

대체 CFC/대체 냉매의 열역학 및 전달 물성 I : 순수 물질 Thermodynamic and Transport Properties of CFC Alternatives/Alternative Refrigerants I : Pure Substances

박 영 무
Y. M. Park
아주 대학교 기계공학과



- 1956년생
- 열역학 대체냉매의 열-물리물성에너지 변환시스템. 냉동.

1. 서 론

기존의 CFC계열 냉매 R12, R113, R114, R115 등이 오존층의 파괴와 지구 온난화의 주요 원인 중의 하나로 밝혀짐에 따라¹⁾ 이들의 사용이 국제적으로 규제되고 있다(UNEP 1987). 따라서 이들을 대체 할 수 있는 새로운 물질을 개발하기 위한 노력이 국내외에서 활발히 이루어 지고 있다. 이러한 연구는 크게 두가지 방향으로 모색되고 있다. 한가지는 오존층 파괴 효과가 없거나 매우 작은 신물질을 개발하는 것이며 다른 한가지는 기존 혹은 새로 개발된 물질을 적절히 혼합하여 오존층 파괴 및 온난화 효과가 작은 혼합 대체 물질을 개발하는 것이다. 대체 냉매의 관점에서 보면 전자의 노력으로 R134a를 비롯하여 몇가지 대체 냉매가 개발되었으며 후자는 에너지 효율 측면에서 오래전부터 연구 되어 왔으며 근래에 들어 대체 혼합냉매의 측면에서 새로운 조명을 받고 있다.

새로운 냉매를 개발하거나 혼합냉매를 구성하여 냉동 시스템의 작동유체로 이용하거나 발포제, 세정제, 분사제 등의 제조 공정에 이용하려면 이들의 열역학, 전달 물성 및 물리-화학적 성질에 관한 자료가 필요하다. 대체 CFC를 개발

중이거나 이미 일부를 개발한 국가를 중심으로 대체 물질의 열-물리 물성에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며 대체 CFC를 사용하는 시스템의 설계에 필요한 기본 물성으로서의 중요성과, 환경문제와 관련하여, 연구의 시급성에 대한 국제적인 인식을 기반으로 각국의 연구자들은 국제적인 공동연구 혹은 최소한 연구 결과의 공유를 위하여 노력하고 있다.²⁾ 국내에서는 대체 냉매의 열-물리 물성 연구의 중요성을 인식을 하고 물성 측정 및 이와 관련된 실험 연구를 준비하고 있으나 아직 대체 냉매 물성의 측정과 관련된 연구사례가 발표된 바는 없으며 외국의 실험 자료를 이용한 순수 및 혼합 냉매의 열역학적 물성의 추산에 관한 다수의 연구 사례가 발표되었다.

대체 CFC중에서 특히 대체 냉매는 가정용 냉장고와 냉방기, 자동차 냉방기, 대형 냉동기 및 관련 소재 등 사용 범위가 넓어, 사용량에 있어서나 관련 산업에 미치는 영향에 있어서 매우 중요한 위치에 있다. 대체 냉매의 열역학 및 전달 물성과 물리-화학적 물성은 새로운 냉동 시스템 설계에 필수적으로 요구되므로, 새로운 대체 물질의 개발과 함께, 이에 대한 연구가 반드시 병행하여 수행되어야 한다.

이러한 관점에서 지금까지 각국에서 수행된 연구 결과를 통하여 제안된 HCFC 및 HFC계열 대체 CFC R23, R32, R125, R143a, R152a, R124, R142b, R123, R123a, R225ca, R225cb의 평형 열역학적 물성 혹은 전달 물성에 관한 기존의 연구 자료를 수집 정리 하였다.

1.1 국내외의 CFC사용현황

86년 기준으로 전세계에서 CFC는 110만 톤이 생산되어 유럽공동체에서 37% 미국 29% 동구권 23% 일본에서 11% 비율로 사용되었으며 한국의 사용량은 Table 1.1과 같다. 각국의 용도를 살펴보면 미국은 냉매용(45%), 발포제(20%), 세정제(15%), 일본은 세정제(51%), 발포제(25%), 냉매용(15%), EC에서는 분사제(40%), 발포제(25%), 세정제(20%)로 사용되고 있으며, 한국에서는 발포제(41%), 세정제(22%), 냉매(20%), 분사제(11%), 기타(1%) 순서로 사용되고 있다.³⁾ 한국정부의 계획에 의하면 1992년에 허용된 CFC 전체 사용 예정량은 16,592톤이며 발포용 52.3%, 냉매용 30.9%, 세정용 10.9%, 기타 5.9%의 순서로 배정할 예정이다.⁴⁾

Table 1.1 Consumption of CFC in Korea
(Unit : ton)³⁾

CFC—Yr도	1986	1987	1988	1989	1990
CFC-11	4745	7812	7756	9702	12000
CFC-12	1657	2941	3282	4223	6000
CFC-113	2742	4166	4760	5645	6500
CFC-114	100	120	160	160	200
계	9244	150958	19730	24700	

1.2 발포용 대체 CFC

단열재로서 냉장고의 벽재료로 사용되는 경질 폴리우레탄은 단열 성질과 구조적 성질에 있어서 매우 우수한 소재이나 발포 공정에서 규제 대상인 CFC11이 사용되므로 폴리우레탄을 계속적으로 사용하기 위해서는 CFC11을 대체할 수 있는 새로운 발포제가 개발되어야 한다. 경질 폴리우레탄 발포제의 조건을 보면 Table 1.2와 같으며 현재 대체용으로 HCFC123과 HCFC141b가 제안되고 있다. HCFC123과 141b의 증기열전도 계수가 CFC11 보다 7% 정도 커서 HCFC계열 대체 발포제를 사용한 폴리우레탄은 CFC11으로 발포한 것보다 단열성이 떨어진다. 따라서 같은 두께의 벽이라면 HCHC계열 발포제를 사용할 때 약 3~4%의 에너지 손실이 예

Table 1.2 Rigid polyurethane blowing agent requirements⁶⁾

- Low toxicity
- Environmentally acceptable
- Preferably nonflammable, moderately flammable may be acceptable
- Low fuel value in foam
- chemical stability and compatibility
 - of blowing agent
 - in the system
 - in the foam
- Low vapor thermal conductivity
- Appropriate volatility
- Low solubility and permeability in polymer
- Adequate solubility in polyol
- Appropriate viscosity for blowing agent/polyol mixture

H chlorine-free						
R50 -161 low						
		R40 -24 mod			R41 -78 low	
flammable	R30 40 mod	R31 -9 mod	R32 -52 low	flammable		
non- flammable	R20 61 high	R21 9 mod	R22 -41 low	R23 -82 low	non- flammable	
	R10 77 high	R11 24 mod-low	R12 -30 low	R13 -81 low	R14 -128 low	poor oil - solubility
Cl	very long atmospheric life				F	

Fig. 1 Boiling points in °C and toxicity for Methane-based CFCs²⁾

H chlorine-free								
R170 -89 low								
		R160 -13 mod	R161 -78 high					
		R150.a 84/57 mod	R151.a 53/16	R152.a 31/-25 /low				
flammable	R140.a 114/74 mod	R141.a,b 76/ /32 low?	R142.a,b 35/ /-9 mod? low	R143.a 5/-48 low?	flammable			
non- flammable	R130.a 146/131 high	R131.a,b 103/88	R132.a,b,c 59/47 mod	R133.a,b 17/12 mod	R134.a -20/-27 low	non- flammable		
	R120 162 high	R121.a 117/116	R122.a,b 72/73/ low?	R123.a,b 27/28 mod-low?	R124. -10/-10 /low?	R125 -48		
Cl	R110 185 high	R111 137	R112.a 93/92 low?	R113.a 48/47 low	R114.a 4/3 low	R115 -39 low	R116 -78 low	poor oil- solubility
	very long atmospheric life						F	

Fig. 2 Boiling points in °C and toxicity for Ethane-based CFCs²⁾

상된다.⁵⁾ 분자량의 차이로 말미암아 HCFC123을 사용하면 CFC11에 비하여 11% 가량 발포제가 더 필요하며 HCFC141b를 사용하면 15% 가량이 더 필요하다.⁶⁾ CFC11은 가연성이 없으나 HCFC 141b는 일정 한도 이상이면 공기 중에서도 폭발 위험이 있다. 따라서 HCFC141b와 HCFC123이 이상적인 대체 CFC 발포제가 되기에는 문제가 있으며 이를 개선하기 위한 노력이 필요하다.

1.3 기존 및 대체 CFC의 화학 구조상의 특성

암모니아와 극저온 물질을 제외하면 기존의 냉매는 대부분이 메탄계열과 에탄계열에 속한다. 규제 대상이 되고 있는 전 할로겐 화합물 냉매는 독성과 비등점을 기준으로 도시한 피라미드 (Fig. 1, Fig. 2)에서 대체로 하단에 위치하며 대기중에서 잔류하는 기간이 길어서 오존층 파괴와 온실 효과의 주요 원인이 된다. 일반적으로 염소를 많이 포함한 화합물은 비등점이 높고 독성이 있으며 불소를 많이 함유한 화합물은 안정하다. 수소를 사용하여 염소와 불소의 함유량 일부를 치환함으로써 화합물의 안정성을 유지하면서 독성을 줄일 수 있다. 수소, 불소, 및 염소의 기능을 복합적으로 고려할 때 피라미드의 우측하단에 위치한 화합물이 대체 냉매로서의 가능성이 높다. 냉매-오일 용해도에서도 일반적인 경향을 볼 수 있다. 즉 염소가 없으며

불소 1개와 수소를 함유한 화합물(예 R134a)은 기존의 오일과 섞이지 않으며 염소 1개와 수소를 포함한 화합물(예 : R22, R152a)은 오일과 일부 섞이며 나머지 화합물은 오일과 잘 섞인다.⁵⁾

1.4 대체 냉매의 개발 과정

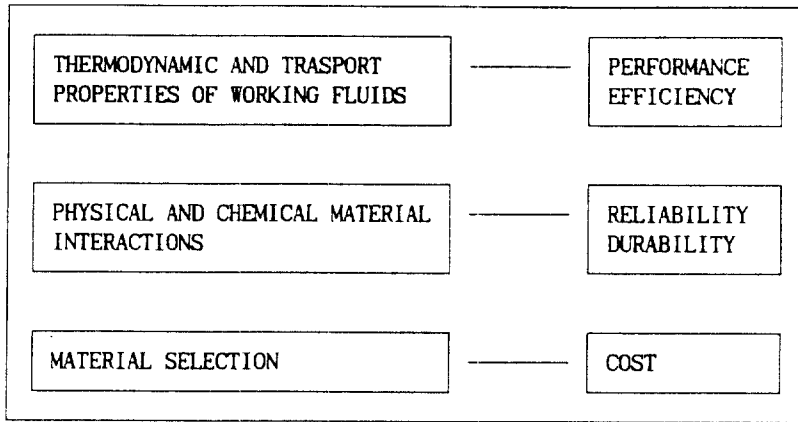
CFC 계열의 기존 냉매를 대체할 수 있는 새로운 냉매를 개발하려면 가장 먼저 가용한 화합물의 열역학 및 물리-화학적 성질 및 환경에 미치는 영향이 검토 되어야 한다 (Table 1.3). 이와 함께 화학적 안전성, 독성, 폭발성, ODP (Ozone Depletion Potential), GWP(Greenhouse Warming Potential) 등이 검토되어야 하며 시스템 내에서 다른 물질 혹은 물체와 작용하여 부정적인 효과를 내지 않도록 상용성(compatibility)이 좋아야한다. 기존의 압축기를 이용하는 증기 압축식 냉동시스템에서 냉매는 오일과 섞여서 운전되므로 윤활류와의 친화성도 요구되므로 대체 냉매의 개발과 함께 적절한 윤활류도 개발되어야 한다.

대체 냉매를 개발함에 있어서 특히 신물질의 상용성이 다른 성질 즉 열역학, 전달, 및 물리 화학적 성질들에 영향을 줄 수 있으므로 우선적으로 고려 되어야 한다. 이러한 관점에서 대체 냉매의 개발과정을 도시화 하면 Fig. 3과 같다.

대체 냉매 개발 과정의 첫 단계는 분자 구조의 모형화(molecular modelling) 단계이다. 냉매로서

Table 1.3 Refrigerant criteria²⁾

Environment	Low ozone-depletion potential (chlorine and bromine-free if possible), low greenhouse potential (short atmospheric life) and low somg potential (dose not rapidly produce toxic materials in the lower atmosphere.
Chemical	Stable and inert.
Safely	Nontoxic and nonflammable.
Thermal	Critical point and boiling point appropriate for the application good cycle efficiency (low vapor heat capacity.) low viscosity, high thermal conductivity, low freezing point. large heat of vaporization, and dry compression process.
Other	Satisfactory oil solubility, high dialectic strength of vapor (if used with hermetic compressor motors). Compatible with copper and steel and other commen materials, easy leak detection, appropriate speed of sound if used with centrifugal compressors and low cost.



