

대체냉매 R-32(Difluoromethane)의 열역학적 물성과 R-22 대체냉매로서 열역학적 성능의 초기 평가 Thermodynamic Properties of R-32(Difluoromethane) and Initial Evaluation of Thermodynamic Performance as A R-22 Alternative Refrigerant

박 영 무*
Y. M. Park

Key words : R-22 Alternative refrigerant (R-22 대체냉매), R-32, Thermodynamic property (열역학적 물성), COP (성능계수), Refrigeration effect (냉동효과), Volumetric capacity (체적용량)

Abstract

Thermodynamic properties of R-32 are calculated and its refrigeration performance is evaluated for the purpose of the feasibility study of replacing R-22 with R-32.

(1) Refrigeration effect of R-32 is superior to that of R-22 because heat of evaporation of R-32 is about 50% higher than that of R-22. However, COP of R-32 system is 10-30% lower than that of R-22 system. It is mainly attributed to the vapor pressure of R-32 being about 62% higher than R-22.

(2) Since the pressure ratio and the specific heat ratio of R-32 system is higher than those of R-22, compressor discharging temperature rises as high as to 130-150°C. It may cause mechanical failure of compressor due to the breakdown of lubricant. Compressor should be improved to lower the temperature if R-32 is to replace R-22.

(3) Averaged two-phase heat transfer coefficient of R-32 is about 10-20% higher than that of R-22. It may assume better heat exchanger effectiveness but not guarantee the better COP of R-32 system than R-22.

(4) The high vapor pressure is the first reason to drop R-32 out of the line of R-22 alternative refrigerant. So, refrigerant mixtures based on R-32 are recommended to adjust the vapor pressure first and keep superior volumetric capacity of R-32.

기 호 설 명

A_i, B_i, C_i : M-H 상태방정식 계수 ($i=2\sim5$)
 C_p : 정압비열 (kJ/kgK)
 C : 열교환기 용량 (kW/K)
 CL : 압축기 틸세 체적용

DV : 압축기 배제 체적 (ℓ/min)
 Gr : 질량플럭스 (kg/m²s)
 h : 열전달계수 (kW/m²K)
 Nu : Nusselt 수 (hd/K)
 P : 압력 (kPa)
 Pr : Prandtl 수 (ν/α)
 R : 가스상수 (cc/atm/kg or kJ/kmolK)

*정회원, 아주대학교 기계공학과

Re : Reynold 수 (GrD/μ)
 T : 온도 ($^{\circ}C$)
 x : 전도

회합문자

a_i : 포화액 밀도식 계수
 β : 상수
 ϵ : 열교환기 효율
 η : 압축기 효율
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 τ : 무차원변수 ($1 - T/T_c$)
 μ : 점성계수 ($\mu Pa \cdot s$)
 ν : 동점성계수 ($\mu m^2/s$)

첨자설명

c : 임계점
 con : 응축기
 evp : 증발기
 l : 액체
 0 : 기준상태
 r : 환산 상태량
 sc : 과냉
 sh : 과열
 tp : 이상(Two-phase)상태
 v : 증기

1. 서 론

1992 코펜하겐 회의에서 개정된 Montreal 의정

서에 의하면 HCFC도 1989년 사용량을 기준으로 1996년까지 사용량을 동결하고, 2004년까지 65%, 2010년까지 35%, 2015년까지 10%, 2020까지 0.5% 수준으로 감축한 후, 2030년에는 완전한 사용금지를 규정하고 있다.⁽¹⁾ 뿐만 아니라 오존층 파괴정도가 심각하고 그 속도가 가속화 됨에 따라, 대체기술의 개발속도와 함께 HCFC의 규제시기는 앞당겨질 수도 있다. 규제 대상인 R-22는 소형 냉방장치에 많이 사용되고 있으며 그 수요가 급격히 상승하고 있으므로 R-22의 규제에 대비하여 대체 냉매의 개발이 시급하며 ARI⁽²⁾에 의하면 대체냉매가 정해진 후 새로운 제품이 시장에 나올 때 까지 약 15년의 개발기간이 필요하므로 수정된 HCFC의 규제 일정에만 부응하더라도 R-22의 대체냉매 이 용기술에 관한 연구는 시급한 과제이다.

R-22의 대체용으로 미국, EC, 일본을 비롯한 선진 각국에서는 예비선정작업이 이미 시작되어 AREP(R22 Alternative Refrigerant Evaluation Program)⁽²⁾의 일환으로 대체 가능성이 높은 여러 가지 물질이 제안되고 있다. (Table 1) 이들은 R-32, R134a, R125, R-290, R-717 등의 순수 혹은 혼합물들이다. 이 중에서 R-32는 R-22와 유사한 냉매로서, 냉동 및 냉방용 순수 혹은 혼합 대체 냉매로 상업화의 가능성이 있는 화합물이다.⁽³⁾ Table 1에 제시된 혼합냉매와는 달리 순수물질 R-32는 약간의 가연성이 있으나 ODP(Ozone Depletion Potential)가 0이며 GWP(Global Warming Potential)가 매우 낮은 유망한 화합물이다.⁽³⁾ 독성 및

Table 1 R-22 alternative refrigerants for testing and evaluation⁽²⁾

Number	Refrigerant or Refrigerant Blend	Percent Composition (by weight)	Baseline Reference
1	R-32/R-125	60/40	R-22
2	R-32/R-134a	30/70	R-22
3	R-32/R-125/R-134a	10/70/20	R-22
4	R-290 (Propane)	...	R-22
5	R-134a	...	R-22
6	R-717 (Ammonia)	...	R-22
7	R-32/R-125/R-134a/R-290	20/55/20/5	R-22
8	R32/R-125/R-134a	30/10/60	R-22
9	R-125/R-143a	45/55	R-502
10	R-125/R-143a/R-134a	40/45/15	R-502

환경시험은 PAFT V(Programme of Alternative Fluorocarbon Toxicology Testing)에 의거하여 수행중에 있으며 현재까지(1992) 수집된 자료에 의하면 위생 규칙만 정상적으로 지키면 R-32의 산업용 이용을 규제할 이유는 없다⁽³⁾

R-32를 순수 혹은 혼합냉매로 증기 압축식 냉동 시스템에 사용하려면 열-물리적 물성, 열전달 특성 및 냉동성능에 대한 연구가 필요하며 나아가서 적절한 윤활유의 개발과 재료와의 상용성(Compatibility)에 관한 연구가 필요하다. 아직까지 이에 대한 연구결과가 충분하지 않으며 다만 R-32의 PVT거동⁽⁴⁾과 증기압^(4,5,6) 및 이상기체 비열^(6,9)에 관한 실험 및 통계열역학적 계산자료가 있으며 재료와의 상용성은⁽¹⁰⁾은 최근에 발표된 바 있다. 이들의 냉동 성능에 관한 연구결과도 최근들어 Spatz,⁽¹¹⁾ Tan,⁽¹²⁾ Hanson⁽¹³⁾ 등에 의하여 발표되고 있다.

