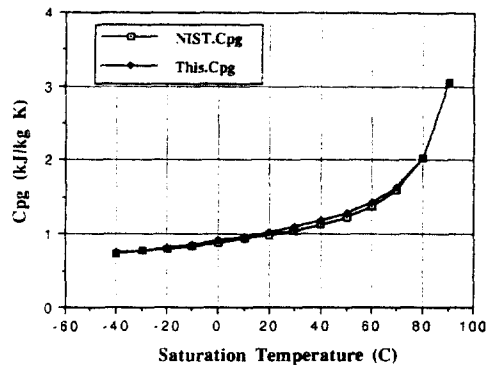


Fig. 7 Comparison of saturated vapor specific heat with NIST¹⁰⁾

4. 냉동 성능의 비교 : R-134a, R-12, R-22, R-502

4.1 간이 냉동기 모형

앞절에서 계산한 R-134a의 열역학적 물성을 이용하여 R-134a를 사용하는 냉동시스템의 성능 즉 냉동용량, 소요동력, 성능계수, 압축기 입출구온도, 체적효율을 증발기 온도를 변화시키면서 계산하였다. R134a와 R-12 그리고 R-22와 R-502를 비교한다. 특히 R 134a와 R-12의 비교에 관심이 있다.

이를 위하여 압축기, 응축기 및 팽창밸브로 구성되는 고압단에 대한 간단한 모형을 구성하였다. 즉, 응축기와 압축기로 구성되는 고압단 응축시스템은 증발기의 온도(흡입압력)의 영향을 받으며 증발기의 온도가 변함에 따라 압축기의 용량, 냉동용량 및 응축온도가 변한다는 점에 착안하고, 응축시스템의 외부 조건을 고정시키기 위하여 응축기의 냉각수의 입구온도와 유량이 주어졌을때, 증발온도에 따른 응축시스템의 냉동성능을 계산한다.

이를 위하여 응축기의 온도를 일정하게 고정하는 대신에 응축기의 효율과 냉각수의 입구온도 및 열용량을 입력자료로 사용하여 열펌프 혹은 냉동기의 열적 평형을 만족하는 응축온도와 냉동시스템의 성능을 나타내는 지표를 계산하였다. 계산에 사용한 모형은 다음과 같다.

압축기 모형 :

틈새 체적율(C), 배제체적(D), 등엔트로피 효율(E_{ci})를 입력 자료로 하는 간이 압축기 모형은 다음과 같다.

$$m = E_{va} \cdot D/v_1 \dots\dots\dots (11)$$

$$E_{va} = r \cdot E_{v,i} \dots\dots\dots (12)$$

$$E_{v,i} = 1 + C - C \cdot v_1/v_{2,i} \dots\dots\dots (13)$$

$$r = 0.984 - 3.686 \times 10^{-2} (P_{dis}/P_{suc}) \dots\dots (14)$$

$$E_{c,i} = (h_2 - h_1)/(h_{2,i} - h_1) \dots\dots\dots (15)$$

$$W_{com} = m \cdot (h_2 - h_1) \dots\dots\dots (16)$$

압축기 체적 효율비 $r (=E_{va}/E_{v,i})$ 는 참고문헌²²⁾의 압축기의 특성 곡선에서 얻은 식을 원

용한다.

응축기 모형 :

응축기 효율(E_{con}), 냉각수열용량(mc_p), 출구에서 과냉도(dT_{sc}), 냉각수입구온도(T_{ai})를 입력자료로 하는 간이 모형을 구성한다.

$$Q_{con} = E_{con} \cdot mc_p \cdot (T_c - T_{ai}) \dots\dots\dots (17)$$

$$Q_{con} = m \cdot (h_2 - h_3) \dots\dots\dots (18)$$

$$T_3 = T_c - dT_{sc} \dots\dots\dots (19)$$

증발기 모형 :

증발기 출구에서 과열도(dT_{sh}) 입력자료로 하는 간이 모형은 다음과 같다.

$$Q_{evp} = Q_{con} - W_{com} \dots\dots\dots (20)$$

$$Q_{evp} = m \cdot (h_1 - h_4) \dots\dots\dots (21)$$

첨자 1, 2, 3, 4는 각각 압축기 입구 및 증발기 출구, 압축기 출구 및 응축기 입구, 응축기 출구 및 팽창밸브 입구, 팽창밸브 출구 및 증발기 입구를 나타내며 첨자 i 는 등엔트로피 압축기의 출구를 표시한다.