(a) Importance of compatibility

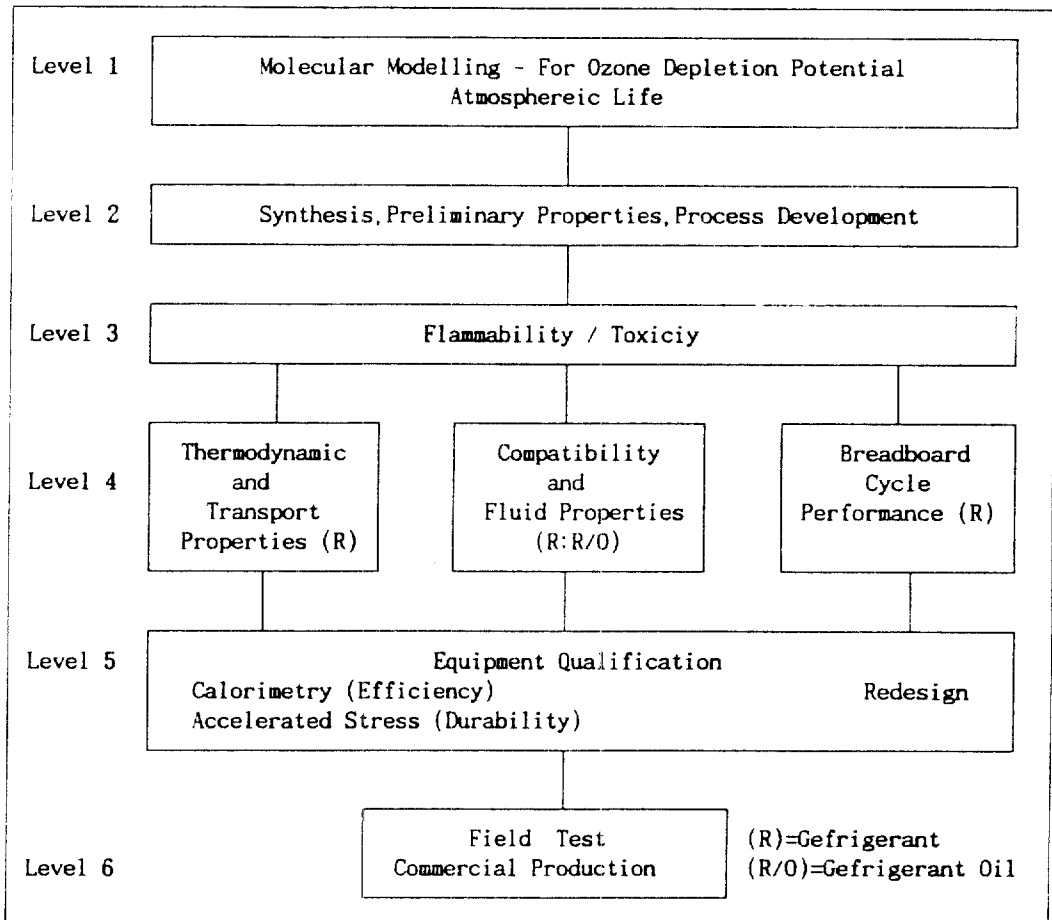


Fig. 3 (b) Refrigerant development process⁷⁾

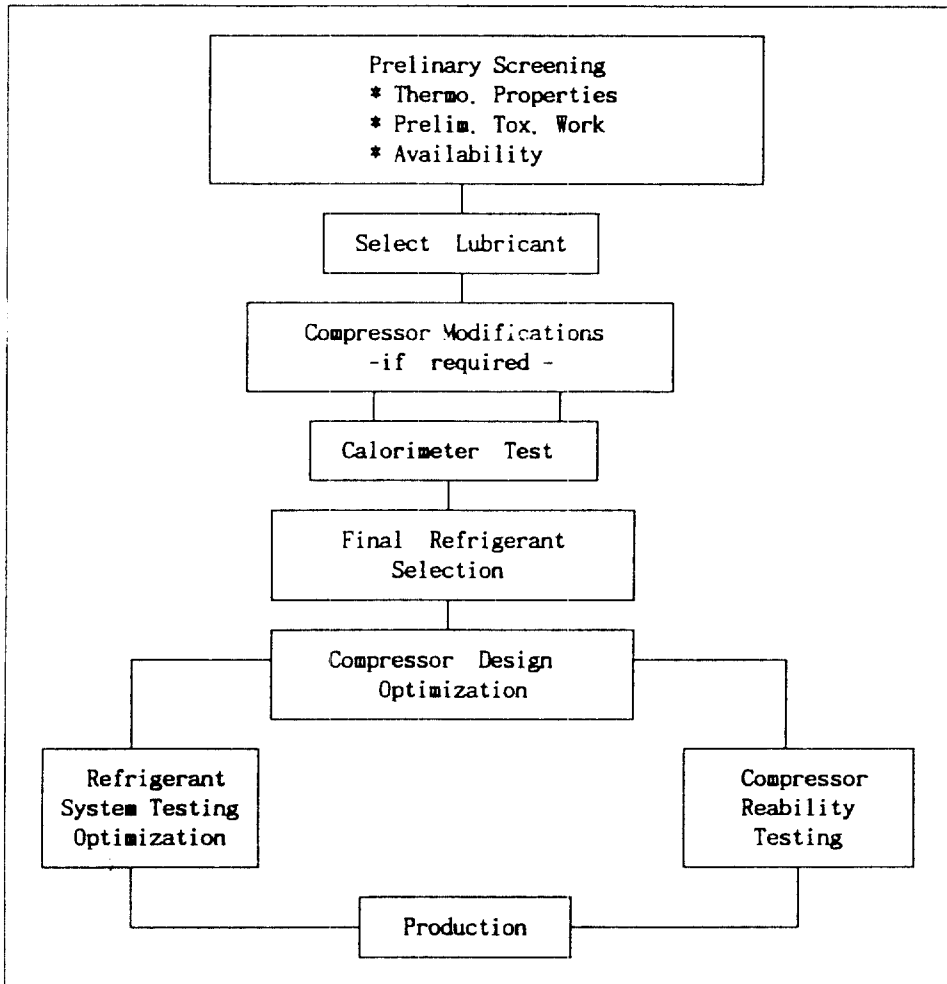


Fig. 4 Alternative refrigerant selection and production design⁸⁾

갖추어야 할 조건을 (Table 1.3) 만족 하도록 분자 구조를 설계하여야 한다. 제 2 단계는 설계된 화학 구조를 갖는 화합물을 합성하는 단계이며 대체 물질 개발에 있어서 가장 많은 시간과 자원이 요구되는 단계이다. 실험적으로 제작된 화합물에 관한 최소한의 실험 자료를 이용하여 예비 물성을 계산하며 이를 이용하여 공정설계를 완료하며 시험공장에서 대체냉매를 생산한다. 제 3 단계는 합성된 화합물의 냉동 성능을 검사하기 전에 독성 및 가연성에 따른 위험성에 대한 검토가 있어야 한다. 특히 독성 시험은 장 시간 동안 여러 각도에서 수행되어야 한다. 제 4

단계에서 냉매의 열역학, 전달, 및 물리 화학적 물성에 대한 정확한 자료와 냉매와 잘 섞일 수 있는 윤활유 및 다른 재료와의 상용성에 대한 상세한 연구가 수행되어야 한다. 이와 함께 실험용 냉동 시스템을 이용하여 개발된 냉매의 성능을 측정한다. 제 5 단계에서는 개발된 대체 냉매를 실제 시스템에 적용하여 냉동성능과 시스템의 내구성을 포함한 종합적 시험을 거쳐서 시스템의 설계자료를 획득하게 된다. 최종 단계에서는 사용제품에 적용하고 현장실험을 통하여 대체 냉매의 성능을 최종 점검을 한 후 대체 냉매의 개발을 완료한다. 개발된 대체냉매의

선별과정과 이를 이용한 냉동시스템의 설계과정을 살펴보면 Fig. 4와 같다.

대체 CFC-대체냉매-의 개발 및 선별과정 그리고 이를 이용한 새로운 시스템의 설계 과정을 체계적으로 살펴보았다. 대체 CFC 중에서 특히 대체 냉매는 가정용 냉장고와 냉방기, 자동차 냉방기, 대형 냉동기 및 관련 소재 등 사용 범위가 넓어, 사용량에 있어서나 관련 산업에 미치는 영향에 있어서 매우 중요한 위치에 있다. 대체 냉매의 열역학 및 전달 물성과 물리-화학적 물성은 새로운 냉동 시스템 설계에 필수적으로 요구되므로, 새로운 대체 물질의 개발과 함께, 이에 대한 연구가 반드시 병행하여 수행되어야 한다.

학적인 조건을 만족하여야 하며 Fig. 4에서 보듯이 냉동 시스템을 설계하고자 할 때에는 정확한 열-물리적 물성이 필요하다. 그 중에서도 시스템의 예비 설계 단계에서 사이클 성능을 예측하기 위하여 우선적으로 열역학적 물성이 필요하다.

열역학적 물성으로 가장 먼저 필요한 것은 물질의 열-물리 상수이다. 지금까지 제안된 여러가지 대체 CFC의 열-물리 상수가 Table 2.1에 있다. 이와 함께 새로운 물질(유체)의 열역학적 물성-내부에너지, 엔탈피, 엔트로피, 비열 등-이 필요하며 이러한 물성은 (1) 이상기체 상태의 정압비열, (2) 증기압 (3) 포화액 비체적 (4) PVT 거동과 상태 방정식 (5) 기준점의 정 의로부터 계산이 가능하다.

2. 대체 CFC의 평형 열역학적 성질

Table 1.2에서 언급하였듯이 대체냉매는 열역

Table 2.1 Thermophysical constants for selected pure refrigerants⁹⁾

Fluid	Mw(kg/kmol)	NBP(K)	FP(K)	T _c (K)	P _c (kPa)	V _c (m ³ /kmol)	z _c
R11	137.370	296.9	162.15	471.2	4467.0	.2470	.2816
R12	120.910	243.4	115.15	385.0	4180.0	.2170	.2834
R13	104.460	191.7	92.15	302.0	3921.0	.1810	.2827
R13B1	148.910	215.5	105.15	340.2	4017.0	.2000	.2840
R22	86.470	232.3	113.15	369.3	5054.0	.1690	.2782
R23	70.010	191.0	118.15	299.1	4900.0	.1330	.2621
R113	187.380	320.7	238.15	487.5	3456.0	.3290	.2805
R114	170.920	276.8	179.15	419.0	3304.0	.3070	.2912
R142B	100.490	263.3	142.15	410.3	4120.0	.2310	.2790
R152A	66.050	248.5	156.15	386.4	4520.0	.1800	.2533
R123	152.930	300.3	165.95	456.9	3675.0	.2726	.2637
R143A	84.040	225.9	161.82	346.3	3758.0	.1940	.2532
R124	136.475	260.0	74.00	395.6	3660.0	.2440	.2715
R125	120.020	224.7	170.00	339.4	3637.0	.2100	.2707
R134A	102.030	247.1	172.15	374.3	4067.0	.1990	.2601
R32	52.024	221.5	137.00	351.5	5830.2	.1210	.2414
R141B	116.950	304.9	169.85	477.9	4400.0	.2521	.2792

2.1 이상기체의 정압비열(ideal gas heat capacity at constant pressure)

일반적으로 임의의 상태에서의 열역학적 성질은 -내부에너지, 엔탈피, 엔트로피- 기준점에서 값과의 차이로 표시하며 그 차이는 등압 변화에 의한 량과 등은 변화에 의한 량으로 표시할 수 있다. 등압 과정 동안 온도 변화에 의한 물성의 차이는 이상 기체 거동으로부터 계산할 수 있으며 등은 과정 동안 압력 변화에 따른 물성의 변화량은 유체의 PVT 혹은 기본 특성 상태 방정식을 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 유체의 열역학적 물성을 결정하려면 이상 기체 상태에서의 비열, 특히 정압 비열이 필요하며 온도의 함수로 표시할 수 있으면 유용하다.

이상기체의 비열은 열량계를 이용하여 측정할 수 있으며 측정 계기와 측정 기술의 발달로 측정의 정확도가 개선되고 있으나 압력이 매우 낮고 온도가 높아지면 측정의 어려움이 있다.¹⁰⁾ 이러한 측정의 어려운 점을 피하여 분자구조와 스펙트럼 측정을 통하여 얻을 수 있는 에너지 상태와 통계 열역학의 지식을 이용하여 이상기체의 열역학적 성질-엔탈피, 엔트로피, 비열

등-을 계산할 수 있다. 그러나 통계 열역학적인 방법에도 분자 구조가 커지고 복잡해지면 측정과 계산이 복잡해지므로 이용에 한계가 있다. 전자의 열량계를 이용하는 거시적 물성의 측정보다는 후자의 미시적 측정과 통계 열역학의 방법을 통하여 이상 기체의 비열을 계산하는 것이 보편적이다. 저압 상태의 기체에서 음속을 측정함으로써 비열을 계산할 수도 있으며 두 개 이상의 탄소를 갖는 분자의 경우에 음속 측정 방법이 가장 신뢰성이 높다.¹¹⁾

McLinden(1989)는 최근까지의 자료를(자료 목록 참조) 종합하여 대체 냉매 R23, R32, R125, R143a, R22, R134a, R152a, R124, R142b, R123의 이상 기체 상태의 정압비열을 최대 편차 0.42% 이내로 계산할 수 있는 실험식을 제안하였다.

$$C_p/R = C_0 + c_1T_r + C_2T_r^2 + C_3T_r^3 \dots \dots \dots (2.1)$$

$T_r = T/T_c$ 이며 $R = 8.3145(\text{kJ/kmol.K})$ 이다. 계수 C_0, C_1, C_2, C_3 는 Table 2.2와 같다.

2.2 증기압(vapor pressure)

증기압의 측정에는 constant volume method,

Table 2.2 Ideal gas heat capacity of selected alternative refrigerants¹¹⁾

Fluid	Coefficients to equation (2.1)				RMS error, %
	C_0	C_1	C_2	C_3	
R23	3.390 384	0.886 176	2.839 103	-0.967 486	0.08
R32	4.424 901	-2.661 170	5.580 232	-1.680 558	0.05
R125	2.838 680	11.581 633	-1.704 482	-0.266 732	0.03
R143a	2.154 036	8.979 986	-0.021 508	-0.678 740	0.05
R22	2.241 433	6.408 781	-0.510 996	-0.403 409	0.04
R134a	2.018 320	12.888 065	-3.828 818	0.714 145	0.04
R152a	3.421 564	3.937 963	4.399 060	-1.969 414	0.04
R124	3.941 838	10.417 617	1.082 720	-1.370 683	0.42
R142b	2.054 977	13.016 838	-2.771 827	-0.155 394	0.25
R123	0.724 188	27.762 732	-19.165 589	5.947 808	0.16

Note: Temperature limit of correlation for all fluids are 150 to 500K; the gas constant, $R = 8.314\text{J/mol K}$

magnetic densimeter, Burnett-isochoric apparatus 방법이 많이 사용되며 현재 사용되고 있는 여러가지 방법이 Table 2.6에 있다. 상태 방정식을 구성하는 과정에서 증기압 측정 자료를 이용하므로 상태 방정식이 주어지면 열역학적 일관성이 만족되도록 증기압을 계산 할 수 있다. 즉 상태방정식으로부터 $T_L=T_V, P_L=P_V, G_L=G_V$ 이 만족되도록 증기압을 계산할 수 있다.

그러나 열역학표를 작성하는 일회성 계산에서는 위의 방법으로 한다. 그러나 전산기의 발달과 함께 발전한 열-유체 시스템의 전산 보조 설계 및 해석 과정에 필수적인 물성의 전산화 과정에서 상경계 계산이 매우 자주 반복되므로 이에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 증기압을 포화 온도의 함수로 표시하면 매우 편리하다. 상태 방정식을 구성하는 과정에서 증기압 측정 자료가 충분히 이용되었다면 같은 자료를 이용하여 구한 증기압 식을 이용하여 상경계를 판별하고 비체적 및 증발열의 상호 관계를 규정하는 Claypeyron식을 이용하여 증발 잠열을 계산하더라도 열역학적 일관성과 계산 오차의 측

면에서 큰 문제가 없다.

McLinden(1989)은 지금까지 각종 연구결과를 수집하여(자료 목록 참조) 그 동안 제안된 HCFC 및 HFC계열 대체 냉매 R23, R32, R125, R143a, R152a, R124, R142b, R123의 증기압을 최대 편차 0.48% 이내로 계산할 수 있는 실험식을 제안하였다.

$$\ln(P/P_c) = a_1\tau / (1-\tau) + a_2\tau + a_3\tau^{1.89} + a_4\tau^3 \dots \dots \dots (2.2)$$

P 는 압력, P_c 는 임계압력, $\tau = 1 - T/T_c$ 이며 a_1, a_2, a_3, a_4 와 사용 범위는 Table 2.3에 있다.

2.3 포화액의 비체적(saturated liquid density)

포화액의 밀도 측정에는 magnetic suspension densimeter, pycnometer, constant volume method 등이 많이 사용되고 있으며 현재 사용되고 있는 여러 종류의 측정 방법이 Table 2.6에 있다.