본 연구에서는 기존의 자료로부터 계산한 R-32의 포화상태 및 과열증기 영역의 열역학 표를 제시하고, 열전달 계수를 이론적으로 계산하며, 이들을 이용하여 3-5kW용량의 에어컨 시스템의 전산 모사를 통하여 열역학적 성능을 조사함으로써 R-22 대체용 순수냉매로서 R-32의 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

2. R-22와 R-32의 증기압 비교

R-32의 증기압은 Malbrunot등,⁽⁴⁾ Kanungo등⁽⁵⁾과 Qien 등⁽⁶⁾이 측정하였으며 McLinden⁽⁷⁾은

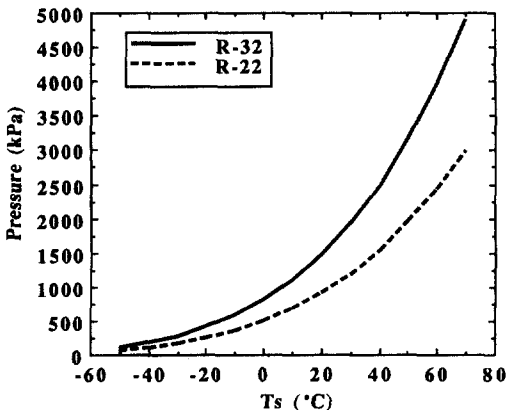


Fig. 1 Comparison of Saturation Pressure of R22 and R32

Malbrunot등⁽⁴⁾와 Kanungo등⁽⁵⁾의 자료를 이용하여 저온한도(-124K) 이상에서 RMS 0.29% 이내로 계산할 수 있는 증기압곡선을 제시하였다. 본 연구에서는 이를 이용하였으며 식과 관련계수는 부록에 있다.

냉매의 증발기압력과 응축기압력은 압축기의 운전 특성에 중요한 영향을 미친다. 증발기압력과 응축기압력의 차이가 클수록 압축기 구동동력이 증가하며, 압축비가 클수록 압축기 출구에서의 냉매온도가 상승한다. 따라서 냉매의 증기압은 대체냉매 선정의 중요한 기준이다. Fig. 1에서 R-22와 R-32의 증기압을 비교하였다. 냉방용 R-22의 대표적 운전 온도인 5°C(증발기 온도)~50°C(응축기 온도) 사이에서 R-32의 증기압이 62%가량 크다.

3. 열역학적 물성

ARI⁽²⁾에 의하면 1992년까지 기본적인 열-물리 물성측정을 완료할 계획으로 있으나 아직까지 R-32의 열역학적 물성계산의 근거가 되는 실험자료는 극히 제한되어 있다. Kanungo등⁽⁵⁾과 Qien등⁽⁶⁾은 실험자료의 수치를 밝히지 않고 계산식이나 도표만 제시하고 있으며 Malbrunot등⁽⁴⁾은 -82°C~75°C범위에서 30점의 증기압과 -25°C~78°C범위에서 16점의 포화액밀도 및 25°C~200°C, 891 kPa~20,000 kPa범위에서 85점의 PVT를 측정하고, 이를 이용하여 M-H 상태방정식을 구성하였다. Malbrunot등⁽⁴⁾의 실험자료는 분산정도가 커서 정확한 물성에측을 위해서는 실험자료의 보충이 필요하지만⁽⁷⁾ 현재로서는 R-32의 열역학적 성능 평가에 필요한 예비 물성계산에 이용할 수 있는 최선의 자료이다.

포화액 밀도는 Malbrunot등⁽⁴⁾의 자료를 이용하여 McLinden⁽⁷⁾이 제시한 식으로 계산하였으며 이상기체비열은 Rodger등⁽⁸⁾과 JANAF⁽⁹⁾을 이용하여 McLinden등⁽⁷⁾이 제시한 식을 이용하였다. 계산 방법은 박과이⁽¹⁴⁾와 같으며 사용한 식은 부록에 있다. 엔탈피와 엔트로피의 기준상태 및 값으로 -40°C에서 포화액의 엔탈피와 엔트로피의 값을 모두 0으로 두었다. R-32의 포화상태와 과열증기영역의 열역학 표는 Table A. 3, Table A. 4와 같다.

계산 결과의 타당성을 검토하기 위하여 ICI⁽¹⁵⁾에서 Redelich-Kwong 상태식과 자체의 실험식(자료원은 명시되어 있지 않았음) 이용하여 계산한 엔

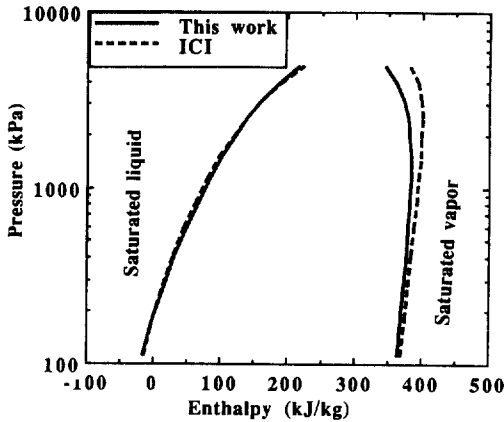


Fig. 2 Comparison of enthalpy calculated and ICI at saturation state

탈피를 Fig. 2에서 비교하였다. ICI 물성표의 기준 상태는 0°C 포화액이며 그때 엔탈피와 엔트로피 값을 각각 100kJ/kg, 1kJ/kgK로 두었다. 비교를 위하여 ICI 물성표의 기준상태를 본 연구의 기준상태와 같도록 값을 환산하였다. 포화액의 엔탈피는 거의 일치하나 포화증기의 엔탈피는 다소 차이가 있으며 온도가 높을수록 그 차이가 크다. ICI에서는 포화액밀도, 포화증기밀도, 증기압 및 증발잠열을 각각 별도의 실험식으로 계산하였으므로 열역학적 일관성이 결여될 수 있으며 스스로 예측치의 정확도에 대한 신뢰도를 두지 않고 있다.⁽¹⁵⁾ 냉매의 물성계산에 있어서 M-H 상태방정식이 R-K상태방정

식보다 많이 사용된다는 점과 계산 방법의 열역학적 일관성의 관점에서 본 계산 결과의 신뢰도가 ICI보다 높다고 판단된다.

4. R-32의 열전달 계수

R-32의 이상(Two-phase) 열전달 계수를 기존의 관계식을 이용하여 계산하고 동일한 유동 및 기하학적 조건하의 R-22의 열전달 계수와 비교하여 열특성에 대한 예비자료를 얻고자 하였다. Table 2-a, 2-b에서 계산에 필요한 전달 물성을 증발기와 응축기의 대표적 온도인 5°C와 50°C에서 비교하였다. Nusselt수의 정의에 따라 열전도 계수는 열전달 계수에 직접적인 영향을 미친다. 액체 R-32의 열전도 계수는 두 온도에서 모두 R-22보다 40% 이상 크며, 증기의 경우에는 R-32의 값이 이상기체 값이므로 명확한 비교가 어렵다. 비열, 점도 등은 열전도 계수와 함께 Prandtl수를 통하여 관계식에 이용되며 대개의 식에서 Prandtl 수의 1/3승으로 영향을 미치므로 그 효과가 크지 않으리라 예상되나 그 방향은 예측할 수 있다. R-32의 증발 잠열은 R-22보다 약 50% 가량 크다. 잠열은 Boil수를 통하여 이상열전달 계수에 영향을 미친다. 열전도 계수와 증발 잠열의 지배적인 영향을 고려하면 R-32의 열전달 계수가 R-22보다 크게 될것을 예상할 수 있다. 이러한 예상하에서 많이 사용되는 기존의 관계식을 이용하여 이상영역의 평균열전달 계수를 계산하였다.