4.2 계산순서

- (1) T_c 를 가정한다.
- (2) 압축기 입구에서 상태량 계산한다.
- (3) 압축기 모형으로부터 압축기 출구 상태를 계산한다.
- (4) 압축기 입·출구 상태량으로 냉매유량을 계산한다.
- (5) 증발기 모형에서 냉동용량을 계산한다.
- (6) 응축기 모형을 이용하여 T_{clac} 를 계산한다.
- (7) T_{calc} 와 가정한 T_c 가 같으면 계산을 완료하고 그렇지 않으면 위과정을 반복한다.

4.3 계산결과 검토

운전조건 :

$$D = 20 \text{ m}^3/\text{hr} \quad mc_p = 0.58 \text{ kW/K}$$

$$E_{con} = 0.7 \quad dT_{sh} = 5^\circ\text{C}$$

$$T_{ai} = 20\text{ }^{\circ}\text{C} \quad E_{ci} = 0.7$$

$$C = 0.045 \quad dT_{sc} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

기계적 및 열적 특성이 같은 냉동시스템의 증발기의 온도를 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 변화시키면서 R134a, R12, R22, R502를 냉매로 사용하는 냉동시스템의 열적 평형점에서 성능을 나타내는 성능계수, 압축기 동력, 압축기 체적효율, 압축기 입출구 온도, 냉동효과, 냉동용량 등 여러가지 특성을 계산하였다. Fig. 8~Fig. 14는 그 결과를 보여준다. R134a와 R12를 사용하는 시스템을 비교하면 다음과 같다.

압축기 소요동력을 비교하면, (Fig.8) R12를 사용할때 R134a보다 더 많은 동력이 소요된다. 이것은 일정한 압축기 체적하에 체적효율과 비체적의 복합적 효과이다.

증발기 온도가 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 사이에 있을때 $COP (= Q_{evp}/W_{com})$ 는 2.5%이내에서 같은값을 가지며 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 부근에서 값이 역전되었다. (Fig.9) 즉 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하에서는 R134a가 R12보다 좋으나 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상에서는 그 반대이다. 이러한 현상은 Arnaud와 Caillie¹⁵⁾의 실험과 유사하나 그 경향이 반대이다. Snelson et al¹⁶⁾의 실험결과인 냉동용량의 역전 현상과 유사하다. 이러한 현상은 압축기의 흡입구에서 엔탈피와 비체적의 복합적인 영향으로 생각된다.¹⁶⁾

R134a의 냉동효과(kW/kg)는 R12보다 좋으나 일정한 압축기 배제 체적을 갖는 냉동시스템의 냉동용량은(kW) R134a가 대체로 R12보다 떨어진다. (Fig.10) 이러한 현상은, Fig.12에서 보듯이 R134a를 사용할때 체적효율이 R12를 사용할때보다 떨어지기 때문에 일정한 압축기 실린더 체적하에 냉매의 유량의 감소에 기인한다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 보듯이 같은 운전 조건하에서 R134a의 유량이 R12보다 작으며 증발기 온도가 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 사이에서 R12의 90% 정도이다.

체적효율은 증발기 온도가 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일때 R12의 90~95%정도이다.

Fig. 13과 Fig. 14는 평형점에서의 응축기 온

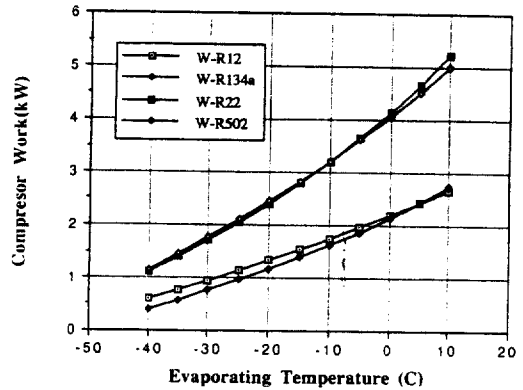


Fig. 8 Comparison of compressor work of R134a, R12, R22, and R502

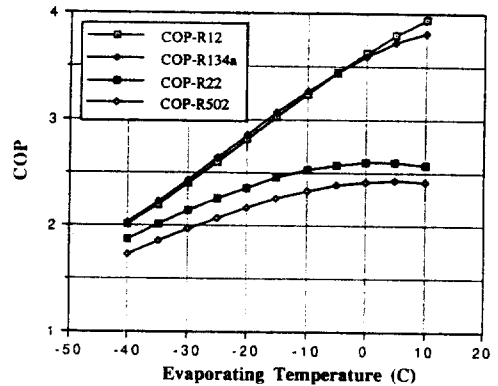


Fig. 9 Comparison of coefficient of performance at working conditions: $m_{cp} = 0.58\text{ kW/K}$, $T_{ai} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $dT_{sh} = dT_{sc} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