포화액의 측정자료는 증기압, 기체의 PVT 거

Table 2.3 Vapor pressure of selected alternative refrigerants¹¹⁾

Fluid	Lower Temp. limit		Coefficients to Equation(2.2)				RMS error %
	K	° F	a_1	a_2	a_3	a_4	
R23	134.	-218.	-9.682 616	2.550 689	4.104 477	1.882 155	0.43
R32	149.	-191.	-10.052 244	2.844 032	4.108 620	3.450 397	0.29
R125	233.	-40.	-11.674 144	4.524 166	4.567 844	6.904 302	0.10
R143a	185.	-127.	-7.451 908	0.196 624	3.658 045	-5.178 402	0.29
R22	203.	-94.	-8.985 153	2.125 014	3.693 854	0.906 855	0.09
R134a	210.	-82.	-8.798 572	1.379 055	3.587 903	-2.390 161	0.16
R152a	273.	32.	-4.133 708	-3.135 972	0.945 576	-11.934 945	0.11
R124	222.	-60.	-10.034 418	2.870 485	4.232 259	1.619 401	0.16
R142b	212.	-78.	-10.178 263	2.964 608	4.852 732	3.542 389	0.48
R123	273.	32.	-7.600 976	0.365 524	3.214 724	-4.998 549	0.09

Note: Upper temperature limit of correlation is the critical temperature except for R142b(369 K)

등과 함께 상태 방정식 구성의 기본 자료로 이용된다. 대개의 상태 방정식이 압력을 온도와 체적의 함수로 표시한 형태를 취하기 때문에 유체의 밀도 계산은 열역학적 물성 계산에서 가장 중요한 부분을 차지한다.

일반적으로 상태 방정식은 포화 증기와 과열 증기 영역의 밀도는 비교적 정확히 계산 하지만 포화액 이하 압축액의 영역에서는, 특히 압축액 영역에서, 상태 방정식에 의한 밀도 계산의 정확도는 현저히 떨어진다. 이러한 영역에서 밀도 계산의 정확도를 향상하기 위하여 복잡한 상태 방정식(예 : MBWR EOS) 도입하고 있으나 압축액 영역에서는 여전히 제한이 있다. 따라서 대부분의 상태 방정식이 포화액, 포화 증기, 과열증기의 영역에서 유효하다.

증기압을 포화 온도의 함수로 표시하면 편리 하듯이 포화액의 밀도도 포화온도의 함수로 표시할 수 있으며 매우 유용하게 사용할 수 있다. McLinden(1989)는 지금까지 각종 연구결과를 (자료 목록 참조) 수집하여 그 동안 제안된 HCFC 및 HFC계열 대체냉매 R23, R32, R125,

R143a, R152a, R124, R142b, R123의 포화액 밀도를 최대 편차 0.31% 이내로 계산할 수 있는 실험식을 제안 하였다.

$$\rho_c/\rho = 1 + d_1\tau^B + d_2\tau^{2/3} + d_3\tau + d_4\tau^{4/3} \dots\dots\dots (2.3)$$

$\tau = 1 - T/T_c$, ρ_c 는 임계점의 밀도이다. 지수 B ($= 0.355$)는 임계점에서 밀도 계산의 정확성을 기하기 위하여 사용하였다. 식(2.3)의 계수는 Table 2.4에 있다.

2.4 유체의 PVT 거동과 열역학적 물성

유체의 PVT 거동은 증기압, 포화액의 밀도와 함께 상태 방정식을 구성하는데 필수적인 자료이다. 현재 사용되고 있는 여러가지 측정 방법이 Table 2.6에 소개되어 있다. 특히 Bunett-isochoric method, magnetic densimeter, constant volume method등이 각국에서 많이 사용되고 있다. 측정 재료의 순도는 대부분 생산자가 제공하고 있으며 미국 표준기술원(NIST)의 경우에는 gas chromatography/mass spectrometry, infrared and

Table 2.4 Saturated liquid density of selected alternative refrigerants

Fluid	Lower Temp. limit		Coefficients to Equation(2.3)				RMS error, %
	K	° F	d_1	d_2	d_3	d_4	
R23	206.	-89.	2.568 471	-1.636 763	2.945 022	-0.983 341	0.19
R32	248.	-13.	1.667 251	2.720 934	-4.374 005	3.272 961	0.24
R125	229.	-47.	1.959 463	0.847 479	-0.840 846	0.797 769	0.02
R143a	197.	-105.	2.284 033	-0.304 060	2.235 519	-1.995 317	0.14
R22	213.	-76.	2.191 954	0.046 237	0.207 547	0.397 319	0.05
R134a	200.	-100.	1.986 361	0.677 576	-0.455 932	0.592 428	0.13
R152a	223.	-58.	2.456 208	-1.665 948	3.933 187	-2.045 507	0.18
R124	215.	-73.	2.064 566	0.387 932	-0.405 756	0.715 925	0.20
R142b	194.	-110.	-0.216 863	9.627 387	-12.778 355	6.355 207	0.31
R123	210.	-82.	2.119 619	0.076 919	0.313 401	0.232 851	0.20

Note: Upper temperature limit of correlation is the critical temperature except for R124(390K) and R142b(369K)

ultraviolet spectrometry, karl fisher moisture analysis, capillary gas-liquid chromatography 등의 방법으로 자체 분석한다.¹²⁾

열역학적 물성 예측을 위한 상태 방정식으로 (1) 체적의 3차 상태 방정식 ; RKS, PR (2) Martin-Hou EOS (3) Modified BWR : BWRS, Jacob-Stewart BWR, Extended BWR (4) Corresponding States : LKP (5) Fundamental EOS, (6) CSD EOS 등이 사용되고 있다.

R134a와 R123의 열역학적 물성은 McLinden 등¹¹⁾이 MBWR 상태 방정식으로 계산한 것이 있으며 R124는 Shankland 등¹³⁾이 M-H 상태 방정식으로 계산한 것이 있다. R152a는 Kamei 등¹⁴⁾이 RKS 상태 방정식으로 계산한 것이 있다. R134a, R123, R152a를 포함한 나머지 대체 냉매의 물성에 대하여 Morrison 등¹⁵⁾이 제시한 CSD 상태 방정식 (Table 2.5)으로 계산 할 수 있다. Table 2.7-Table 2.14는 온도를 기준으로 한

포화 상태의 열역학 물성표이다. R134a, R123은 McLinden 등¹¹⁾이 계산한 물성표이며 나머지는 Morrison 등¹⁵⁾과 Gallagher 등¹⁶⁾의 상태 방정식으로 계산한 물성표이다.

McLinden 등¹²⁾은 Annex 18 사업의 일환으로 전세계에서 수행되고 있는 대체 냉매의 연구 내용에 관한 광범위하고 상세한 보고서를 마련하였다. 이 보고서에는 순수 대체 냉매 R23, R32, R125, R143a, R22, R134a, R134, R124, R142b, R123, R123a, R141b와 이 들의 혼합물에 대한 열-물리 물성 : (1) 증기압 (2) 포화액 밀도 (3) 포화증기 밀도 (4) P-V-T (5) 비이리얼 계수 (6) 임계 상수 (7) 삼중점 (8) 열용량/열량계법 (9) 음속 (10) 쌍전 상수 (dielectric constant) (11) 회절 계수 (12) 표면 장력 (13) 열전도 계수 (14) 열확산 계수 (15) 점도 (16) 상태 방정식 (17) 이상 기체 물성 (18) 혼합물 VLE 등에 관한 연구 정보가 수록되어 있다.

Table 2.5 Carnahan-Starling-DenSantis 상태 방정식과 계수^{15, 16)}

$\frac{PV}{RT} = \frac{1+Y+Y^2-Y^3}{(1-Y)^3} - \frac{a}{RT(v+b)}$ $Y = b/4v$ $a = a_0 \exp(a_1 T + a_2 T^2)$ $b = b_0 + b_1 T + b_2 T^2$						
	A_0	$A_1 \times 10^3$	$A_2 \times 10^6$	B_0	$B_1 \times 10^4$	$B_2 \times 10^8$
R23	1178.2	-3.67628	-0.8794795	0.09321863	-1.513167	0.177337
R125	2971.488	-2.111917	-3.734385	0.1443116	-1.410596	-19.69504
R143a	6320.833	-8.215183	7.736152	0.2205294	-7.624223	95.31537
R22	2730.846	-2.979927	-0.7651239	0.1203449	-1.627592	-1.132347
R134a	3611.8	-2.89497	-1.28106	0.144618	-1.84368	-2.53676
R152a	3106.312	-2.776653	-0.625854	0.128345	-1.726218	2.790653
R124	4718.786	-2.847854	-1.0857	0.1818017	-2.256066	-3.890926
R142b	4512.576	-3.229507	0.2608976	0.1730507	-2.648172	10.32608
R123	5885.629	-2.2446861	-1.0342735	0.1957662	-1.6784282	-9.9567402

Table 2.6 Experimental methods in current use for the measurement of vapor pressure, sat. liquid density, P-V-T, heat capacity, and sample purity analysis, and equation of state

Ideal gas properties	statistical mechanics
Heat capacity	adiabatic isochoric calorimeter, setaram BT calorimeter
Vapor pressure	constant volume method, static equilibrium cell, single-and dual-sinker densimeter, magnetic densimeter, variable volume cell, burnett-isochoric apparatus, ebulliometer
Sat. liquid density	magnetic suspension densimeter, pycnometer, static equilibrium cell with vibrating tube densimeter, constant volume method, single-and dual-sinker densimeter, buoy method, magnetic densimeter, variable volume cell
PVT behavior	Bunnett-isochoric apparatus, bellows volumeter, vibrating tube densimeter, constant volume pycnometer, single-and dual-sinker densimeter, magnetic densimeter, single sinker magnetic suspension densimeter, gas expansion technique, continuously weighed pycnometer
V-L equilibrium	variable volume cell, Rose-William cell, Jones circulation unit, vapor liquid circulation method
Equation of state	RKS, M-H, Bender EOS, corresponding state EOS, extended BWR, CSD, virial EOS, Wagner, fundamental EOS, MBWR, Jacobsen-Stewart BWR, Schmidt-Wagner, extended corresponding states, LKP, renormalization theory for critical region, 25-term virial EOS
Sample purity analysis	gas chromatography/mass spectrometry, infrared and ultraviolet spectrometry, Karl Fisher moisture analysis, capillary gas-liquid chromatography

Table 2.7 Thermodynamic properties of saturated R23

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-100	31.59	1519.	1.556	-76.4	179.4	-0.3752	1.102	1.202	0.5608
-95	44.92	1502.	2.159	-70.3	181.9	-0.3408	1.075	1.211	0.5698
-90	62.48	1484.	2.936	-64.2	184.4	-0.3072	1.050	1.220	0.5794
-85	85.17	1465.	3.918	-58.1	186.8	-0.2743	1.028	1.230	0.5898
-80	114.0	1447.	5.142	-51.9	189.2	-0.2420	1.006	1.240	0.6010
-75	150.0	1427.	6.649	-45.7	191.5	-0.2102	0.9868	1.251	0.6133
-70	194.3	1408.	8.480	-39.4	193.7	-0.1789	0.9684	1.263	0.6267
-65	248.3	1388.	10.69	-33.0	195.8	-0.1482	0.9512	1.277	0.6414
-60	313.2	1367.	13.32	-26.6	197.8	-0.1179	0.9350	1.291	0.6578
-55	390.4	1345.	16.44	-20.1	199.7	-0.08791	0.9195	1.307	0.6760
-50	481.3	1323.	20.11	-13.5	201.4	-0.05832	0.9047	1.325	0.6965
-45	587.5	1300.	24.40	-6.8	203.0	-0.02903	0.8905	1.346	0.7195
-40	710.5	1276.	29.41	0.0	204.4	-0.00000	0.8767	1.368	0.7458
-35	852.0	1251.	35.22	6.9	205.6	-0.02883	0.8633	1.394	0.7758
-30	1013.0	1225.	41.95	13.9	206.6	-0.05750	0.8500	1.424	0.8106
-25	1197.0	1198.	49.73	21.1	207.4	-0.08608	0.8368	1.460	0.8512
-20	1404.0	1169.	58.72	28.4	207.9	0.1147	0.8236	1.502	0.8992
-15	1636.0	1139.	69.11	36.0	208.1	0.1433	0.8102	1.553	0.9569
-10	1895.0	1107.	81.13	43.7	208.0	0.1721	0.7965	1.616	1.027
-5	2183.0	1072.	95.08	51.7	207.5	0.2012	0.7823	1.695	1.115
0	2502.0	1035.	111.4	60.0	206.6	0.2307	0.7675	1.799	1.228
5	2853.0	995.5	130.5	68.7	205.2	0.2609	0.7517	1.939	1.378
10	3239.0	951.7	153.2	77.8	203.1	0.2921	0.7347	2.138	1.587
15	3662.0	902.9	180.7	87.6	200.3	0.3249	0.7158	2.441	1.901

Table 2.8 Thermodynamic properties of saturated R125

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-90	8.238	1651.	0.6531	-48.8	127.3	-0.2345	0.7270	0.9057	0.5940
-85	11.92	1635.	0.9220	-44.2	130.2	-0.2099	0.7172	0.9190	0.6043
-80	16.89	1619.	1.275	-39.6	133.1	-0.1856	0.7086	0.9324	0.6147
-75	23.45	1603.	1.731	-34.9	136.1	-0.1616	0.7013	0.9461	0.6252
-70	31.98	1586.	2.311	-30.1	139.0	-0.1379	0.6949	0.9599	0.6539
-65	42.87	1570.	3.307	-25.3	142.0	-0.1144	0.6894	0.9741	0.6468
-60	56.59	1553.	3.935	-20.4	145.0	-0.09113	0.6847	0.9884	0.6579
-55	73.66	1536.	5.034	-15.4	148.0	-0.06807	0.6808	1.003	0.6694
-50	94.61	1519.	6.364	-10.3	150.9	-0.04520	0.6775	1.018	0.6813
-45	120.0	1501.	7.960	-5.2	153.9	-0.02252	0.6747	1.033	0.6937
-40	150.6	1484.	9.859	0.0	156.8	-0.00000	0.6724	1.049	0.7066
-35	187.0	1465.	12.10	5.3	159.7	-0.02236	0.6705	1.065	0.7201
-30	230.0	1447.	14.73	10.7	162.5	-0.04458	0.6690	1.081	0.7435
-25	280.2	1427.	17.81	16.1	165.3	-0.06667	0.6677	1.099	0.7498
-20	338.6	1407.	21.38	21.7	168.0	0.08864	0.6667	1.117	0.7662
-15	406.0	1387.	25.51	27.3	170.7	0.1105	0.6658	1.135	0.7840
-10	483.3	1366.	30.27	33.1	173.3	0.1323	0.6651	1.155	0.8033
-5	571.3	1344.	35.75	38.9	175.8	0.1540	0.6644	1.176	0.8246
0	671.0	1321.	42.03	44.8	178.2	0.1757	0.6638	1.199	0.8483
5	783.5	1297.	49.23	50.9	180.4	0.1973	0.6631	1.224	0.8749
10	909.7	1272.	57.46	57.0	182.6	0.2189	0.6623	1.251	0.9052
15	1051.0	1246.	66.87	63.3	184.6	0.2405	0.6614	1.282	0.9400
20	1208.0	1219.	77.65	69.7	186.5	0.2622	0.6603	1.317	0.9807
25	1381.	1190.	90.01	76.3	188.1	0.2839	0.6589	1.358	1.029
30	1573.	1159.	104.2	83.1	189.6	0.3058	0.6572	1.407	1.088
35	1784.	1125.	120.6	90.0	190.8	0.3279	0.6550	1.467	1.161
40	2015.	1090.	139.6	97.2	191.7	0.3503	0.6523	1.545	1.254
45	2268.	1051.	161.8	104.6	192.4	0.3731	0.6490	1.648	1.377
50	2544.	1008.	188.2	112.4	192.6	0.3964	0.6447	1.794	1.550
55	2483.	959.3	219.7	120.6	192.3	0.4207	0.6393	1.807	2.019