Table 2a Selected properties of R-22 and R-32 at 5°C

Property		R-32	R-22	%diff	Effect on H. T.
Density (kg/m ³)	Liquid	1034.4	1264.3	-18.1	↑ slightly
	Vapor	25.725	24.848	+3.53	↑ slightly
Saturation pressure(MPa)		0.9508	0.5841	+62.8	=0
Latent heat (kJ/kg)		308.95	200.52	+54.1	↑ moderate
Viscosity(μPa · s)	Liquid	181.6	227.5	-20.2	↑ moderate
	Vapor	13.2*	12.25	+7.76	↓ slightly
Thermal conductivity (mW/mK)	Liquid	143.4	97.6	+46.9	↑ strong
	Vapor	10.000*	9.73	+2.77	↑ slightly
Specific Heat (kJ/kgK)	Liquid	1.3978	1.19	+17.5	↑ slightly
	Vapor	0.791*	0.744	+6.40	↑ slightly
Prandtl number	Liquid	1.770	2.774	-36.2	↓ slightly
	Vapor	1.045*	0.937	+11.5	↑ slightly

Table 2b Selected properties of R22 and R32 at 50°C

Property		R-32	R-22	%diff	Effect on H. T.
Density(kg/m ³)	Liquid	839.28	1082.3	-22.5	↑ slightly
	Vapor	98.111	86.249	+12.8	↑ slightly
Saturation pressure(MPa)		3.1447	1.9432	+61.8	=0
Latent heat(kJ/kg)		211.76	153.62	+37.8	↑ moderate
Viscosity(μPa · s)	Liquid	99.1	180.	-44.9	↑ moderate
	Vapor	15.2*	15.1	+1.	↓ slightly
Thermal conductivity (mW/mK)	Liquid	107.3	75.3	+42.5	↑ stuong
	Vapor	12.2*	12.6	-3.2	↓ slightly
Specific Heat (kJ/kgK)	Liquid	2.5046	1.40	+78.9	↑ moderate
	Vapor	0.8648*	1.06	-18.4	↓ slightly
Prandtl number	Liquid	2.313	3.347	-30.9	↓ slightly
	Vapor	1.077*	1.270	-15.2	↓ slightly

* Ideal gas value

관로에서 난류유동의 단상 국소열전달 계수는 비교적 정확하게 계산할 수 있으며 Dittus-Boelter식⁽¹⁶⁾과 Petukhov식⁽¹⁷⁾이 많이 이용된다.⁽¹⁸⁾ 본 연구에서는 계산이 편리한 Dittus-Boelter 식⁽¹⁶⁾을 이용하였다. 증발기와 응축기의 핵심은 이상영역이므로 이상열전달 계수의 역할이 지배적이다. 응축기 내에서 냉매의 유속은 비교적 고속이므로 응축기 전반에 걸쳐 동심원형 유동이 지배적이다.⁽¹⁸⁾ 따라서 동심원형 유동의 열전달계수 관계식을 선택함이 바람직하며 본 연구에서는 R-12와 R-22에 관한 충분한 실험자료를 이용하였으며, 비교적 간단한 Traviss et al.⁽¹⁹⁾의 관계식을 이용하였다. 비등 열

전달 계수는 실험을 통하여 비교적 충분히 검증되고 자주 사용되는 Chaddock과 Noerager⁽²⁰⁾의 식을 이용하여 계산하였다.

앞에서 구한 물성을 이용하여, 관의 내경이 8.26 mm이며, 건도가 1.0에서 0.0까지(혹은 0.0에서 1.0까지) 변할 때 질량 플럭스의 변화에 따른 (100~500kg/m²s) 이상영역의 평균열전달 계수를 다음식으로 계산하였다.

$$\frac{1}{h_{avg}} = \frac{\int_{x_i}^{x_o} dx}{h_{fp}(x)} \quad (1)$$

Fig. 3~Fig. 6에서 계산 결과를 비교하였다. R

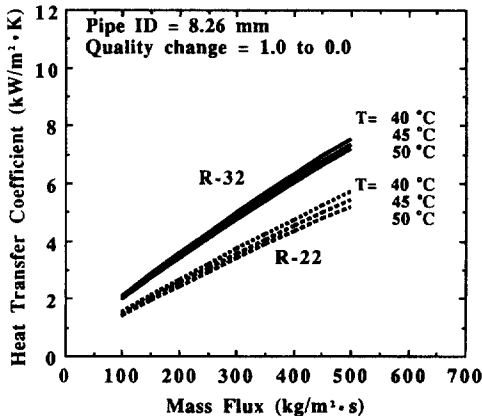


Fig. 3 Average Heat Transfer Coefficient of R22 and R32 for Condensation : T=40, 45, 50°C

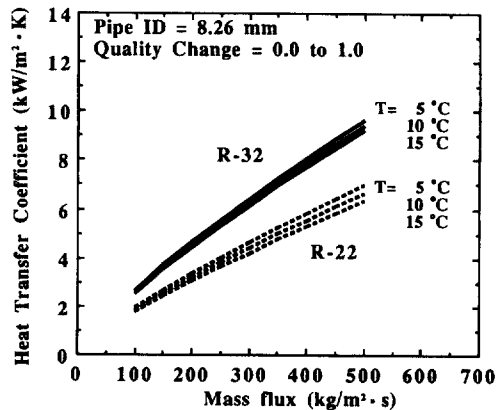


Fig. 4 Average Heat Transfer Coefficient of R32 and R22 for Evaporation : T=5, 10, 15°C

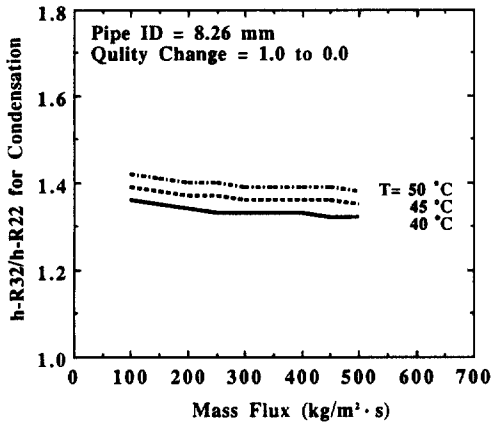


Fig. 5 The Ratio of Average Heat Transfer Coefficient of R32 to R22 for Condensation : T=40, 45, 50°C

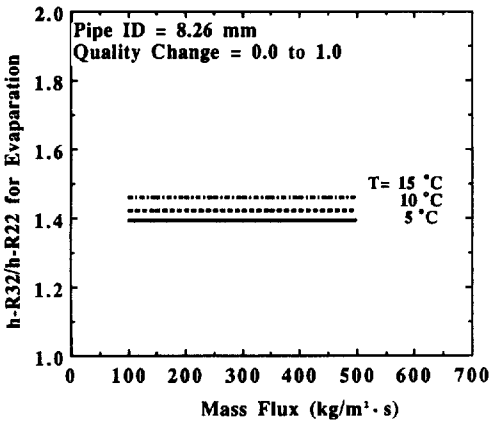


Fig. 6 The Ratio of Average Heat Transfer Coefficient of R32 to R22 for Evaporation : T=5, 10, 15°C

-32의 평균 응축열전달 계수가 2~7kW/m²K일때, R-22는 1.5~5.5kW/m²K 정도이며 증발의 경우 R-32가 2.5~9kW/m²K일때, R-22는 2~6.6kW/

m²K이다. 따라서 증발 열전달계수는 R-32가 40~50% 우수하며 응축 열전달 계수는 30~40%가량 우수하다.