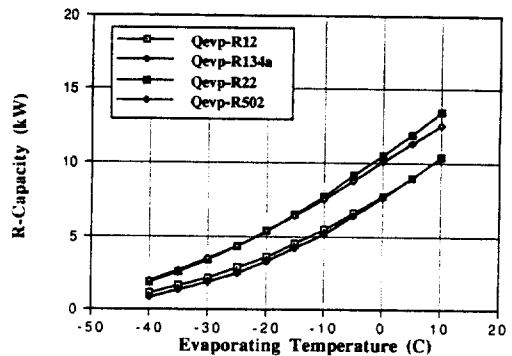


Fig. 10 Comparison of refrigeration capacity at working conditions: $E_{com} = 70\%$, $m_{cp} = 0.58\text{ kW/K}$, $T_{ai} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $dT_{sh} = dT_{sc} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

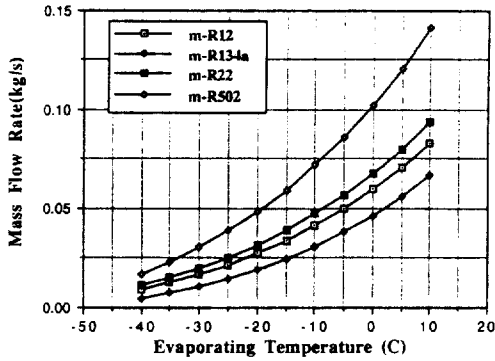


Fig. 11 Comparison of mass flow rate at working conditions : $D=20 \text{ m}^3/\text{hr}$, $m_{cp}=0.58 \text{ kW/K}$, $T_{ai}=20^\circ\text{C}$, and $dT_{sh}=dT_{sc}=5^\circ\text{C}$

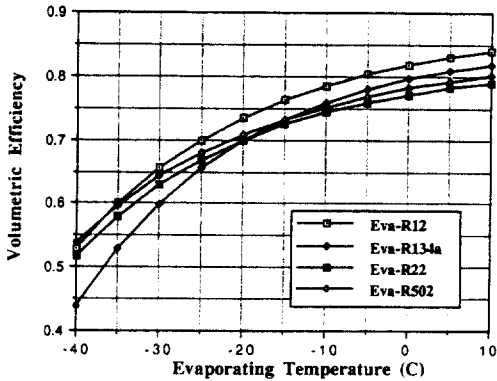


Fig. 12 Comparison of volumetric efficiency at working conditions : $D=20 \text{ m}^3/\text{hr}$, $m_{cp}=0.58 \text{ kW/K}$, $T_{ai}=20^\circ\text{C}$, and $dT_{sh}=dT_{sc}=5^\circ\text{C}$

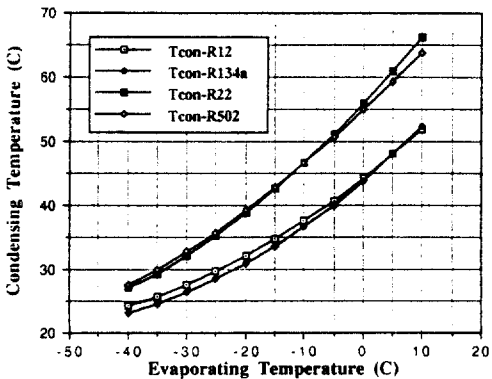


Fig. 13 Comparison of condensing temperature at working conditions : $E_{ci}=70\%$, $E_{com}=70\%$, $m_{cp}=0.58 \text{ kW/K}$, and $dT_{sh}=dT_{sc}=5^\circ\text{C}$