Table 2.9 Thermodynamic properties of saturated R143a

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-90	7.18	1154.	0.3988	-74.0	192.1	-0.3573	1.096	1.056	0.6733
-85	10.61	1153.	0.5742	-66.4	195.3	-0.3161	1.075	1.524	0.6868
-80	15.28	1151.	0.8069	-58.8	198.6	-0.2763	1.056	1.511	0.7005
-75	21.48	1149.	1.109	-51.3	202.0	-0.2379	1.040	1.499	0.7146
-70	29.59	1147.	1.495	-43.8	205.3	-0.2006	1.025	1.487	0.7290
-65	39.98	1144.	1.980	-36.4	208.6	-0.1646	1.012	1.476	0.7438
-60	53.07	1141.	2.578	-29.0	212.0	-0.1297	1.001	1.465	0.7590
-55	69.35	1137.	3.309	-21.7	215.3	-0.09588	0.9905	1.455	0.7748
-50	89.3	1133.	4.191	-14.4	218.6	-0.06301	0.9814	1.446	0.7912
-45	113.5	1128.	5.244	-7.2	221.9	-0.03108	0.9732	1.438	0.8082
-40	142.4	1122.	6.490	0.0	225.2	-0.00000	0.9660	1.431	0.8259
-35	176.7	1116.	7.953	7.2	228.5	-0.03027	0.9596	1.426	0.8444
-30	217.1	1109.	9.657	14.3	231.7	-0.05980	0.9540	1.422	0.8638
-25	264.1	1102.	11.63	21.4	234.9	-0.08865	0.9489	1.420	0.8843
-20	318.4	1093.	13.91	28.6	238.0	0.1169	0.9444	1.419	0.9058
-15	380.9	1084.	16.51	35.7	241.1	0.1446	0.9403	1.422	0.9285
-10	452.1	1073.	19.49	42.8	244.1	0.1717	0.9367	1.427	0.9527
-5	533.0	1062.	22.88	50.0	247.1	0.1985	0.9334	1.436	0.9786
0	624.3	1049.	26.73	57.3	250.0	0.2249	0.9304	1.448	1.006
5	726.8	1035.	31.10	64.6	252.7	0.2510	0.9276	1.465	1.036
10	841.5	1020.	36.04	72.0	255.4	0.2770	0.9249	1.488	1.069
15	969.2	1003.	41.64	79.5	258.0	0.3028	0.9223	1.517	1.104
20	1111.	984.6	47.97	87.1	260.4	0.3286	0.9198	1.553	1.144
25	1268.	964.4	55.14	94.9	262.7	0.3544	0.9172	1.599	1.189
30	1440.	942.3	63.28	102.9	264.8	0.3805	0.9144	1.657	1.240
35	1630.	918.1	72.54	111.2	266.7	0.4069	0.9114	1.729	1.299
40	1838.	891.5	83.14	119.8	268.3	0.4338	0.9081	1.820	1.369
45	2066.	862.2	95.33	128.7	269.6	0.4613	0.9042	1.937	1.456
50	2313.	829.9	109.5	138.1	270.6	0.4989	0.8997	2.091	1.567
55	2583.	794.1	126.1	148.1	271.1	0.5194	0.8942	2.299	1.716
60	2876.	753.8	145.9	158.9	271.0	0.5507	0.8874	2.599	1.932
65	3193.	707.8	170.2	170.6	270.1	0.5844	0.8786	3.068	1.275

Table 2.10 Thermodynamic properties of saturated R134a

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-40	52.	1414.	2.8	0.0	223.3	0.000	0.958	1.129	0.742
-35	66.	1399.	3.5	5.7	226.4	0.024	0.951	1.154	0.758
-30	85.	1385.	4.4	11.5	229.6	0.048	0.945	1.178	0.774
-25	107.	1370.	5.5	17.5	232.7	0.073	0.940	1.202	0.791
-20	133.	1355.	6.8	23.6	235.8	0.097	0.935	1.227	0.809
-15	164.	1340.	8.3	29.8	238.8	0.121	0.931	1.250	0.828
-10	201.	1324.	10.0	36.1	241.8	0.145	0.927	1.274	0.847
-5	243.	1308.	12.1	42.5	244.8	0.169	0.924	1.297	0.868
0	293.	1292.	14.4	49.1	247.8	0.193	0.921	1.320	0.889
5	350.	1276.	17.1	55.8	250.7	0.217	0.918	1.343	0.912
10	415.	1259.	20.2	62.6	253.5	0.241	0.916	1.365	0.936
15	489.	1242.	23.7	69.4	256.3	0.265	0.914	1.388	0.962
20	572.	1224.	27.8	76.5	259.0	0.289	0.912	1.411	0.990
25	666.	1206.	32.3	83.6	261.6	0.313	0.910	1.435	1.020
30	771.	1187.	37.5	90.8	264.2	0.337	0.908	1.460	1.053
35	887.	1167.	43.3	98.2	266.6	0.360	0.907	1.486	1.089
40	1017.	1147.	50.0	105.7	268.8	0.384	0.905	1.514	1.130
45	1160.	1126.	57.5	113.3	271.0	0.408	0.904	1.546	1.177
50	1318.	1103.	66.1	121.0	272.9	0.432	0.902	1.581	1.231
55	1491.	1080.	75.9	129.0	274.7	0.456	0.900	1.621	1.295
60	1681.	1055.	87.2	137.1	276.1	0.479	0.897	1.667	1.374
65	1888.	1028.	100.2	145.3	277.3	0.504	0.894	1.724	1.473
70	2115.	999.	115.5	153.9	278.1	0.528	0.890	1.729	1.601
75	2361.	967.	133.6	162.6	278.4	0.553	0.885	1.884	1.776
80	2630.	932.	155.4	171.8	278.0	0.578	0.879	2.011	2.027
85	2923.	893.	182.4	181.3	276.8	0.604	0.870	2.204	2.408
90	3242.	847.	216.9	191.6	274.5	0.631	0.860	2.554	3.056
95	3590.	790.	264.5	203.1	270.4	0.662	0.844	3.424	4.483
100	3971.	689.	353.1	219.3	260.4	0.704	0.814	10.793	14.807

Table 2.11 Thermodynamic properties of saturated R152a

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-55	20.72	1069.	0.7617	-22.5	331.9	-0.09952	1.525	1.477	0.8488
-50	27.72	1060.	0.9987	-15.1	335.9	-0.06590	1.507	1.491	0.8617
-45	36.55	1051.	1.292	-7.6	339.9	-0.03274	1.490	1.504	0.8750
-40	47.54	1041.	1.649	0.0	344.0	-0.00000	1.475	1.518	0.8886
-35	61.05	1032.	2.082	7.6	348.0	0.03234	1.462	1.533	0.9026
-30	77.49	1022.	2.599	15.3	352.1	0.06431	1.449	1.547	0.9171
-25	97.28	1012.	3.214	23.1	356.1	0.09592	1.438	1.563	0.9321
-20	120.9	1002.	3.938	31.0	360.1	0.1272	1.427	1.579	0.9476
-15	148.8	992.1	4.784	38.9	364.0	0.1582	1.418	1.595	0.9638
-10	181.6	981.7	5.767	47.0	368.0	0.1889	1.409	1.613	0.9807
-5	219.8	971.0	6.903	55.1	371.8	0.2193	1.400	1.631	0.9985
0	263.9	960.0	8.208	63.3	375.6	0.2495	1.393	1.650	1.017
5	314.7	948.8	9.701	71.6	379.4	0.2795	1.386	1.670	1.037
10	372.6	937.2	11.40	80.1	383.0	0.3093	1.379	1.691	1.058
15	438.4	925.3	13.33	88.6	386.6	0.3389	1.373	1.713	1.080
20	512.7	913.0	15.51	97.2	390.1	0.3683	1.367	1.737	1.104
25	596.3	900.4	17.97	106.0	393.5	0.3976	1.362	1.762	1.130
30	689.8	887.3	20.75	114.9	396.7	0.4268	1.357	1.790	1.158
35	794.0	873.7	23.86	123.9	399.9	0.4560	1.352	1.820	1.188
40	909.7	859.6	27.35	133.1	402.8	0.4850	1.347	1.853	1.221
45	1038.	845.0	31.26	142.4	405.6	0.5141	1.342	1.889	1.258
50	1179.	829.8	35.65	151.9	408.3	0.5432	1.337	1.929	1.299
55	1334.	813.9	40.56	161.5	410.7	0.5723	1.332	1.974	1.345
60	1503.	797.3	46.06	171.4	412.9	0.6016	1.326	2.026	1.397
65	1688.	779.8	52.23	181.5	414.9	0.6310	1.321	2.085	1.457
70	1890.	761.5	59.16	191.9	416.6	0.6606	1.315	2.155	1.527
75	2108.	742.1	66.97	202.5	417.9	0.6905	1.309	2.238	1.609
80	2346.	721.6	75.80	213.5	419.0	0.7208	1.303	2.338	1.709
85	2602.	699.7	85.83	224.8	419.6	0.7516	1.296	2.463	1.833
90	2878.	676.1	97.29	236.5	419.7	0.7831	1.287	2.624	1.990
95	3175.	650.7	110.5	248.8	419.2	0.8155	1.278	2.838	2.199
100	3495.	622.9	126.0	261.8	418.0	0.8492	1.268	3.139	2.490
105	3837.	591.9	144.4	275.7	415.9	0.8846	1.255	3.594	2.926

Table 2.12 Thermodynamic properties of saturated R124

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-60	8.013	1593.	0.6206	-19.3	165.2	-0.08629	0.7789	0.9454	0.5943
-55	11.10	1581.	0.8416	-14.5	168.1	-0.06427	0.7727	0.9539	0.6026
-50	15.12	1568.	1.123	-9.7	171.0	-0.04256	0.7673	0.9625	0.6110
-45	20.28	1556.	1.476	-4.9	174.0	-0.02114	0.7627	0.9713	0.6195
-40	26.79	1543.	1.914	0.0	176.9	-0.00000	0.7588	0.9801	0.6282
-35	34.91	1531.	2.450	4.9	179.9	0.02088	0.7556	0.9890	0.6370
-30	44.91	1518.	3.100	9.9	182.9	0.04151	0.7529	0.9980	0.6459
-25	57.11	1504.	3.880	14.9	185.9	0.06191	0.7508	1.007	0.6551
-20	71.82	1491.	4.808	20.0	188.8	0.08207	0.7491	1.016	0.6645
-15	89.41	1478.	5.903	25.1	191.8	0.1020	0.7479	1.026	0.6742
-10	110.2	1464.	7.186	30.3	194.8	0.1218	0.7471	1.036	0.6842
-5	134.7	1449.	8.679	35.5	197.8	0.1413	0.7465	1.045	0.6946
0	163.2	1435.	10.41	40.7	200.7	0.1607	0.7463	1.056	0.7054
5	196.2	1420.	12.40	46.0	203.6	0.1799	0.7464	1.066	0.7167
10	234.2	1405.	14.67	51.4	206.5	0.1989	0.7466	1.077	0.7285
15	277.6	1389.	17.27	56.8	209.3	0.2178	0.7471	1.088	0.7410
20	326.9	1373.	20.22	62.3	212.2	0.2365	0.7477	1.099	0.7541
25	382.7	1357.	23.56	67.8	214.9	0.2551	0.7484	1.111	0.7681
30	445.4	1340.	27.34	73.4	217.6	0.2735	0.7493	1.124	0.7831
35	515.6	1322.	31.59	79.1	220.3	0.2919	0.7502	1.138	0.7997
40	593.9	1304.	36.36	84.8	222.9	0.3101	0.7511	1.152	0.8166
45	680.8	1285.	41.72	90.6	225.5	0.3283	0.7521	1.167	0.8355
50	776.9	1265.	47.73	96.5	227.9	0.3464	0.7531	1.184	0.8563
55	882.7	1245.	54.46	102.4	230.3	0.3644	0.7540	1.203	0.8792
60	999.0	1224.	61.98	108.5	232.6	0.3823	0.7549	1.223	0.9048
65	1126.	1201.	70.41	114.6	234.8	0.4003	0.7557	1.246	0.9336
70	1265.	1178.	79.85	120.8	236.9	0.4182	0.7563	1.272	0.9664
75	1416.	1153.	90.44	127.2	238.8	0.4361	0.7568	1.302	1.004
80	1580.	1127.	102.3	133.6	240.6	0.4541	0.7571	1.337	1.048
85	1757.	1100.	115.7	140.2	242.3	0.4722	0.7572	1.380	1.101
90	1949.	1071.	130.9	146.9	243.7	0.4904	0.7569	1.432	1.165
95	2155.	1039.	148.2	153.9	245.0	0.5088	0.7563	1.499	1.245
100	2377.	1005.	167.9	161.0	246.0	0.5274	0.7553	1.586	1.348
105	2615.	968.0	190.8	168.4	246.7	0.5465	0.7536	1.706	1.488
110	2869.	926.9	217.6	176.1	247.0	0.5662	0.7512	1.882	1.686