5. R-32와 R-22의 열역학적 성능 비교

R-22의 대체 냉매로서 R-32의 가능성을 평가하기 위하여 전산모사를 통하여 R-32의 냉동능성과 사이클의 주요부분에서의 온도를 계산하였다. 냉방 시스템은 3-5kW용량의 에어컨 시스템이며 기준 운전 조건과 압축기의 사양은 Table 3과 같다. 전산모사 방법은 박과 이⁽¹⁴⁾와 같으며 실내온도와 열교환기의 효율에 따른 성능변화의 정도를 계산하였다.

5.1 성능 계수

실내온도가 10~35°C까지 변화하는 동안 나머지 운전 조건은 기준 조건으로 일정하게 유지하면서 R-32와 R-22의 성능계수(COP=Q_{evp}/W_{com})를 계산하였다. Fig. 7에서 실내온도의 증가와 함께 R-22 시스템의 성능계수는 2.5~3.5사이에서 다소 증가 변화를 하는동안 R-32 시스템의 성능계수는 1.8~2.4사이에서 단조 증가 변화를 한다.

증발기와 응축기의 효율에 따른 성능계수의 변화 정도를 보기위하여, 기준조건(실내온도 27°C, 외기 온도 35°C)에서 응축기의 효율이 0.7이며 증발기의 효율이 0.5~0.9일 때와 증발기의 효율이 0.7, 응축기의 효율이 0.5~0.9일 때 성능계수를 계산하였다. Fig. 8에서 R-22의 성능계수는 2.7~3.3, R-32는 2.0~2.4사이에 있다. 증발기 효율이 최고일 때(E_{con}=0.7, E_{eva}=0.9) R-32시스템의 성능계수(=2.4)가 증발기 효율이 최저일 때(E_{con}=0.7, E_{eva}=0.5) R-22 시스템의 성능계수(=2.7)보다 낮다. 이러한 결과로부터 열교환기의 효율이 우수하다는 점만으로 R-22보다 우수한 성능의 R-32 시

Table 3 Selected operating condition and system specification

압축기	DV=90.L/min	$\eta_{is}=0.65$	CL=0.042	$\eta_a/\eta_v=0.95$
증발기	C _{evp} =0.3kW/K	T _{in} =27°C (실내온도)	$\epsilon_{evp}^{(1)}=0.7$	dT _{sh} =5°C
응축기	C _{con} =1.1kW/K	T _{in} =35°C (외기온도)	$\epsilon_{con}^{(2)}=0.7$	dT _{sc} =5°C

주 ; (1) $\epsilon_{evp} = \frac{T_{r, outlet} - T_{r, inlet}}{T_{air, inlet} - T_{r, inlet}}$ (2) $\epsilon_{con} = \frac{T_{r, inlet} - T_{r, outlet}}{T_{r, inlet} - T_{air, inlet}}$

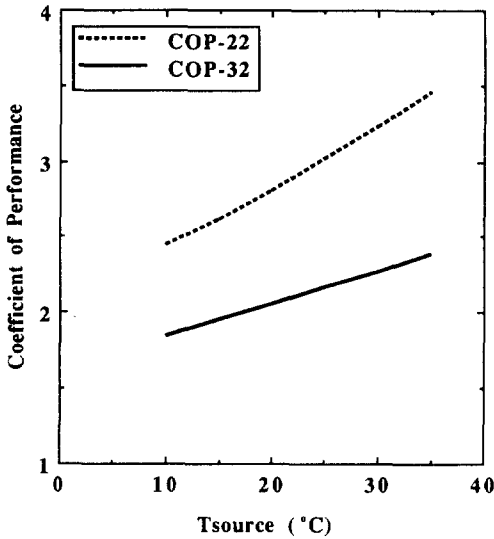


Fig. 7 Comparison of COP of R22 and R32 at Various Source Temperature: $dT_{sh}=5^{\circ}\text{C}$, $dT_{sc}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{sink}=35^{\circ}\text{C}$, $E_{con}=E_{evp}=0.7$, $C_{con}=1.07\text{kW/K}$, and $C_{evp}=0.29\text{kW/K}$

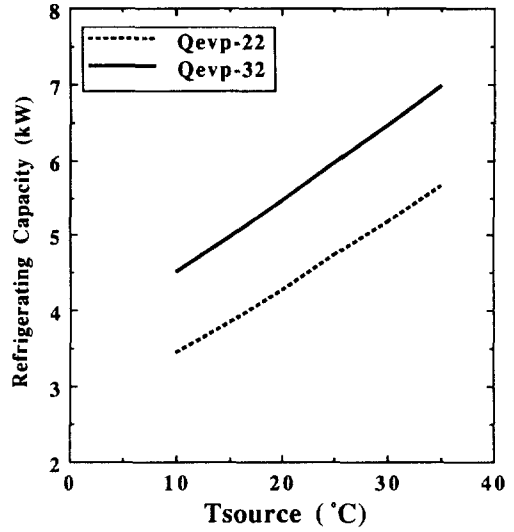


Fig. 9 Comparison of Refrigerating Capacity of R22 and R32 at Various Source Temperature: $dT_{sh}=5^{\circ}\text{C}$, $dT_{sc}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{sink}=35^{\circ}\text{C}$, $E_{con}=E_{evp}=0.7$, $C_{con}=1.07\text{kW/K}$, and $C_{evp}=0.29\text{kW/K}$

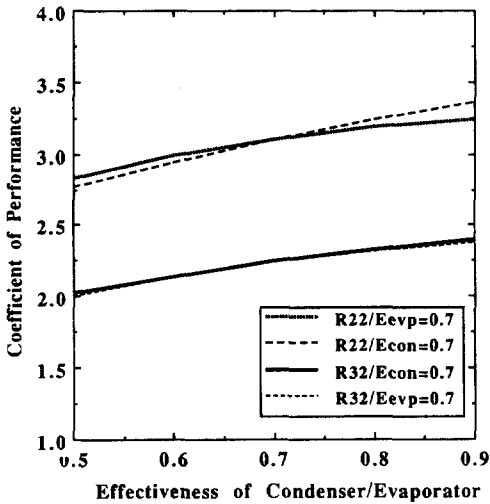


Fig. 8 Effects on the COP of the Effectiveness of Heat Exchanger: $dT_{sh}=5^{\circ}\text{C}$, $dT_{sc}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{sink}=35^{\circ}\text{C}$, $E_{con}=E_{evp}=0.7$, $C_{con}=1.07\text{kW/K}$, and $C_{evp}=0.29\text{kW/K}$