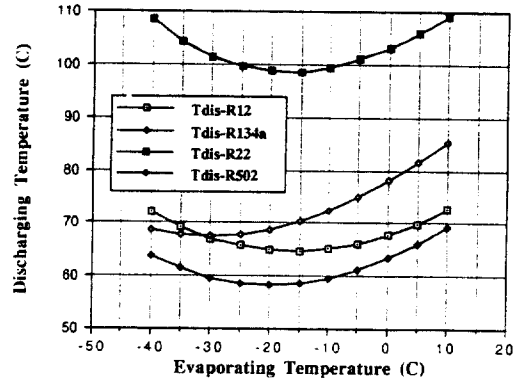


Fig. 14 Comparison of discharging temperature at working conditions : $E_{ci}=70\%$, $E_{com}=70\%$, $m_{cp}=0.58 \text{ kW/K}$, and $dT_{sh}=dT_{sc}=5^\circ\text{C}$

도와 압축기 출구의 온도를 보여준다. R134a를 사용할때 응축기 온도가 다소 낮으나 증발기 온도가 -5°C 에서 10 사이일때에는 차이가 없다. 압축기 출구온도는 $5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 가량 낮음을 알 수 있다.

5. 결 론

R12의 유력한 대체냉매인 R134a의 열역학적성질을 Martin-Hou 상태식과 Willson-Basu의 연구결과를 이용하여 전산화하였으며 그 결과의 정밀도를 보기 위하여 최근에 발표된 증기압, 포화액의 밀도, PVT 측정값과 비교하였다. 열역학적 물성치는 최근의 NIST 계산결과와 비교하였다.

포화액 밀도의 경우, 최대오차가 0.25%, 평균오차가 0.13%이며, PVT의 경우, 최대오차 0.8%, 평균오차 0.25%이며, 증기압의 경우 W-B의 측정치와의 차이가 가장 크다. 이는 온도범위가 넓기 때문으로 생각된다.

열물성치를 비교하면 Willson-Basu의 계산 결과와의 차이는 수치계산오차 이내에 있으며 NIST의 결과와 비교할때 포화액의 엔탈피는 최대 %차이가 3%이며, 포화증기는 1.5%, 포화액의 엔트로피는 4%, 포화증기의 엔트로피는 0.7%내에서 서로 일치한다. 증기압과 포화액 밀도 및 PVT의 오차 및 열역학적 물

성의 차이를 고려할때 최근의 자료를 첨가하여 Willson-Basu가 무시하고 있는 상태식, 식(1), 마지막항의 계수(A_6, B_6, C_6, a)을 포함하는 M-H 상태식계수에 대한 수정이 필요하다.

R12와 R134a의 냉동 성능을 비교하였다. 같은 운전조건하에서 사용할때 약 3% 이내에서 COP가 서로 같으며 증발기 온도가 -5°C 부근에서 COP의 역전현상이 있다. 냉동효과는 R134a가 좋으나 R134a를 사용하는 시스템의 체적효율의 감소로 말미암아 냉동능력은 떨어진다.

R12와 R134a의 냉동성능에 관한 정확한 비교는 각 냉매를 사용하는 시스템의 최적설계조건하에서 비교함이 합리적이며 새로운 시스템의 설계를 위해서 각 부품 및 연결관에 대한 상세한 모형이 필요하며 특히 R134a의 열전달 특성에 관한 자료^{16,19)}를 이용하여 증발기 및 응축기의 모형을 개선하는 연구는 앞으로의 과제가 될 수 있다.