Table 2.13 Thermodynamic properties of saturated R142b

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-60	6.949	1289.	0.3958	-22.9	226.8	-0.1027	1.072	1.128	0.6692
-55	9.958	1280.	0.5551	-17.3	230.1	-0.07646	1.058	1.137	0.6799
-50	13.55	1271.	0.7397	-11.6	233.4	-0.05060	1.047	1.146	0.6906
-45	18.15	1262.	0.9710	-5.8	236.8	-0.02512	1.038	1.155	0.7014
-40	23.95	1253.	1.257	0.0	240.1	-0.00000	1.030	1.164	0.7123
-35	31.19	1243.	1.607	5.8	243.5	0.02479	1.023	1.173	0.7232
-30	40.10	1234.	2.031	11.7	246.9	0.04925	1.016	1.183	0.7344
-25	50.95	1224.	2.538	17.7	250.3	0.07341	1.011	1.192	0.7457
-20	64.04	1214.	3.141	23.7	253.7	0.09727	1.006	1.202	0.7572
-15	79.67	1203.	3.850	29.7	257.1	0.1209	1.002	1.212	0.7690
-10	98.18	1193.	4.680	35.8	260.5	0.1442	0.9982	1.222	0.7810
-5	119.9	1182.	5.643	42.0	263.9	0.1673	0.9951	1.233	0.7933
0	145.2	1171.	6.756	48.2	267.3	0.1901	0.9924	1.244	0.8061
5	174.6	1160.	8.032	54.4	270.7	0.2127	0.9902	1.255	0.8192
10	208.3	1148.	9.490	60.7	274.0	0.2351	0.9883	1.266	0.8328
15	246.8	1136.	11.15	67.1	277.3	0.2573	0.9868	1.278	0.8470
20	290.6	1124.	13.03	73.5	280.6	0.2793	0.9856	1.291	0.8617
25	340.0	1111.	15.14	80.0	283.8	0.3012	0.9846	1.304	0.8772
30	395.6	1098.	17.53	86.6	287.0	0.3228	0.9838	1.318	0.8935
35	457.9	1085.	20.20	93.3	290.1	0.3444	0.9832	1.333	0.9108
40	527.9	1071.	23.19	100.0	293.2	0.3658	0.9828	1.349	0.9291
45	604.3	1057.	26.53	106.8	296.2	0.3871	0.9825	1.366	0.9486
50	689.5	1042.	30.26	113.6	299.1	0.4082	0.9822	1.384	0.9697
55	783.4	1026.	34.40	120.6	302.0	0.4293	0.9820	1.404	0.9924
60	886.4	1010.	39.02	127.7	304.7	0.4504	0.9818	1.426	1.017
65	999.2	993.1	44.15	134.8	307.4	0.4714	0.9816	1.450	1.044
70	1122.	975.5	49.85	142.1	309.9	0.4923	0.9814	1.477	1.074
75	1256.	957.1	56.19	149.5	312.3	0.5133	0.9810	1.507	1.108
80	1402.	937.9	63.26	157.0	314.6	0.5343	0.9805	1.542	1.146
85	1559.	917.6	71.13	164.6	316.7	0.5554	0.9799	1.583	1.189
90	1729.	896.3	79.92	172.5	318.6	0.5766	0.9790	1.631	1.240
95	1913.	873.7	89.78	180.5	320.4	0.5979	0.9778	1.688	1.300
100	2110.	849.7	100.9	188.7	321.9	0.6195	0.9763	1.758	1.372
105	2321.	824.1	113.4	197.2	323.1	0.6413	0.9744	1.845	1.461
110	2548.	796.5	127.7	205.9	324.1	0.6636	0.9719	1.959	1.575
115	2791.	766.6	144.1	215.1	324.6	0.6865	0.9686	2.112	1.728
120	3049.	733.8	163.3	224.6	324.7	0.7101	0.9645	2.329	1.941
125	3324.	697.1	186.0	234.8	324.1	0.7349	0.9591	2.664	2.265

Table 2.14 Thermodynamic properties of saturated R123

Temp °C	Pressure (kPa)	Density (kg/m ³)		Enthalpy (kJ/kg)		Entropy (kJ/kg.K)		Cp (kJ/kg.K)	
		liq	vap	liq	vap	liq	vap	liq	vap
-20	12.	1571.	0.9	17.2	202.2	0.067	0.798	0.838	0.633
-15	16.	1560.	1.1	21.4	205.2	0.083	0.795	0.852	0.642
-10	20.	1549.	1.4	25.7	208.1	0.100	0.793	0.866	0.652
-5	26.	1537.	1.8	30.1	211.1	0.116	0.792	0.881	0.661
0	33.	1525.	2.2	34.5	214.1	0.133	0.790	0.896	0.671
5	41.	1514.	2.8	39.0	217.2	0.149	0.790	0.912	0.680
10	51.	1501.	3.4	43.6	220.2	0.166	0.789	0.928	0.689
15	62.	1489.	4.1	48.3	223.2	0.182	0.789	0.945	0.699
20	75.	1477.	4.9	53.1	226.3	0.198	0.789	0.962	0.708
25	91.	1464.	5.9	57.9	229.4	0.215	0.790	0.979	0.717
30	109.	1452.	6.9	62.9	232.5	0.231	0.790	0.995	0.725
35	130.	1439.	8.2	67.9	235.5	0.247	0.791	1.012	0.734
40	154.	1425.	9.6	73.0	238.6	0.264	0.793	1.028	0.743
45	181.	1412.	11.2	78.2	241.7	0.280	0.794	1.043	0.751
50	212.	1399.	13.0	83.5	244.7	0.297	0.796	1.058	0.759
55	247.	1385.	15.0	88.8	247.8	0.313	0.797	1.072	0.768
60	286.	1371.	17.3	94.2	250.8	0.329	0.799	1.085	0.776
65	330.	1356.	19.8	99.7	253.8	0.345	0.801	1.097	0.785
70	378.	1342.	22.6	105.2	256.7	0.361	0.803	1.108	0.793
75	431.	1327.	25.8	110.8	259.6	0.377	0.805	1.119	0.802
80	490.	1312.	29.2	116.4	262.5	0.393	0.807	1.128	0.812
85	555.	1296.	33.1	122.1	265.3	0.409	0.809	1.137	0.822
90	626.	1280.	37.3	127.8	268.0	0.425	0.811	1.145	0.833
95	704.	1264.	42.0	133.5	270.7	0.440	0.813	1.152	0.845
100	788.	1247.	47.2	139.3	273.3	0.456	0.815	1.160	0.859
105	880.	1230.	52.9	145.1	275.8	0.471	0.817	1.167	0.874
110	979.	1212.	59.2	150.9	278.2	0.486	0.818	1.174	0.891
115	1087.	1193.	66.1	156.8	280.5	0.501	0.820	1.182	0.911
120	1203.	1173.	73.8	162.7	282.7	0.516	0.821	1.191	0.933
125	1327.	1153.	82.3	168.6	284.8	0.531	0.822	1.202	0.960
130	1461.	1131.	91.8	174.6	286.7	0.545	0.823	1.215	0.992
135	1605.	1109.	102.3	180.6	288.5	0.560	0.824	1.232	1.030
140	1760.	1085.	114.1	186.7	290.2	0.574	0.825	1.253	1.076
145	1925.	1060.	127.3	192.8	291.7	0.589	0.825	1.281	1.132
150	2102.	1033.	142.4	199.0	292.9	0.603	0.825	1.317	1.202

2.5 대체 냉매의 냉동 성능

대체 냉매의 냉동 성능을 비교하기 위하여 미국 ORNL(Orkridge National laboratory)에서 수행한 연구 결과를 검토 제시한다. 대체 냉매의 열역학적 물성은 CSD 상태 방정식¹⁵⁾으로 계산하였다. Sand 등¹⁷⁾은 Table 2.5와 Table 2.16의 실험용 열펌프 시스템에 대체 냉매 R32, R125, R143a, R22, R218, R12, R134a, R152a, R134, R124, R142b, RC318, R114, R143을 적용하여 난방과 냉방의 경우 각각 2가지의 ARI시험 조건 하에서 시험하여 냉-난방 성능 계수를 측정하였다. Table 2.18은 실험결과와 수치모형에서 얻은 결과를 비교하고 있으며 Table 2.19은 여러가지 냉매의 등엔트로피 압축 효율을 보여 준다.

3. 대체 냉매의 전달 물성(transport properties)

3.1 대체 냉매의 점도(viscosity)

냉매의 점도는 유동 특성을 지배하는 중요한 전달 물성으로서 냉동 시스템 설계의 필수적인 자료이다. 기체의 점도는 기체 운동 이론을 따라 이론적인 예측이 가능하지만 액체의 경우에는 거의 불가능하다. 기체의 경우에도 이론적인 예측과 실험적인 측정치 사이에는 상당한 차이가 있으므로 설계자료로 사용할 수 있는 정도의 정확도는 실험에 의존할 수 밖에 없다. 측정 방법으로 torsionally oscillating quartz crystal, falling ball viscometer, capillary method, oscillting disk viscometer 등을 많이 사용하며 McLinden 등¹²⁾이 조사한, 현재 사용되고 있는 각종 측정 방법은

Table 2.15 ORNL experimental apparatus¹⁷⁾

압축기	왕복동식 밀폐형, 배제체적 : 0.0204 L, R22를 사용하여 응축기 온도 54.4℃ 증발기온도 7.2℃ 대기온도 35℃ 일때 3224W 소모
응축기와 증발기	길이 3m 동심원관 열교환기
팽창장치	니들밸브 사용

Table 2.16 Operating conditions for alternative refrigerant testing alternative refrigerants calorimeter¹⁷⁾

	Evaporator	Condenser
-8.3℃ heating condition		
Entering glycol/water temp.	-1.1	16.7
Glycol/water ΔT across heat exchanger	5.6	11.1
8.3℃ heating condition		
Entering water condition	10.6	20.
Water ΔT across heat exchanger	5.6	11.1
27.8℃ cooling condition		
Entering water condition	25.	28.9
Water ΔT across heat exchanger	11.1	11.1
35℃ cooling condition		
Entering water condition	26.7	36.7
Water ΔT across heat exchanger	11.1	11.1

Table 2.17 Analysis of experimental and numerical data¹⁷⁾

$COP_{H_E} = \frac{(mCp \Delta T)_{cn}}{\dot{p}_{cm}}$	$COP_{H_m} = \frac{\Delta h_{cnm}}{\dot{p}_{cm}}$
$COP_{R_E} = \frac{(mCp \Delta T)_{ev}}{\dot{p}_{cm}}$	$COP_{R_m} = \frac{\Delta h_{evm}}{\dot{p}_{cm}}$
<p>COP_{H_E} = 실험으로 측정된 $COP_{Heating}$ COP_{R_E} = 실험으로 측정된 $COP_{Cooling}$ m = 열교환 유체의 질량유량 Cp = 열교환 유체의 비열 ΔT = 열교환기 내에서의 온도 변화 P_{cm} = 압축기 동력 cn = 응축기 ev = 증발기</p>	<p>COP_{H_m} = 모형에서 계산한 $COP_{Heating}$ COP_{R_m} = 모형에서 계산한 $COP_{Cooling}$ Δh_c = 응축기에서 냉매의 엔탈피 변화 (응축기 양단의 T, P로 계산) Δh_{ev} = 증발기에서 냉매의 엔탈피 변화 (증발기 양단의 T, P로 계산) m_r = 측정된 냉매질량 유량</p>

Table 2.19 Compressor isentropic efficiency calculated from refrigerant properties at various rating points¹⁷⁾

Refrigerant	Calculated Isentropic Efficiencies(%)			
	-8.3°C Heating	8.3°C Heating	27.8°C Cooling	35°C Cooling
R32	40	41	—	—
R125	44	45	—	—
R143a	39	40	—	—
R22	37	45	44	43
R218	45	38	38	37
R12	25	35	39	45
R134a	31	39	45	44
R152a	30	37	42	44
R134	29	37	41	43
R124	—	23	33	38
R142b	25	28	35	37
RC318	—	16	31	38
R114	15	17	26	33
R143	19	23	30	31

Table 2.18 COP comparisons for modeled and experimental performance refrigerant data from ARC rig¹⁷⁾

	-8.3 °C Heating		8.3 °C Heating		27.8 °C Cooling		35 °C Cooling	
	COPH	COPR	COPH	COPR	COPH	COPR	COPH	COPR
R32								
Modeled	2.8	2.3	3.2	2.5	-	-	-	-
Experimental	2.4	1.7	2.8	2.2	-	-	-	-
R125								
Modeled	2.4	1.6	2.8	2.0	-	-	-	-
Experimental	2.4	1.7	2.7	2.1	-	-	-	-
R143a								
Modeled	2.8	2.1	3.3	2.5	-	-	-	-
Experimental	2.5	1.7	3.2	2.3	-	-	-	-
R22								
Modeled	2.3	1.7	2.7	2.6	3.7	2.9	3.0	2.3
Experimental	2.5	1.8	2.7	2.5	3.2	2.5	2.8	2.1
R218								
Modeled	2.1	1.3	2.9	2.0	2.9	2.2	2.5	1.7
Experimental	2.0	1.0	2.9	2.0	2.8	2.0	2.3	1.5
R12								
Modeled	2.0	1.5	3.1	2.4	3.2	2.5	2.9	2.3
Experimental	2.3	1.4	3.3	2.1	3.3	2.3	2.9	2.3
R134a								
Modeled	2.1	1.6	3.1	2.5	3.6	2.8	4.2	3.2
Experimental	2.3	1.4	3.3	2.4	3.7	2.5	3.1	2.4
R152a								
Modeled	2.0	1.6	3.1	2.6	3.4	2.9	3.3	2.8
Experimental	2.4	1.4	3.4	2.5	3.5	2.9	3.3	2.6
R134								
Modeled	2.0	1.5	2.9	2.2	2.7	2.6	2.1	1.6
Experimental	2.2	1.4	3.2	2.5	2.5	2.8	3.2	2.5
R124								
Modeled	2.7	2.4	1.8	1.4	2.3	2.3	2.6	2.1
Experimental	-	-	2.2	1.2	2.2	2.2	2.6	1.9
R142b								
Modeled	2.0	1.4	3.0	2.3	3.0	3.0	3.5	2.8
Experimental	2.2	1.3	3.0	2.2	2.6	2.6	3.3	2.4
RC318								
Modeled	1.8	1.6	1.2	1.1	1.9	1.9	2.2	1.8
Experimental	-	-	1.8	1.4	2.0	2.0	2.3	1.4
R114								
Modeled	1.1	0.7	1.5	1.1	1.6	1.6	2.2	1.7
Experimental	1.6	0.8	1.8	1.1	1.4	1.4	2.3	1.6
R143								
Modeled	1.6	1.3	2.4	2.0	2.4	2.4	2.6	2.2
Experimental	1.7	1.3	2.3	1.5	2.2	2.2	2.9	1.9

Table 3.1 Experimental methods in current use for the measurement of viscosity, thermal conductivity, sound of speed and surface tension

Viscosity	falling ball viscometer, capillary method, oscillating disk viscometer, vibrating wire, rolling ball viscometer, falling cylinder viscometer, hoppler viscometer, gas phase capillary flow viscometry, torsionally oscillating quartz crystal
Thermal conductivity	transient hot wire, steady-state method, coaxial cylinder, garded hot plate
Sound of speed	acoustic method, photon correlation spectroscopy, spherical resonator, ring around method, pulse-echo-overlap technique, spherical acoustic
Surface tension	capillary rise method, Wilhelmy method, single and differential capillary rise

Talbe 3.1에 예시 되어 있다. 최근에 Jung과 Radermacher⁹⁾은 기존 및 대체 냉매의 전달 물성 : 점도, 열전도 계수 및 표면 장력에 관한 자료를 수집 정리한 바 있다. Jung과 Radermacher⁹⁾에서 언급되지 않은 자료를 첨가하여 실험식을 중심으로 자료를 정리 하였다.