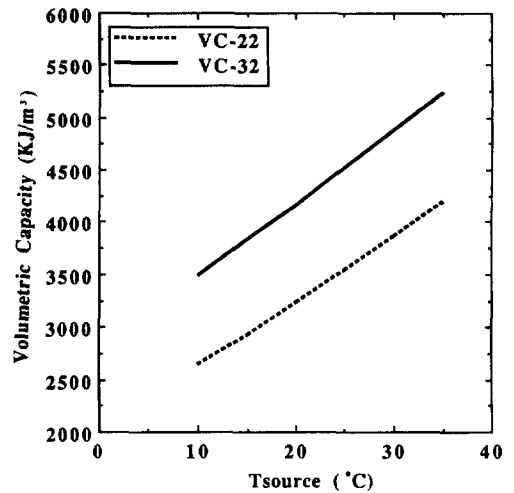


Fig. 10 Comparison of Volumetric Capacity of R22 and R32 at Various Source Temperature: $dT_{sh}=5^{\circ}\text{C}$, $dT_{sc}=5^{\circ}\text{C}$, $T_{sink}=35^{\circ}\text{C}$, $E_{con}=E_{evp}=0.7$, $C_{con}=1.07\text{kW/K}$, and $C_{evp}=0.29\text{kW/K}$

시스템을 구현하기가 어렵다고 판단되며 열교환기의 성능을 고려하더라도 R-32시스템의 성능계수가 R-22에 비하여 약 10-30%가량 낮다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 냉방 용량과 체적용

량이 우수함에도 불구하고 이 처럼 성능계수가 떨어지는 주요원인은 두 냉매의 증기 비체적은 비슷하나 Fig. 1에서 보듯이 R-32의 증기압이 R-22보다 월등히 커서 압축일이 커지기 때문이다. 이러한

열역학적 해석결과는 Tan⁽¹²⁾의 결과와 일치하며 R-22 대체용 냉매로 R-32의 선택을 어렵게 하는 주요 원인중의 하나가 될 수 있다.

5.2 냉방용량과 체적용량

동일한 압축기를 사용할 때 냉방용량과 주어진 냉방용량에 맞는 압축기 크기를 조사하기 위하여 실내온도 10~35°C 사이에서 기준조건으로 시스템을 운전할 때 냉방용량과 체적용량을 계산하였다. Fig. 9에서 실내온도의 상승과 함께 R-32의 냉방용량이 4.5~7kW로 증가하는 반면에 R-22의 경우 3.5~5.5kW로 증가하였다. R-32의 냉방용량이 R-22에 비하여 25~30% 가량 크다. 체적용량은 R-32의 경우 3500~5200kW/m³, R-22의 경우 2700~4200kW/m³ 사이에서 단조 증가한다. (Fig. 10) R-22에 비하여 R-32의 체적용량이 25~30% 가량 크다.

동일한 압축기를 사용할 때 R-32의 냉방용량과 체적용량이 R-22보다 우수한 주된 원인은 대부분의 에어컨의 증발기 온도영역인 5~10°C에서 R-32의 증발잠열이 R-22의 증발잠열보다 50%가량 크며 (Table 2) 기준 운전 조건하에서 계산한 냉매 1 kg 당 냉방용량을 비교할 때 R-32가 R-22보다 40% 가량 크기 때문이다. (Fig. 11)

5.3 압축기 출구 온도

압축기 출구온도가 지나치게 높으면 윤활유의 기능이 저하되어 압축기의 기계적 수명에 치명적임으로 적정수준으로 유지되어야 하며 이는 냉매 선정의 주요한 기준이다. 응축온도가 50°C일 때, 소형 냉동기의 냉매로 사용되는 대부분의 CFC계열 냉매의 압축기 출구온도는 100°C 이하이며 암모니아는 120°C 이하이다. (21)

R-32 시스템의 압축비가 R-22보다 크고 비열비 (Cp/Cv)가 R-22보다 크기 때문에 R-32를 사용할 때 압축기 출구온도가 R-22를 사용할 때보다 높게 예측된다. Fig. 12에서 R-22의 출구온도는 압축기 운전이 허용되는 95~105°C로 계산되었으나 R-32의 경우는 130~150°C로 계산되었다. 그 이유로는 Fig. 12에서 보듯이 기준 조건하에서 실내온도가 10~35°C로 변할 때 R-32의 증발 온도는 -10°C ~ +5°C 사이에서 운전되나 R-22의 증발온도는 다소 높은 -5~+10°C 있으며 R-32 응축온도가 45~50°C에 있을 때 R-22의 응축온도는 다소 낮은 40~45°C 사이에 있기 때문이다.

따라서 기존의 압축기에서 R-32를 사용하면 출구온도의 상승으로 말미암아 윤활유의 냉매 상용성 (compatibility)이 떨어져서 기계적 손상이 예상된다. 그러므로 R-22 대체용으로 순수냉매 R-32를

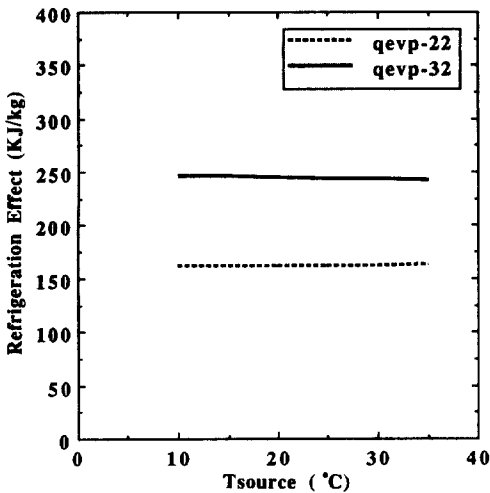


Fig. 11 Comparison of Refrigerating Effect of R-22 and R32 at Various Source Temperature: dTsh=5°C, dTsc=5°C Tsink=35°C, Econ=Eevp=0.7, Ccon=1.07kW/K, and Cevp=0.294kW/K

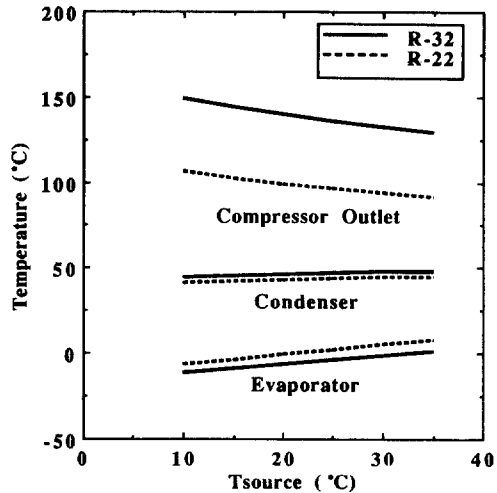


Fig. 12 Comparison of Evaporator, Condenser, and Compressor Outlet Temperature at Various Source Temperature: dTsh=5°C, dTsc=5°C, Tsink=35°C, Econ=Eevp=0.7, Ccon=1.07kW/K, and Cevp=0.249kW/K

사용하려면 압축기가 개선되어야 한다.