참 고 문 헌

1. Brown, L.R., 1990, State of the World 1990, Worldwatch Institute, Ch. 2 (지구환경보고서 1990)
2. McLinden, M.O., and Didion, D.A., 1987, "Quest for Alternatives", ASHRAE J. Dec., pp. 32-42.
3. Kuijpers, L.J.M., 1989, "UNEP Assessment of the Montreal Protocol: Refrigeration within the Framework of the Technology Review", CFCs: Today's Options-Tomorrow's Solutions, Proceed. of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, NIST Gaithersburg, Maryland, Sept. 27-28, pp. 1-4.
4. Atwood, T., 1985, "The ABCs of NARBs", Advances in Nonazeotropic Mixture Refrigerants for Heat Pumps, ASHRAE Technical Data Bulletin, A Collection of Papers from the ASHRAE Annual Meeting at Honolulu, Hawaii, June, 1985, pp. 1-11.
5. Kubota, H., 1989, "Vapor Pressure of New Fluorocarbons", Int. J. of Thermophysics, Vol. 10, No. 3, pp. 629-637.
6. Kabata, Y., 1989, "Measurement of the Vapor-Liquid Coexistence Curve and the Critical Parameters for 1,1,1,2-Tetrafluoroethane", Int. J. of Thermophysics, Vol. 10, No. 3, pp. 605-615.
7. McLinden, M.O., 1989, "Thermodynamic Properties of CFC Alternatives - A Survey of Available Data", CFCs: Today's Options - Tomorrow's Solutions, Proceed. of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, NIST Gaithersburg, Maryland, Sept. 27-28, pp. 17-31.
8. Webber, L.A., 1989, "Vapor Pressure and Gas-Phase PVT Data for 1,1,1,2-Tetrafluoroethane", Int. J. of Thermophysics, Vol. 10, No. 3, pp. 617-627.
9. Piao, C.C., 1989, "An Experimental Study for PVT Properties of CFC Alternative Refrigerant 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R-134a)", ASHRAE Trans. Vol. 95, Pt. 2, Paper No. 3317.
10. McLinden, M.O., 1989, "Measurement and Formulation of the Thermodynamic Properties of Refrigerants 134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) and 123 (1,1-Dichloro-2,2,2-Trifluoroethane)", ASHRAE Trans. Vol. 95, Pt. 2, Paper No. 3282.
11. Willson, D.P., and Basu, R.S., 1988, "Thermodynamic Properties of a New Stratospherically Safe Working Fluid - Refrigerant 134a", ASHRAE Summer Meeting, Ottawa, Paper No. OT-88-20-4.
12. Kamel, A., 1990, "Thermodynamic Charts and Cycle Performance of HFC-134a and HFC-152a", ASHRAE Trans. Vol. 96, Pt. 1, Paper No. 3318.

13. Bateman, D.J., 1990, "Current Development Status of HFC-134a for Automotive Air Conditioning", SAE Int. Congress and Exposition, Detroit, MI, Feb. 26 – Mar. 2, Paper No. 900213.
14. Bateman, D.J., Performance Comparison of HFC-134a and CFC-12 in an Automotive Air Conditioning System", SAE Paper No. 890305.
15. Arnaud, D., 1990, "Comparative Performance of HFC 134a and CFC-12 in a Reciprocating Water Chiller", Proceed. of 1990 USNC/IIR – Purdue Refrigeration Conference and The 1990 ASHRAE - Purdue CFC Conference, July, 17-20, Purdue University, West Lafayette, Indiana, pp. 354-364.
16. Snelson, W.K., 1990, "Some Thermodynamic Performance Test Results of Refrigerant 134a", *ibid.*, pp. 344-353.
17. Domanski, P.A. and McLinden, M.O., 1990, "A Simplified Cycle Simulation Model for The Performance Rating of Refrigerants and Refrigerant Mixtures", *ibid.*, pp. 466-475.
18. Eckel, S.J., and Pate, M.M., 1990, "An Experimental Comparison of Evaporation and Condensation Heat Transfer Coefficients for HFC-134a and CFC-12", *ibid.*, pp. 215-224.
19. Spatz, M.W., and Zheng, Z., 1990, "An Experimental Evaluation of the Heat Transfer Coefficients of R-134a Relative to R-12", *ibid.*, pp. 225-233.
20. Hou, Y.C., and Martin, J.J., 1959, "Physical and Thermodynamic Properties of Trifluoroethane", *AIChE J.*, Vol. 5, No. 1, pp. 125-129.
21. Van Wylen, G.J., and Sonntag, R.E., 1986, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, John Wiley & Sons Inc., N.Y.
22. Stoecker, W.F., and Jones, J.W., 1982, "Figure 11-12 Clearance and Actual Volumetric Efficiency of a Refrigerant 22 High-Speed Compressors. The Clearance Volume Assumed for Calculating the Clearance Volumetric Efficiency is 4.5%", *Refrigeration and Air Conditioning*, p. 217, McGraw-Hill Book Company, N.Y.
23. McLinden, M.O., Haynes, W.M., J.T.R. Watson and K. Watanabe, A Survey of Current Worldwide Research on the Thermophysical Properties of Alternative Refrigerants, NISTIR-3969, June, 1991.