3.1.1 대체 냉매 증기의 점도

일반적으로 증기의 점도와 열전도 계수는 압력이 매우 낮은 상태의 값을 계산하고 압력이 상승함에 따라 그의 영향을 보정하는 방법으로 계산할 수 있다. 저압 기체 상태의 전달 물성은 기체 운동 이론으로부터 이론적인 유추가 가능하며 비교적 적은 실험 자료로부터 계산이 가능한 대응 상태의 원리를 이용하여 계산하면 편리하다. 냉매의 임계온도, 임계압력, 임계점 압축성 인자, 및 분자량을 알면 주어진 온도에서의 점도를 Nagaoka 등¹⁸⁾이 제안한 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mu^*\xi = (0.5124T_r - 0.0517)^{0.82} - 0.81 Z_c \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\xi = \frac{T_c^{1/6}}{M^{1/2}P_c^{2/3}} \dots\dots\dots (3.2)$$

μ^* 는 저압기체의 점도(Pa. s), T_c 는 임계온도 (K), T_r 은 환산 온도, P_c 는 임계압력(MPa), M 은 분자량이다. Nagaoka 등은 16가지 CFC 계열 냉매를 시험하여 116점에서의 실험 자료를 식(3.1)과 비교하여 평균편차 1.6% 최대 편차 4.97%의 결과를 얻었다.

압력 상승에 따른 효과 즉 잔류점도(residual viscosity= $\mu - \mu^*$)는 비체적, 분자량, 임계상수의 함수로 표시할 수 있다. Still과 Thodos¹⁹⁾는 광범위한 자료를 이용하여 잔류 점도에 관한 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$(\mu - \mu^*)\xi = 0.761931 \rho_r^{1.111} \text{ where } \rho_r \leq 0.1 \dots\dots\dots (3.3)$$

$$(\mu - \mu^*)\xi = 2.29283(9.045 \rho_r + 0.63)^{1.739} \text{ where } 0.1 \leq \rho_r \leq 0.9 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$(\mu - \mu^*)\xi = 4.610^{c1} \text{ where } c1 = 3.0 - 10^{(0.6439 - 0.1005\rho_r)} \text{ where } 0.9 \leq \rho_r \leq 2.6 \dots\dots\dots (3.5)$$

μ (Pa. s)는 주어진 온도 압력에서의 점도, μ^* 는 주어진 온도에서의 기체의 점도, ρ_r 는 환산 밀도

(ρ/ρ_0), ξ 는 점성계수 (식 3.2)이다.

Takahashi 등²⁰⁻²³⁾은 R-13, R-13B1, R-142b, R-152a, R123, R123a, R134a의 점도를 측정하여 대기압하의 점도는(μ_0) 온도의 함수로 표시하고 가압 증기의 점도를 온도와 압력 혹은 온도와 밀도의 함수로 표시하였다.²⁰⁻²³⁾

$$\mu = \mu_0 + b_{1\rho} + b_{2\rho^2} + b_{3\rho^3} : \text{R-13, R-13B1, R-142b, R152a} \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\begin{aligned} \mu_0 &= b_{01}T + b_{02} T^2 \\ b_1 &= b_{10} + b_{11}T + b_{12} T^2 \\ b_2 &= b_{20} + b_{21}T + b_{22} T^2 \\ b_3 &= b_{30} + b_{31}T + b_{32} T^2 \end{aligned}$$

μ, ρ, T 의 단위는 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}, \text{kg}/\text{m}^3, \text{K}$ 이며 식(3.6)의 사용범위 및 정확도는 다음과 같다.

- $T=273.15-373.15\text{K}, P=\text{up to } 10.41$
MPa, Max. Dev.=0.51% for R-13
- $T=273.15-448.15\text{K}, P=\text{up to } 9.85$
MPa, Max. Dev.=0.31% for R-13b1
- $T=298.15-423.15\text{K}, P=\text{up to } 5.09$
MPa, Max. Dev.=0.62% for R-141b
- $T=273.15-423.15\text{K}, P=\text{up to } 5.28$
MPa, Max. Dev.=0.42% for R-151a

$$\mu = \mu_0 + b_1(P - P_1) + b_2(P - P_1)_2 : \text{R-123, R-123a} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$\begin{aligned} \mu_0 &= b_{01}T + b_{02} T^2 \\ b_1 &= b_{10} + b_{11}T + b_{12} T^2 \\ b_2 &= b_{20} + b_{21}T + b_{22} T^2 \end{aligned}$$

μ, P, T 의 단위는 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}, \text{MPa}, \text{K}$ 이며 $P_1=0.101325$ MPa이다. 식(3.7)의 사용범위 및 정확도는 다음과 같다.

- $T=275. -425. \text{K}, P=\text{up to } 2$
MPa, Max. Dev.=0.31% for R-123
- $T=275. -425. \text{K}, P=\text{up to } 2$
MPa, Max. Dev.=0.16% for R-123a

$$\mu = \mu_0 + b_1(\rho - \rho_1) + b(\rho - \rho_1)^2 + b3(\rho - \rho_1)^3 : \text{R-134a} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\begin{aligned} \mu_0 &= b_{01}T + b_{02} T^2 \\ b_1 &= b_{10} + b_{11}T + b_{12}/T^2 + b_{13}/T^3 \\ b_2 &= b_{20} + b_{21}/T + b_{22}/T^2 \\ b_3 &= b_{30} + b_{31}/T + b_{32}/T^2 \end{aligned}$$

μ, ρ, T 의 단위는 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}, \text{kg}/\text{m}^3, \text{K}$ 이며 ρ_1 은 대기압에서의 밀도이다. 식(3.6)의 사용범위 및 정확도는 다음과 같다.

Table 3.2 Gas viscosity coefficients in equations (3.6), (3.7) and (3.8) of selected alternative refrigerants

b_{ij}	R13	R13b1	R142b	R152a	R123	R123a	R134a ⁽¹⁾
$b_{01} \times 10^2$	5.221	5.50785	4.20227	3.46108	3.904	3.77741	4.366×10^{-2}
$b_{02} \times 10^5$	-1.413	-1.11377	-3.33786	0.0325497	-0.8548	-0.5248	-6.823×10^{-6}
$b_{03} \times 10^8$	0.	0.	3.93484	0.	0.	0.	0.
$b_{10} \times 10^2$	-4.9492	-3.49981	-7.50116	-24.7301	-124.512	-151.517	0.04761
$b_{11} \times 10^4$	2.7189	1.74849	3.16220	11.9717	44.975	30.5705	-90.75
$b_{12} \times 10^7$	-3.1048	-1.74610	-3.00990	-14.1875	-45.1505	0.	52672
$b_{20} \times 10^5$	31.6948	3.52934	7.99536	10.1762	-6.3229×10^4	-9.9894×10^4	0.001238
$b_{21} \times 10^6$	-1.50944	0.	0.	0.	2.440×10^3	3.51921×10^3	-5.893×10^6
$b_{22} \times 10^9$	2.09820	0.	0.	0.	0.	0.	7.441×10^9
$b_{30} \times 10^7$	-1.19748	0.	0.	0.	0.	0.	-2.004×10^{-6}
$b_{31} \times 10^{10}$	7.66356	0.	0.	0.	0.	0.	0.001609
$b_{32} \times 10^{12}$	-1.20112	0.	0.	0.	0.	0.	-0.3246

(1) R134a의 계수는 10^6 을 곱하지않은 수치임

Table 3.3 Liquid viscosity constants in equations (3.9)/(3.10)^{2,28)}

Fluid	A	B	C	D	Range(K)	Source
R11	-1.29206	340.0040	-.115815E-02	.125295E-05	209-352	Phillips(1970a)
R12	-2.14142	309.1170	.291040E-02	-.469771E-05	202-312	Phillips(1970a)
R13	-.85534	112.9830	-.304635E-03	-.463312E-05	192-271	Phillips(1970a)
R13b1	-17.06320	1501.6340	.648956E-01	-.914960E-04	215-320	Johns(1983)
R22	-5.40057	556.3200	.162973E-01	-.231479E-04	200-299	Phillips(1970a)
R23	-5.31765	434.5270	.203424E-01	-.369802E-04	190-257	Phillips(1970b)
R113	-7.32343	1070.4930	.174030E-01	-.182840E-04	240-450	ASHRAE(1976)
R114	-1.72411	391.4970	.714627E-04	-.599369E-06	199-331	Phillips(1970a)
R142b	-10.48450	1057.9760	.345580E-01	-.435000E-04	245-397	Johns(1983)
R152a	-2.60090	380.6430	.331645E-02	-.481126E-05	200-318	Phillips(1970a)
R123	-.70480	491.0300	-.563720E-02	.000000E+00	273-353	Shankland(1990)
R124	-.67950	285.4800	-.491470E-02	.000000E+00	273-363	Shankland(1990)
R125	3.63379	-268.4600	-.157500E-01	.146822E-04	253-333	Shankland(1990)
R134a	-5.82061	738.6060	.138540E-01	-.164426E-04	251-343	Shankland(1990)
R32	-5.35949	550.8070	.172998E-01	-.280974E-04	200-287	Phillips(1970b)
R141b	-813.0416	1610.2500	.351343E-01	-.361240E-04	273-353	Shankland(1990)

Fluid	A'	B' x10 ⁻³	C' x10 ²	D' x10 ⁵	Range(K)	Source
R141b	-9.460	1.4503	1.9418	-2.3553	273-353	Kumagai(1990)
R225ca	-12.095	1.8447	2.7663	-3.2461	273-353	Kumagai(1990)
R225cb	-11.193	1.7536	2.4777	-2.9094	273-353	Kumagai(1990)

T=298.15-423.15K, P=up to 6 MPa, Max, Dev.=not presented for R-134a

3.1.2 대체 냉매 액체의 점도

기체의 점성과는 달리 액체의 점성은 이론적인 계산보다 실험적인 측정에 의존한다. 특히 탄화 수소 계열 화합물의 점도 계산 방법을 적용하는 연구가 적지 않게 소개 되었다. Reid 등²⁴⁾은 탄화 수소계열 화합물의 액체 점도를 예측할 수 있는 여러가지 방법을 제시하였으나 구조가 다른 화합물에 적용할 때에는 만족할 만한 결

과를 얻을 수 없는 방법이다.⁹⁾ Gordon 등²⁵⁾은 R11, R12, R13b1, R22, R115, R318, R502, R23, R113, 및 R114의 액체 냉매의 점도를 예측할 수 있는 실험식을 제안 하였으나 이들의 계산 결과와 JAR(1981)의 열물리 물성표와 비교할 때 상당한 차이가 발견되었다. Phillips과 Murphy²⁶⁾가 제안한 실험식이 지금까지의 기존 실험값과 비교할 때 가장 신빙성이 (0.5% 이내의 편차) 있는 것으로 확인되었다.⁹⁾ Phillips과 Murphy²⁶⁾가 제안한 식은 4개의 상수를 갖는 실험식으로 다음과 같다.

$$\log_{10}\mu = A + B/T + CT + DT^2 \dots \dots \dots (3.9)$$

μ 의 단위는 contipoise(CP)이며 T 의 단위는 K이다.

1990년 Kumagai와 Takahashi²⁶⁾는 R141b, HCFC225ca (1, 1-dichloro-2, 2, 3, 3, 3-pentafluoropropane) HCFC225cb (1, 3-dichloro-1, 2, 3, 3, 3-pentafluoropropane) 포화액의 점도를 측정하였으며 Phillips과 Murphy²⁶⁾의 식과 유사한 실험식(3.10)을 제안하여 273K-353K 온도 범위 내에서 편차 0.5% 이내로 계산하였다.

$$\ln \mu = A'B'/T + C'T + D'T^2 \dots\dots\dots (3.10)$$

μ 의 단위는 mPa.s이며 T 의 단위는 K이다. 실험식의 계수 A, B, C, D 및 A', B', C', D' 은 Table 3.3과 같다.

3.2 대체 냉매의 열전도 계수

냉매의 열전도 계수는 전열 특성을 지배하는 중요한 전달 물성으로서 열교환기 설계의 필수적인 자료이다. 점도와 마찬가지로 기체의 열전도 계수도 기체 운동 이론에 따라 이론적인 예측이 가능하지만 액체의 경우에는 거의 불가능하다. 기체의 경우에도 이론적인 예측과 실험적인 측정치 사이에는 상당한 차이가 있으므로 설계 자료로 사용할 수 있는 정도의 정확한 자료는 실험에 의존할 수 밖에 없다. 측정 방법으로는 transient hot wire, coaxial cylinder, garded hot plate 등이 많이 사용되고 있으며 현재 사용되고 있는 각종 열전도 계수의 측정방법은 Table 3.1에 예시되어 있다.

3.2.1 증기의 열전도 계수

증기의 열전도 계수는 점도와 마찬가지로 일반적으로 대기압 상태의 증기 열전도 계수를 계산하고 고압에서의 열전도 계수는 압력의 영향을 보정하는 방법으로 계산한다. 대체로 증기의 열전도 계수는 온도의 상승과 함께 증가한다. 이것은 증기 점도의 온도 의존성과 유사하다. 저압 가스의 열전도 계수는 수정 Eucken의 식으로 비교적 간단히 계산할 수 있다.²⁹⁾

$$Kv^* = \frac{\mu^* C_v (C_1 + C_2 R/C_v)}{M} \dots\dots\dots (3.11)$$

$Kv^*(W/mK)$, $\mu(Pa.s)$, 및 $Cv(kJ/kgK)$ 는 대기압 하에서 열전도 계수, 점도, 및 이상 기체의 정적비열이다. M 은 분자량, R 은 일반기체상수이다.

식(3.11)의 상수 $C1, C2$ 에 대한 다수의 연구 결과가 있으나 실험치와 비교할 때 상당한 차이가 있다. Jung과 Radermacher에 의하면 JAR(1981)와 ASHRAE(1976)의 자료와 비교 검토한 결과 $C1=1.235, C2=1.9$ 일 때 평균 편차 2.66%, 최대 편차 8.74% 로써 실험치를 가장 잘 나타내었다. 증기의 열전도 계수에 대한 측정치가 많지 않은 상황에서 증기의 열전도 계수에 대한 압력의 영향을 계산하기 위하여 Stiel and Thodos³⁰⁾는 잔류 열전도 계수를 정의하고 이를 환산 밀도, 임계점의 압축성 인자, 분자량, 임계온도 임계압력의 함수로 표시하였다.

$$(Kv - Kv^*) \lambda Zc^5 = 14.0 \times 10^{-8} (\exp(-0.535p_r) - 1.0) \quad p_r \leq 0.5 \dots\dots\dots (3.12)$$

$$(Kv - Kv^*) \lambda Zc^5 = 13.1 \times 10^{-8} (\exp(-0.67p_r) - 1.069) \quad 0.5 \leq p_r \leq 2.0 \dots\dots\dots (3.13)$$

$$(Kv - Kv^*) \lambda Zc^5 = 2.976 \times 10^{-8} (\exp(-1.555p_r) + 1.069) \quad 2.0 \leq p_r \leq 2.8 \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\lambda = \frac{Tc^{1/6}}{M^{1/2} Pc^{2/3}}$$

$Kv, Kv^*(W/mK)$ 는 가압 증기의 열전도 계수, 대기압하에서 증기 열전도 계수, λ 는 열전도 계수 인자, Zc 는 임계점에서의 압축성 인자, p_r 는 환산밀도, $Pc(K)$ 는 임계온도 M 은 분자량, $Pc(atm)$ 는 임계압력 이다.