압축기 출구온도가 높다는 사실과 성능계수가 떨어진다는 사실은 R-22대체냉매를 선정할 때 순수 냉매 R-32를 배제하는 주요 이유가 될 수 있으며 배제가능성의 주된 원인은 R-32의 증기압이 R-22에 비하여 지나치게 높는데 있다. 따라서 대체용 혼합 냉매를 구성한다면, R-32를 기본으로 하고, 그 증기압을 낮추는 방향으로, 다른 냉매를 혼합하여 성능계수를 향상시키되 우수한 체적용량과 냉동효과는 유지하는 방향으로 우선 모색되어야 한다.

6. 결 론

R-22 대체용 냉매 선정을 위한 연구의 일환으로 R-32의 열역학물성과 열전달 계수를 계산하고 R-22와 비교하였다. 계산한 R-32의 물성을 이용하여 3-5kW 용량의 냉방시스템을 전산모사하여 R-22 대체용 순수 냉매로서의 R-32의 가능성을 조사하였다.

(1) R-32의 증발잠열이 R-22보다 50% 가량 커서 냉방효과(kW/kg)가 우수하다. 그러나 포화증기의 비체적이 비슷한 가운데 증기압이 높고 증발기와 응축기의 압력차가 커서 압축기 소요동력이 R-22에 비하여 매우 크다. 따라서 시스템의 성능계수가 R-22보다 약 10~30%가량 작다.

(2) 시스템 운전 압력비가 R-22에 비하여 높고 비열비가 커서, 압축기 출구에서의 온도가 130~150°C에 이르러, R-22용 기존 압축기(95~105°C)를 개선하지 않으면 운전이 불가능할 것으로 예측된다. R-32를 R-22 대체용 순수 냉매로 사용하려면 출구온도가 저하되도록 압축기를 개선하여야 한다.

(3) R-32의 열전달 계수는 R-22에 비하여 20~40% 가량 우수하다. R-22를 사용할 때 보다 열교환기의 효율이 증가할 것으로 예상되며 열교환기 효율의 변화에 따라 시스템 성능이 민감하게 변한다. 그러나 같은 운전조건하에서 열교환기의 성능향상을 통하여 R-22보다 우수한 성능계수를 구현하기 어렵다.

(4) 냉동효과가 우수함에도 불구하고, 압축기 출구온도가 높고 성능계수가 떨어진다는 사실 때문에 R-22 대체 냉매로서 순수냉매 R-32가 배제될 수 있다. 주된 원인은 R-32의 증기압이 R-22에 비하여 지나치게 높는데 있다. 따라서 대체용 냉매를

혼합하여 성능계수를 향상시키되 우수한 체적용량과 냉동효과는 유지하는 방향으로 우선 모색되어야 한다.

참고문헌

- (1) ASHRAE, 1993, "ASHRAE supports revised Montreal Protocol," ASHRAE Journal, Jan. p. 6.
- (2) Air-Conditioning and Refrigeration Institute, 1992, "Participants' Handbook : R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program (AREP)"
- (3) PAFT : Programme for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing, "HFC-32"
- (4) Malbrunot, P. F., Meunier, P. A., and Scantena, G. M., Mears, W. H., Murphy, K. P., and Sink, J. V., 1968, "Pressure-Volume-Temperature Behavior of Difluoromethane," J. Chem. and Eng. Data, Vol. 13, No. 1, Jan., pp. 16~21.
- (5) Kanungo, A. O. T., Popowicz, A., Ishida, T., 1987, "Vapor Pressure Isotope effects in Liquid Methylene Difluoride." J. Physical Chemistry, Vol. 91, pp. 4198~4203.
- (6) Qian, Z. Y., Matsunobe, H., Sato, H., and Watanabe, K., 1991, "Thermodynamic Property Measurements for Difluoromethane(HFC-32) by a Burnett Method" Proceedings of the 12th Japan symposium on Thermophysical properties, Japan Society of Thermophysical society, pp. 73~76.
- (7) Mclinden, M. O., 1989, "Thermodynamic Properties of CFC Alternatives-A Survey of Available Data," CFCs : Today's Options-Tomorrow's Solutions, Proceedings of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, pp. 17-31
- (8) Rodgers, A. S., Chao, J., Wilhot, R. C., and Zwolinski, B. J., 1974, "Ideal Gas Thermodynamic Properties of Eight Chloro-and Fluoromethanes" J. Physical Chemistry Ref. Data, Vol. 3, pp. 117~140.
- (9) JANAF Thermochemical Tables, 1985, J. Physical and Chemical, Ref. Data, Vol. 14, Supplement 1
- (10) Szymurski, S. R., 1992, "Materials Compati-

- bility and Lubricant Research on CFC Refrigerant Substitute-Reserach Update," The 1992 International CFC and Halon Alternatives Conference: Stratospheric Ozone Protection for the 90's, Sept. 29-Oct. 1, Washington, D. C., pp. 73~82.
- (11) Spatz, M. W., Longsdon, P. B., Wijaya, H., and Zheng, J., 1992, "Performance of HCFC-22 Alternative Refrigerants In Air Conditioning Equipment," *ibid.*, pp. 223~232.
- (12) Tan, L. C. and Guo, J. X., 1992, "New Refrigerants of Room Air-Conditioners and Their Performances," *ibid.*, pp. 233~240.
- (13) Hanson, O. M. and Essen, L. Van, 1992, "Comparison of Some Domestic Air Conditioning Drop-In Blend Test Measurements with Modified REFPROP Predictions," *ibid.*, pp. 241~250.
- (14) 박영무, 이흥원, 1991, "R-134a의 열역학적 물성치 계산과 냉동성능에 관한 연구," 공기조화 냉동공학회 논문집, 3권, 4호, pp. 286~296.
- (15) ICI Chemicals & Polymers Ltd. 1992, "KLEA 32 Preliminary data sheet"
- (16) McAdame, W. h., 1942, "Heat transmission," 2nd ed., N. Y. McGraw-Hill
- (17) Petukhov, B. S., 1970, "Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Propertis," : Advance in Heat Transfer, Vol. 6, ed. by J. P. Hartnett and T. F. Irvin, Jr. pp. 503~664, N. Y. Academic Press.
- (18) Eckels, S. J. and Pate, M. B. 1990, "A Comparison of R-134a and R-12 in-Tube Heat Transfer Coefficients Based on Existing Correlations" ASHRAE Trans. vol. 96 Pt 1, #3331
- (19) Traviss, D. P., Rohsenow, W. M., and Baron, A. B., 1973, "Forced Convection Condensation inside Tubes: a Heat Transfer Equation for Condenser Design" ASHRAE Trans., vol. 79, pt. 1, pp. 157~165.
- (20) Chaddock, J. B. and Noerager, J. A., 1966, "Evaporation of R12 in a Horizontal Tube with constant Heat Flux," ASHRAE Trans. Vol. 72, Pt 1, pp. 90~103.
- (21) Stoecker, W. F. and Jones, W. J., 1986, "Refrigeration and Air Conditioning," McGraw-Hill,

N. Y. p. 219

부 록

평균열전달 계수 계산에 사용된 각 영역별 국소 열전달 계수는 다음과 같다.

1. 단상 열전달 계수

$$\begin{aligned} \text{MaAdame(Dittus-Boelter)}^{(16)} \\ h_l = 0.023 G_r C_p P_r^{-1} Re^{-0.020} \quad (\text{A-1}) \\ C = 0.3 \text{ 응축기} \\ = 0.4 \text{ 증발기} \end{aligned}$$

2. 응축 열전달 계수

$$\begin{aligned} \text{Traviss et al}^{(19)} \\ h_{tw} = k_l P_r Re^{0.9} F(X_{tt}) / DF_2 \\ F(X_{tt}) < 1.0 \quad (\text{A-2}) \\ = k_l P_r Re^{0.9} F(X_{tt})^{1.15} / DF_2 \\ 1.0 < F(X_{tt}) < 15 \\ Re = G_r D (1.0 - x) / \mu_l \\ X_{tt} = \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \\ F(X_{tt}) = 0.015 (X_{tt}^{-1} + 2.85 X_{tt}^{-0.467}) \\ F_2 = 0.707 P_r R_e^{0.5} \quad R_e < 50 \\ = 5 P_r + 5 \ln[1 + P_r \{0.09636 R_e^{0.585} - 1\}] \\ 50 < R_e < 1125 \\ = 5 P_r + 5 \ln(1 + 5 P_r) + 2.5 \ln(0.0031 R_e^{0.812}) \\ 1125 < R_e \end{aligned}$$

3. 비등 열전달 계수

$$\begin{aligned} \text{Chaddock and Noerager}^{(20)} \\ h_{tp}(x) = 3.0 h_l \left(\frac{1}{X_{tt}} \right)^{2/3} \quad (\text{A-3}) \end{aligned}$$

R-32의 열역학적 물성 계산에 사용된 상태식, 증기압, 포화액밀도 및 이상기체 비열은 다음식과 같다.

4. M-H 상태식: Malbrunot et al.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} P = \frac{RT}{V-b} + \sum_{i=2}^5 \frac{A_i + B_i T + C_i \exp(-KT_r)}{(V-b)^i} \\ T_r = T / T_c \quad (\text{A-4}) \end{aligned}$$

P의 단위는 atm, $T = 273.16 + T^\circ\text{C}$, V의 단위는 cm^3/gm 이다. $T_c = 351.56\text{K}$, 상수 K, R 및 계수 A_i, B_i, C_i 는 Table A-1와 같다.

5. 증기압: McLinden⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \ln(P/P_c) = a_1 \tau / (1 - \tau) + a_2 \tau + a_3 \tau^{1.89} + a_4 \tau^3 \\ \tau = 1 - T / T_c \quad (\text{A-5}) \end{aligned}$$

Table A-1 coefficient to equation (A-4)

i	A to equation (A-4)	B to equation (A-4)	C to equation (A-4)
2	-3605.3770	+5.11013681	-64629.899
3	+5533.0400	-6.9894600	+170602.409
4	-3329.8877	0.0000000	0.000000
5	-3556.2514	14.529423	-104589.48
R=1.577232cc. atm/Kgm		b=0.03685236	K=5.475

Table A-2 Coefficients to equation (A-5), (A-6), and (A-7)

i	a to equation (A-5)	α to equation (A-5)	c to equation (A-7)
1	-0.052244	1.667251	-2.661170
2	2.844032	2.720934	5.580232
3	4.108620	-4.374005	-1.680558
4	3.450397	3.272961	0
RMS%	0.29%	0.24%	0.05%
temp. limit K	149-	248-	150-500

임계압력의 단위는 kPa, 온도는 K이며 $P_c=5830$, kPa, $T_c=351.5^\circ\text{K}$ 이며 계수는 Table A-2에 있다.

6. 포화액 밀도 : McLinden⁷⁾

$$\rho/\rho_c = 1 + \alpha_1 \tau^\beta + \alpha_2 \tau^{(2/3)} + \alpha_3 \tau + \alpha_4 \tau^{(4/3)}$$

$$\tau = 1 - T/T_c, \beta = 0.355 \quad (\text{A-6})$$

7. 이상기체 비열 : McLinden⁷⁾

$$C_p^\circ/R = c_0 + c_1 T_r + c_2 T_r^2 + c_3 T_r^3$$

$$T_r = T/T_c \text{ 이며, } R = 8.3145 \text{ kJ/Kmol K 이다.} \quad (\text{A-7})$$

Table A3 Saturation Properties of Difluoromethane (R-32)

Ts °C	Ps kPa	Specific volume		Enthalpy		Entropy	
		vf m ³ /kg	vg	hf kJ/kg	hg	sf kJ/kgK	sg
-60.	65.13	.0008066	.50825	-31.572	359.666	-.14112	1.69431
-55.	85.36	.0008163	.39456	-23.795	362.409	-.10513	1.66515
-50.	110.33	.0008263	.31014	-15.938	365.045	-.06962	1.63760
-45.	140.81	.0008366	.24657	-8.006	367.566	-.03457	1.61151
-40.	177.60	.0008473	.19808	.000	369.963	.00000	1.58673
-35.	221.56	.0008584	.16066	8.077	372.226	.03412	1.56313
-30.	273.60	.0008699	.13145	16.224	374.347	.06778	1.54057
-25.	334.67	.0008819	.10841	24.439	376.316	.10101	1.51895
-20.	405.80	.0008943	.09006	32.723	378.123	.13380	1.49816
-15.	488.04	.0009074	.07532	41.079	379.757	.16620	1.47809
-10.	582.49	.0009211	.06336	49.510	381.204	.19821	1.45864
-5.	690.29	.0009355	.05359	58.023	382.452	.22988	1.43971
0.	812.66	.0009506	.04555	66.626	383.483	.26124	1.42121
5.	950.83	.0009667	.03887	75.330	384.278	.29234	1.40302
10.	1106.12	.0009838	.03330	84.153	384.815	.32323	1.38504
15.	1279.89	.0010022	.02861	93.114	385.065	.35400	1.36715
20.	1473.59	.0010219	.02465	102.237	384.996	.38471	1.34923
25.	1688.70	.0010432	.02127	111.555	384.567	.41547	1.33113
30.	1926.83	.0010666	.01838	121.106	383.727	.44641	1.31268
35.	2189.66	.0010923	.01589	130.940	382.410	.47765	1.29369
40.	2478.97	.0011211	.01373	141.120	380.535	.50939	1.27390
45.	2796.65	.0011538	.01185	151.725	377.990	.54184	1.25301
50.	3144.74	.0011915	.01019	162.865	374.626	.57531	1.23059
55.	3525.40	.0012363	.00873	174.690	370.227	.61019	1.20605
60.	3940.98	.0012914	.00742	187.423	364.468	.64711	1.17852
65.	4393.99	.0013630	.00622	201.438	356.809	.68707	1.14653
70.	4887.14	.0014656	.00511	217.482	346.236	.73212	1.10732
75.	5423.37	.0016496	.00403	237.790	330.428	.78845	1.05452

Table A4 Super-heated Properties of Difluoromethane(R-32)