최근에 Richard 등³¹⁾, Gross 등³²⁾, Yata³³⁾는 대체 냉매 R-134a와 R-123의 증기 열전도 계수를 측정하였다.

R-134a의 증기 영역 열전도 계수는 303-343K 영역에서 Ricahard 등³¹⁾이 그리고 274-354K에서 Gross 등³²⁾이 측정하였으며 이들의 자료를 이용하여 Yata³³⁾는 다음과 같은 식으로 온도 범위 241K-353K, 압력범위 0.1MPa-Ps 영역에서 평균

편차 3% 이내로 계산 하였다.

$$K = B_{00} + B_{01}T + P(B_{10} + B_{11}T + B_{12}T^2) + P^3(B_{30} + B_{31}T + B_{32}T^2) \dots \dots \dots (3.15)$$

단위는 $[K]=mW/mK$, $[P]=MPa$, $[T]=K$ 이다.

R-123의 증기 영역 열전도 계수는 306-328K 영역에서 Richard 등³¹⁾, 305-364K 영역에서 Gross 등³²⁾이 측정하였다. 이들의 자료를 이용하여 Yata 등³³⁾은 포화 증기와 대기압하의 증기의 열전도 계수를 305-364K에서 3% 편차 이내에서 계산할 수 있는 실험식을 제안하였다.

$$K_{sat} = -10.25 + 0.06844 T_{sat} \quad (R123 \text{ 포화증기}) \dots \dots \dots (3.16)$$

$$K_{1atm} = -6.68 + 0.564 T$$

(대기압하의 R123 증기) (3.17)

단위는 $[K]=mW/mK$, $[P]=MPa$, $[T]=K$ 이다.

3.2.2 액체의 열전도 계수

Reid 등²⁴⁾이 지적하듯이 액체의 열전도 계수를 정확하게 예측하는 이론식은 없으며 Li³⁴⁾가 제안한 식이 비교적 정확한 식이다. 그러나 Yata 등³⁵⁾이 204-450K 영역에서 10여가지 액체 냉매의 열전도 계수를 측정하여 Li의 식으로 계산하여 비교한 결과, Li의 식은 메탄 계열의 냉매에는 비교적 정확하나 에탄 계열의 냉매에는 적절하지 않음을 발견하고 자신들의 실험치를 이용하여 실험식을 제안하였다.

Table 3.4 R134a vapor thermal conductivity coefficients, B_j in equation (3.15)³³⁾

i-j	0	1	2
0	-1.00635×10^1	7.74609×10^{-2}	0
1	6.65212×10^1	-4.08255×10^{-1}	6.32241×10^{-4}
3	7.22720×10^1	-4.07082×10^{-1}	5.74951×10^{-4}

Table 3.5 Liquid thermal conductivity coefficients to equation(3.18)⁹⁾

Fluid	A	B	C	Range(K)	Source
R11	.171700	-.28193E-03	.0	233-438	Yata(1984)
R12	.170200	-.33941E-03	.0	204-366	Yata(1984)
R13	.170000	-.42790E-03	.0	204-264	Yata(1984)
R13B1	.129500	-.26303E-03	.0	233-320	Yata(1984)
R22	.226800	-.47877E-03	.0	234-354	Yata(1984)
R23	.330304	-.13600E-02	.17262E-05	179-293	Johns(1983)
R113	.133600	-.20630E-03	.0	254-449	Yata(1984)
R114	.133600	-.23838E-03	.0	263-387	Yata(1984)
R142B	.243747	-.73864E-03	.69241E-06	245-397	Johns(1983)
R152A	.304121	-.92840E-03	.87832E-06	232-375	Johns(1983)
R123	.115989	-.60425E-04	.25000E-06	298-348	Shankland(1990)
R124	.158800	-.29774E-03	.0	234-366	Yata(1984)
R125	.259642	-.99969E-03	.10826E-05	307-332	Shankland(1990)
R134A	.258258	-.73235E-03	.46428E-06	298-348	Shankland(1990)

$$K = A + BT + CT^2 \dots\dots\dots (3.18)$$

K와 T의 단위는 [W/mK]와 [K]이며 식(3.18)의 계수는 Table 3.5에 있다.

Yata³³⁾는 R-134a와 R123의 액상 열전도 계수에 관한 최근의 자료를 이용하여 압력의 영향을 고려한 좀 더 정확한 계산식을 제안하였다.

R-134a의 액상 열전도 계수의 실험자료 - Gross 등³²⁾, Ross 등³⁶⁾, Yata³⁷⁾, Kobayashi 등³⁸⁾ - 를 이용하여 254-363K와 Ps-30MPa 영역에서 2% 편차 이내로 계산할 수 있는 실험식을 제

안하였으며 R123의 액상 열전도 계수의 실험자료 - Gross 등³²⁾, Tanaka³⁹⁾, Kobayashi⁴⁰⁾, Yata³⁷⁾, Fukushima⁴¹⁾ - 를 이용하여 252-373K, Ps-30 MPa 영역에서 편차 2% 이내로 계산할 수 있는 실험식을 제안하였다. Yata³³⁾의 실험식은 다음과 같다.

$$K = A_{00} + A_{01} T + (P - P_s) (A_{10} + A_{11} T + A_{12} T^2) + (P - P_s)_2 (A_{20} + A_{21} T + A_{22} T^2) + (P - P_s)_3 (A_{30} + A_{31} T + A_{32} T^2) \dots\dots\dots (3.19)$$

Table 3.6(a) R134a liquid thermal conductivity coefficient A_{ij} in equation (3.19)³³⁾

i-j	0	1	2
0	2.08425×10^1	-4.25584×10^{-1}	0.
1	7.33423×10^0	-5.01525×10^{-2}	9.36972×10^{-5}
2	-1.96787×10^{-1}	1.39264×10^{-3}	-2.50637×10^{-6}
3	0.	0.	0.

(b) R123 liquid thermal conductivity coefficients A_{ij} in equation (3.19)³³⁾

i-j	0	1	2
0	1.63175×10^2	-2.90282×10^{-1}	0
1	2.30183×10^0	-1.43892×10^{-2}	2.64289×10^{-5}
2	-2.53110×10^{-2}	1.67082×10^{-4}	-2.83606×10^{-7}
3	4.98296×10^{-5}	-3.25232×10^{-7}	5.38515×10^{-10}

Table 3.7 Surface tension constants in equation (3.21)

Fluid	σ_0	n	Temp. Range(K)	Source
R11	62.00	1.250	160-471	Okada(1988)
R12	56.52	1.270	125-385	Okada(1988)
R13	50.60	1.280	90-302	Okada(1988)
R13b1	52.21	1.260	105-340	Okada(1988)
R22	61.23	1.230	115-369	Okada(1988)
R23	65.62	1.290	210-299	Okada(1988)
R113	55.66	1.240	230-487	Okada(1988)
R114	50.84	1.240	180-419	Okada(1988)
R142b	56.39	1.240	150-410	Okada(1988)
R152a	54.20	1.150	150-386	Okada(1988)
R123	54.85	1.227	237-443	Japan(1990)
R134a	55.44	1.220	232-363	Japan(1990)

단위는 $[K]=mW/mK$, $[P]=MPa$, $[T]=K$ 이다.

3.3 표면 장력

표면 장력은 기포 형성 기구의 중요한 변수로서 열교환기 내에서 수반되는 비등 및 응축 과정의 2상(two phase) 열전달 과정 연구의 필수적인 물성이다. 일반적으로 표면 장력은 온도의 상승과 함께 감소하며 임계점에서는 상경계가 존재하지 않으므로 표면 장력도 존재하지 않는다. 표면 장력의 추산은 대부분 실험식에 의존하고 있으나 임계점 상수와 표준 비등 온도를 이용하여 제안한 Brock과 Bird⁴²⁾의 일반식도 유용하게 사용할 수 있다.

$$\sigma = Pc^{2/3} Tc^{1/3} Q(1.0 - Tc)^{11/9} \dots\dots\dots (3.20)$$

$$Q = 0.1196 [1.0 + Tbr \ln(Pc/1.01325) / (1.0 - Tbr)]$$

σ 는 표면장력(mN/m), Pc 는 임계압력(bar), Tc 는 임계온도(K), Tr 는 환산온도, Tbr 은 표준 비등 온도(K)이다.

Okada와 Watanabe⁴³⁾는 17가지의 냉매의 표면 장력을 수집 정리하고 van der Waals식을 사용하여 두개의 상수(표면장력 진폭 σ_0 과 지수 n)와 환산온도의 함수(3.21)로 표시하였다.

$$\sigma = \sigma_0(1.0 - Tr)^n \dots\dots\dots (3.21)$$

Jung과 Radermacher⁹⁾는 식(3.21)과 Table 3.7의 상수를 사용하여 냉매의 표면 장력을 0.3 mN/m의 오차 이내로 계산 하였으며 식(3.20)과 식(3.21)의 결과를 비교하여 Brock and Bird의 일반식으로 평균 편차 2.23%, 최대 편차 6.94% 이내로 계산할 수 있다고 보고하였다. Chae 등⁴⁴⁾은 R134a과 R123의 표면장력을 각각 $-20 \sim +100^\circ C$ 와 $-20 \sim +150^\circ C$ 범위에서 측정하여 0.15 mN/m 오차 이내로 계산할 수 있는 식(3.22)을 제시하였다.

$$\sigma = \sigma_0 Tr^{1.26}$$

$$\sigma_0 = 60.8 \text{ mN/m for R134a}$$

$$-20 \leq T \leq 100^\circ C \dots\dots\dots (3.22)$$

$$\sigma_0 = 58.1 \text{ mN/m for R123}$$

$$-20 \leq T \leq 100^\circ C$$

4. 결 론

대체 냉매의 열역학 및 전달 물성에 관한 최근까지의 연구 자료를 수집 정리 하였다. 대체 냉매를 개발 중이거나 이미 일부를 개발한 국가를 중심으로 대체 냉매의 열-물리 물성에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 대체 CFC를 사용하는 시스템의 설계에 필요한 기본 물성으로서의 중요성과, 환경 문제와 연관하여, 연구의 시급성에 대한 국제적인 인식을 기반으로 각국의 연구자들은 국제적인 공동연구 혹은 최소한 연구 결과의 공유를 위하여 노력하고 있다.

국내에서도 대체 냉매의 열-물리 물성 연구의 중요성을 인식을 하고 물성 측정 및 이와 관련된 실험 연구를 준비하고 있으나 아직 대체 냉매 물성의 측정과 관련된 연구사례가 발표된 바는 없으며 외국의 실험 자료를 이용한 순수 및 혼합 냉매의 열역학적 물성의 추산에 관한 연구는 다수 발표되었다.

열역학적 물성으로 각국에서 수행된 연구 결과를 통하여 제안된 HCFC 및 HFC계열 대체 냉매 R23, R125, R143a, R134a, R152a, R124, R152b, R123의 (1) 이상기체 정압비열 (2) 증기압 (3) 포화액 비체적 (4) P-V-T 거동과 상태 방정식 그리고 이들을 이용하여 계산한 포화 상태의 열역학 표($T_s, P_s, v_f, v_g, h_f, h_g, s_f, s_g, C_{pfg}$)를 제시하였다.

전달 물성의 계산은 이론식 보다는 실험식에 중점을 두었으며 R11, R12, R13, R13b1, R22, R23, R113, R114, R142b, R152a, R123, R124, R125, R134a, R32, R141b, R225ca, R225cb의 (1) 점도 (2) 열전도계수 (3) 표면 장력에 관한 실험식을 제시하였다.

관련된 자료의 수가 많고 자료 수집의 어려움으로 말미암아 2차 자료의 분석에 근거한 기술이 적지 않으나 가능한한 1차 자료에 근거하여 정리하였으며 1차자료에서 제시된 실험식은 수정하지 않고 원문대로 인용하였다. 연구 자료 목록을 작성하면 관련 연구에 도움이 되겠다는

생각에서 직접 구하여 분석하지 못한 자료이지만 참고 문헌 및 자료 목록에 수록한 자료의 있음을 밝힌다.

기존의 자료를 바탕으로 열-물리 물성 연구의 틀을 마련하여 이미 개발된 대체 냉매를 포함하여 앞으로 개발될 대체 냉매의 물성에 대한 연구가 국내에서도 활발히 수행되기를 기대하며 아울러 수집 정리된 자료가 새로운 냉동 시스템의 설계를 포함한 대체 CFC 이용 기술에 유용하게 이용되길 기대한다.

참 고 문 헌

1. Molina, M.J., and F.S. Rowland. 1974. "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone." *Nature*, Vol. 249, pp.810-812.
2. McLinden, M.O and Didion, D.A. 1987; "Quest for Alternatives", *ASHRAE Journal*, December, pp.32-42.
3. 냉동 공조, 1991; "CFC규제에 따른 냉동 공조기 제조업체 대응 실태", 제13호, 11월, pp.14-24.
4. 냉동 공조, 1992; "냉매 사용 규제 실시", 제14호, 2월, p.12
5. Kopko W.L., 1989; "Beyond CFCs: Extending the Search for New Refrigerants", *CFCs: Today's Option-Tomorrow's Solutions*, Prdceedings of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, pp.39-46.
6. Shankland, I.R. 1989; "CFC Alternates for Thermal Insulation Foam", *CFCs: Today's Option-Tomorrow's Solutions*, Prdceedings of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, pp.87-95.
7. Spauschus, H.O., 1989; "Compatibility requirement for CFC alternatives", *CFCs: Today's Options-Tomorrow's Solutions*, Prdceedings of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, NIST, Sept. 27-28, pp.33-38.
8. Boot, J.L., 1989; "An Overview of CFC Alternatives for Domestic Refrigerators and Freezers" *CFCs: Today's Option-Tomorrow's Solutions*, Prdceedings of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, pp.75-80.
9. Jung, D. and Radermacher, R 1991, "Transport Properties and Surface Tension of Pure and Mixed Refrigerants", Paper # 3445, 1991 ASHRAE Winter Meeting, Jan. 19-23, N.Y. U.S.A.
10. Keenan, J.H., Chao, J., and Kaye, J. 1983; "Gas Table: Thermodynamic Properties of Air Products of Combustion and Component Gases", John Wiely and Sons, p.179.
11. McLinden, M.O. 1989; "Thermodynamic Properties of CFC Alternatives-A Survey of Available Data", *CFCs: Today's Option-Tomorrow's Solutions*, Prdceedings of ASHRAE's 1989 CFC Technology Conference, pp.17-31.
12. McLinden, M.O. Haynes, W.M., Watson, J.T. R., and Watanabe, K 1991 "A Survey of Current Worldwide Research on the Thermophysical Properties of Alternatives Refrigerants", NISTIR 3969, NIST, U.S.A.
13. Shankland, I.R., Basu, R.S., and Willson, D.P., 1990 "Thermophysical Properties of HCFC-124: An Environmentally acceptable Refrigerant", *CFC Alternatives*, ASHRAE Technical Data Bulletin, Vol. 6, No. 1, pp.19-24.
14. Kamei, A., Diao, C.-C., Sato, H., and Watanabe, K., 1990 "Thermodynamic charts and performance of FC-134a and FC-152a", *CFC Alternatives*, ASHRAE Technical Data Bulletin, Vol. 6, No. 1, pp.10-18.
15. Morrison, G. and McLinden, M.O., 1986 "Application of a hard sphere equation of state to refrigerants and refrigerant mixtures", NBS Technical Note 1226.
16. Gallagher, J., McLinden, M. and Morrison, G., 1991 "NIST thermodynamic properties of refrigerants and refrigerant mixtures database", NIST Standard Reference Database 23.
17. Sand, J.R., Vineyard, E.A. and Nowak, R.J.,