Sat. Temp. -20. °C (405.805 kPa)				Sat. Temp. -10°C (582.487kPa)			Sat. Temp. 0. °C (812.655kPa)		
T °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK
-20.	.090064	378.123	1.4982						
-15.	.092607	382.886	1.5168						
-10.	.095097	387.596	1.5349	.063362	318.204	1.4586			
-5.	.097542	392.262	1.5524	.065256	386.318	1.4779			
0.	.099946	396.895	1.5695	.067101	391.348	1.4965	.045546	383.483	1.4212
5.	.102314	401.502	1.5863	.068904	396.310	1.5145	.047013	389.016	1.4413
10.	.104651	406.090	1.6026	.070669	401.217	1.5320	.048433	394.426	1.4606
15.	.106959	410.665	1.6186	.072402	406.081	1.5490	.049812	399.743	1.4791
20.	.109242	415.232	1.6343	.074106	410.910	1.5656	.051156	404.959	1.4971
25.	.111503	419.797	1.6498	.075785	415.712	1.5818	.052470	410.118	1.5146

Sat. Temp. 5.°C (950.829 kPa)				Sat. Temp. 10°C (1106.119kPa)			Sat. Temp. 15°C (1279.894 kPa)		
T °C	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK
5.	.038872	384.278	1.4030						
10.	.040181	390.054	1.4236	.033297	384.815	1.3850			
15.	.041443	395.680	1.4433	.034476	390.861	1.4062	.028610	385.065	1.3672
20.	.042665	401.184	1.4622	.035608	396.725	1.4264	.029683	391.414	1.3890
25.	.043853	406.587	1.4805	.036701	402.441	1.4457	.030706	397.541	1.4097
30.	.045012	411.909	1.4982	.037759	408.038	1.4643	.031690	403.492	1.4295
35.	.046144	417.165	1.5154	.038788	413.536	1.4823	.032640	409.298	1.4485
40.	.047254	422.366	1.5321	.039792	418.954	1.4998	.033562	414.986	1.4668
45.	.048343	427.523	1.5485	.040774	424.306	1.5167	.034458	420.579	1.4845
50.	.049415	432.646	1.5645	.041736	429.604	1.5332	.035333	426.091	1.5017

Table A4 (continued)

Sat. Temp. 20 °C (1473.586 kPa)				Sat. Temp. 25°C (1688.703kPa)			Sat. Temp. 30°C (1926.834kPa)		
T	v	h	s	v	h	s	v	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK
20.	.024645	384.996	1.3492						
25.	.025629	391.687	1.3719	.021270	384.567	1.3311			
30.	.026563	398.109	1.3932	.022181	391.651	1.3547	.018379	383.727	1.3127
35.	.027457	404.316	1.4135	.023041	398.403	1.3768	.019233	391.267	1.3374
40.	.028316	410.352	1.4330	.023859	404.896	1.3977	.020031	398.396	1.3603
45.	.029147	416.247	1.4516	.024642	411.183	1.4176	.020785	405.209	1.3819
50.	.029953	422.027	1.4697	.025396	417.303	1.4367	.021504	411.773	1.4024
55.	.030738	427.712	1.4871	.026126	423.285	1.4551	.022194	418.138	1.4219
60.	.031504	433.320	1.5041	.026835	429.156	1.4728	.022859	424.341	1.4407
65.	.032253	438.864	1.5206	.027525	434.935	1.4900	.023503	430.412	1.4588

Sat. Temp. 35 °C (2189.660 kPa)				Sat. Temp. 40°C (2478.965kPa)			Sat. Temp. 45°C (2796.648kPa)		
T	v	h	s	v	h	s	v	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK
35.	.015889	382.410	1.2937						
40.	.016697	390.492	1.3197	.013730	380.535	1.2739			
45.	.017445	398.055	1.3437	.014505	389.272	1.3016	.011847	377.990	1.2530
50.	.018146	405.229	1.3660	.015212	397.341	1.3268	.012600	387.541	1.2828
55.	.018811	412.102	1.3871	.015870	404.927	1.3500	.013276	396.212	1.3094
60.	.019446	418.737	1.4072	.016489	412.146	1.3719	.013898	404.272	1.3338
65.	.020055	425.180	1.4264	.017077	419.079	1.3925	.014478	411.882	1.3565
70.	.020644	431.466	1.4449	.017639	425.785	1.4122	.015026	419.147	1.3778
75.	.021215	437.625	1.4627	.018181	432.306	1.4311	.015548	426.140	1.3980
80.	.021770	443.677	1.4799	.018704	438.676	1.4493	.016049	432.916	1.4174
85.	.022311	449.641	1.4967	.019211	444.922	1.4668	.016531	439.515	1.4359
90.	.022840	455.533	1.5131	.019705	451.065	1.4838	.016997	445.969	1.4538
95.	.023358	461.366	1.5290	.020187	457.122	1.5004	.017450	452.302	1.4711
100	.023867	467.150	1.5446	.020659	463.110	1.5166	.017892	458.536	1.4880

Table A4 (Continued)

Sat. Temp. 50 °C (3144.737 kPa)				Sat. Temp. 55°C (3525.404 kPa)			Sat. Temp. 60 °C (3940.984kPa)		
T	v	h	s	v	h	s	v	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK
50.	.010193	374.626	1.2306						
55.	.010937	385.220	1.2631	.008727	370.227	1.2061			
60.	.011590	394.617	1.2915	.009478	382.211	1.2423	.007416	364.468	1.1785
65.	.012182	403.229	1.3172	.010116	392.501	1.2730	.008192	378.395	1.2200
70.	.012731	411.283	1.3409	.010686	401.763	1.3002	.008824	389.806	1.2535
75.	.013245	418.918	1.3629	.011207	410.324	1.3249	.009376	399.839	1.2826
80.	.013732	426.230	1.3838	.011692	418.375	1.3479	.009874	408.982	1.3086
85.	.014197	433.284	1.4036	.012148	426.037	1.3694	.010334	417.499	1.3326
90.	.014643	440.130	1.4226	.012582	433.395	1.3898	.010764	425.549	1.3549
95.	.015074	446.807	1.4409	.012998	440.510	1.4093	.011171	433.240	1.3759
100.	.015491	453.345	1.4585	.013397	447.428	1.4280	.011559	440.645	1.3959
105.	.015897	459.766	1.4756	.013783	454.183	1.4459	.011931	447.821	1.4150
110.	.016293	466.091	1.4922	.014158	460.804	1.4633	.012290	454.809	1.4334
115.	.016679	472.336	1.5084	.014522	467.313	1.4802	.012637	461.642	1.4511
120.	.017057	478.514	1.5242	.014878	473.729	1.4966	.012974	468.346	1.4683

Sat. Temp. 65 °C (4393.992 kPa)				Sat. Temp. 70 °C (4887.142 kPa)		
T	v	h	s	v	h	s
°C	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kgK
65.	.006224	356.809	1.1465			
70.	.007055	373.639	1.1960	.005114	346.236	1.1073
75.	.007689	386.475	1.2331	.006048	367.806	1.1698
80.	.008227	397.426	1.2643	.006691	382.468	1.2116
85.	.008707	407.237	1.2919	.007220	394.507	1.2454
90.	.009144	416.277	1.3170	.007683	405.081	1.2748
95.	.009551	424.755	1.3402	.008101	414.702	1.3011
100.	.009934	432.807	1.3619	.008487	423.649	1.3252
105.	.010298	440.527	1.3825	.008848	432.094	1.3477
110.	.010645	447.980	1.4020	.009190	440.151	1.3689
115.	.010979	455.216	1.4208	.009515	447.901	1.3890
120.	.011302	462.275	1.4389	.009827	455.401	1.4082