- 1990 "Experimental performance of Ozone-safe alternative refrigerants", CFC Alternatives, ASHRAE Technical Data Bulletin, Vol. 6, No. 1, pp.66-75.
18. Nagaoka, K.Y., Tanaka, H, Kubota, and Makita, M, 1986 "A New Correlation for the Viscosity of Gaseous Fluorocarbon Refrigerants", Int. J. Thermophysics, Vol. 7, No. 5, pp. 1023-1031.
19. Stiel, L.I. and Thodos, G. 1964a "The Viscosity of Polar Substances in the Dense Gaseous and Liquid Regions." AIChE Journal, Vol. 10, pp.275-277.
20. Takahashi, M., Takahashi, S., and Iwasaki, H. 1985. "Viscosities of Gaseous Chlorotrifluoromethane(R13)" J.Chem. Eng. Data, Vol. 30, No.1, pp.10-14
21. Takahashi, M., Yokoyama, C., and Takahashi, S. 1987. "Viscosities of gaseous R13B1, R-142 b, and R152a." J.Chem. Eng. Data, Vol.32, pp. 98-103.
22. Takahashi, M., Yokoyama, C., and Takahashi, S. 1990a. "Gas Viscosities of HCFC-123 and HCFC123a." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov. 6-8, pp.115-118.
23. Takahashi S. 1990b "Viscosities of Environmentally Acceptable Fluorocarbons", Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov. 6-8, pp.139-142.
24. Reid, R.C., Praunitz, J.M., and Poling, B.E. 1987 'The Properties of Gases and Liquids', 4th ed. New York, McGraw-Hill.
25. Gordon, G.T., Hamilton, J.F., and Fontaine, W.F. 1969 "An Empirical Equation for Predicting the Viscosity of Liquid Refrigerants" ASHRAE Transactions, Vol. 75, pp.40-52.
26. Philips, T.W. and Murphy, K.P. 1970a "Liquid Viscosity of Halogenated Refrigerants" ASHRAE Transactions, Vol. 76, pp.146-156.
27. Philips, T.W. and Murphy, K.P. 1970b "Liquid Viscosity of Halocarbons." J.Chem. Eng. Data, Vol. 15, pp.304-307.
28. Kumagai, A., and Takahashi, S. 1990. "Saturated Liquid Viscosities of Environmentally Acceptable Fluorocarbons." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov. 6-8, pp.119-122.
29. Svehla, R.A. 1962. "Estimated Viscosities and Thermal Conductivities of Gases at High Temperature." NASA Tech. Rept., R-132, Cleveland, OH : Lewis Research Center, U.S.A.
30. Stiel, L.I. and Thodos, G. 1964b "The Thermal Conductivity of Non-polar Substances in the Dense Gaseous and Liquid Regions." AIChE Journal, Vol. 10, pp.26-30.
31. Richard R.G. et al 1989, Int. J. Thermophysics, Vol. 10, No. 3, p.673.
32. Gross, U. et al 1989, I.I.F.-I.I.R-Commission-Tel Aviv (Israel)
33. Yata, J 1990 "Thermal conductivity of Alternatives CFCs." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov. 6-8, pp.143-146.
34. Li, C.C. 1970. "A Generalized Correlation of Liquid Thermal Conductivity of Halogenated Hydrocarbon Refrigerants", ASHRAE Transaction, Vol. 76.
35. Yata, J., Minamiyama, T., and Tanaka, S. 1984. "Measurement of Thermal Conductivity of Liquid Fluorocarbons", Int. J. Thermophysics, Vol. 5 No. 2, pp.209-218.
36. Ross, M. et al 1989, I.I.F.-I.I.R-Commission-Tel Aviv (Israel)
37. Yata, J et al 1989, Proc. 2nd Asian Thermophysical Properties Conference, p.201
38. Kobayashi Y. et al 1990, Proc. 27th National Heat Transfer Symp. Japan, Vol. 1, p.412.
39. Tanaka, Y. et al, 1988, Int. J. Thermophysics, Vol. 9, No. 4, p.465.
40. Kobayashi Y. et al, 1989, Proc. 26th National Heat Transfer Symp. Japan, Vol. 1, p.61.

41. Fukushima, M. et al 1989, 54th Annual Meeting Japan Society, Chem. Eng. p.210
42. Brock, J.R. and Bird, R.B. 1955. *AIChE Journal*, Vol., p.174.
43. Okada, M and Watanabe, K 1988 ; "Surface Tension Correlation for Several Fluorocarbon Refrigerants", *Heat Transfer-Japanese Research*.
44. Chae, H.B., Schmidt, J., and Moldover, H.R. 1990. "Surface Tension of Refrigerants R123 and R134a.", *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 35, pp.6-8.

관련 자료 목록

- Basu, R.S., and D.P. Willson. 1989. "Thermophysical properties of 1, 2, 2, 2-tetrafluoroethane." *Int. J. Thermophysica*, Vol. 3, pp. 85-102.
- Bender, R., Bier, K., and Maurer, G. 1980. "Heat capacity at constant pressure and Joule-Thomson coefficient of monochloro-1, 2, 2, 2 tetrafluoroethane." *Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.12, pp.335-341.
- Chem, S.S., Rodgers, A.S., Chao, J., Wilhoit, J.C., and Zwolinski, J.C. 1975. "Ideal gas thermodynamic properties of six fluoroethanes." *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 4, pp.441-456.
- Cherneeva, L.I. 1958. "Experimental investigation of the thermodynamic properties of Freon 142." *Teplenergetika*, Vol.7, pp.38-43.
- Döring, R., and Löffler, H.J. 1968. "Thermodynamische eigenschaften von trifluoromethane (R23)." *Kältetechnik-Klimatisierung*, Vol.20, pp.342-348.
- Ernst, G., and Büsser, J. 1970. "Ideal and real gas state heat capacities C_p of C_3H_8 , $i-C_4H_{10}$, C_2F_5Cl , CH_2ClCF_3 , $CF_2ClCFCl_2$, and CHF_2Cl ." *Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.2, pp.787-791.
- Friend, D.G., Fly, J.F., and Ingham, H. 1989. "Thermophysical Properties of methane." *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol.18, pp.583-638.
- Fujiwama, K., Kubota, H., Tanaka, Y., and Makita, T. 1986. Program and abstracts ; the 27th high pressure conference of Japan, pp. 230-231, Sapporo, Japan.
- Fukushima, M., and Watanabe, N. 1990. "Measurements of the Vapor-Liquid coexistence and curve PVT properties of HCFC124." *Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties*, Nov.6-8, pp. 79-82.
- Higashi, Y., Ashizawa, M., Kabata, Y., Majima, T., Uematsu, Y., and Watanabe, K. 1987. "Measurements of vapor pressure, vapor-liquid coexistence curve and critical parameters of refrigerant 152a." *JSME International Journal*, Vol.30, pp.1106-1112.
- Hou, Y.C., and Martin, J.J. 1959. "Physical and thermodynamic properties of trifluoromethane." *AIChE Journal*, Vol.5, No.1, pp.125-129.
- Hori, K., Okazaki, S., Uematsu, M., and Watanabe, K. 1982. "An experimental study of thermodynamic properties of trifluoromethane." *Proceedings of the 8th Symposium on thermophysical Properties*, ASME. Vol 2. pp.380-386.
- Iso, A., and Uematsu, M. 1989. "Thermodynamic properties of 1, 1-difluoroethane in the super-critical and high-density regions." *Physica A* 156, pp.454-466.
- JANAF Thermochemical Tables. 1985. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol 14, Supplement 1.
- Japan 1990, 표면 장력 측정 시험 - 'CFC 대체 물질 응용 기술 개발 조사 보고서', 일본 고분자 소재 학회, pp.38-52.
- Japanese Association of Refrigeration. 1975.

- "Thermophysical properties of refrigerants, chlorodifluoromethane R22." JAR(Tokyo).
- JAR. 1981 'Thermophysical Properties of R12, R22, R114', Touko, ; Japanese Association of Refrigeration.
- Kabata, Y., Tanikawa, S., Uematsu, M., and Watanabe, K. 1989. "Measurements of the vaporliquid coexistence curve and the critical parameters for 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane." *International Journal of Thermophysics*, Vol.10, pp.605-616.
- Kabata, Y., Yamagushi, S., Takiguchi, Y., and Uematsu, M. 1990. "Measurements of the Vapor Pressure of 2, 2, 2,-Trifluoroethanol in the Temperature Range from 320 to 400 K." *Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties*, Nov.6-8, pp.373-376.
- Kamimura, T., Watanabe, N., and Fukushima, M. 1989. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the SCEJ*, p.196, as referenced by Tanikawa et al.(1989).
- Kanome, Y., and Fujita, I. 1986. B.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Keio University, Yokohama, Japan.
- Kanungo, A., Oi, T., Popowicz, A., and Ishida, T. 1987. "Vapor pressure isotope effects in liquid methylene difluoride." *Journal of Physical Chemistry*, Vol.91, pp.4198-4203.
- Kohlen, R., Kratzke, H., Müller, S. 1985. "Thermodynamic properties of saturated and compressed liquid difluorochloromethane." *Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol. 17, pp.1141-51.
- Kubota, H., Tanaka, Y., Makita, t., Kashiwagi, H., and Noguchi, M. 1988. "Thermodynamic properties of 1-chloro-1, 2, 2, 2-tetrafluoroethane(R124)" *International Journal of Thermophysics*, Vol.9, pp.85-101.
- Kubota, H., Yamashita, T., Tanaka, Y., and Makita, t. 1989. "Vapor pressures of new fluorocarbons." *International Journal of Thermophysics*, Vol.10, pp.629-638.
- Kubota, H., Zheng, Q., Tanaka, Y., and Matsuo, S. 1990. "Vapor-Liquid Equilibria of the HCFC123+HFC134a System under High Pressure." pp.465-468.
- Kumagai, K., Yada, N. ; Sato, H. ; and Watanabe, K. 1989. "A study of PVT properties of HCFC 142b." *Proceedings of the Tenth Japan Symposium on Thermophysical properties*, pp.67-70.
- Löffler, H.J., and Jaeger, H.P. 1967. "Wie verhalten sich öl-R23-gemisch in kältemaschin ?" *Kältetechnik* Vol.19, pp.237-240. Cited by Döring and Löffler, 1968.
- Luft, N.W. 1954. "Assignment of torsional frequencies in some halogenated ethanes" *Journal of Chemical Physics*, Vol.22, pp.155-156.
- Majima, T., Uematsu, M., and Watanabe, K. 1987. "Measurements of PVT properties of refrigerant 152a." *Proceedings of the Eighth Japan Symposium on Thermophysical properties*, pp.77-81.
- Makita, T. 1990. "Environmentally Acceptable Alternative Refrigerants and Their Thermophysical Properties." *Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties*, Nov.6-8, pp.127-130.
- Malbrunot, P.F., Meunier, P.A., Scatena, G.M., Mears, W.H., Murphy, K.P., and Sinka, J.V. 1968 "Pressure-Volume-Temperature behavior of difluoromethane." *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol.13, pp. 16-21.
- Maezawa, Y., Sato, H., and Watanabe, K. 1989. "Saturated liquid densities of HCFC 142b." *Proceedings of the Tenth Japan Symposium on Thermophysical properties*, pp.71-74.

- Maezawa, V., Sato, H., and Watanabe, K. 1990. "Saturated liquid densities and bubble-point pressures of the binary HFC 152a + HCFC 142b system." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.91-94.
- Majima, T., Uematsu, M., and Watanabe, K. 1987. "Measurements of PVT properties of refrigerant 152a." Proceedings of the 8th Japan Symposium on thermophysical Properties, pp.77-80.
- Martin, J.J., and Y.C. Hou. 1955. "development of an equation of state for gases." *AIChE J.*, pp.142-151.
- Masui, R., Haynes, W.M., Chang, R.F., Davis, H.A., and Levelt Sengers, J.M.H. 1984. "Density in compressed fluids by combining hydrostatic weighing and magnetic levitation." *Review of Scientific Instruments*, Vol.55, pp.1132-1142.
- Mears, W.H., Stahl, R.F., Orfeo, S.R., Shair, R.C., Kells, L.F., Thompson, W., and McCann, H. 1955. "Thermodynamic properties of halogenated ethanes and ethylenes." *Ind. Eng. chem.*, Vol.47, No.7, pp.1449-1454.
- Mears, W.H. ; Stahl, R.F. ; Orfeo, S.R. ; Shair, R. C. ; Kells, L.F. ; Thompson, W.F. ; and Mccann, H. 1955. "Thermodynamic properties of halogenated ethanes and ethylenes." *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.47, pp.1449-1454 and supporting documentation deposited as Document 4502, ADI Auxiliary Publications Office, Library of Congress, Washington, DC.
- Nakagawa, S., Sato, H., and Watanabe, K. 1990. "Measurements of Isobaric Heat Capacity of Liquid HCFC-142b." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.103-106.
- Nakagawa, H., Takaishi, Y., and Oguchi, K. 1990. "Measurement of the Vapor Pressure of HCFC-134/Naphthenic Refrigeration Oil System.", Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.83-86.
- Neilson, E.F., and White, D. 1957. "The heat capacity, heat of fusion, heat of transition and heat of vaporization of chlorodifluoromethane between 16°K and the boiling point." *Journal of the American Chemical Society*, Vol.79, pp.5618-5621.
- Nishiumi, H. ; and Yokoyama, T. 1990. "Vapor-Liquid Equilibrium for the System of R134a-R22." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.96-98.
- Oguchi, K., and Takaishi, Y. 1989. "Measurement of saturated liquid density of HCFC-123." "Proceedings of the Tenth Japan Symposium on Thermophysical properties, pp.55-58.
- Okada, M., Uematsu, M., and Watanabe, K. 1986. "Orthobaric liquid densities of trifluoromethane, dichlorodifluoroethane, chlorodifluoromethane, 1, 1, 2-trichlorotrifluoromethane, 1, 2-dichlorotetrafluoroethane, and of the azeotropic mixture of (chlorodifluoromethane + chloropentafluoroethane) between 203 and 463k." *Journal of Chemical Thermodynamics*, Vol.8, pp. 527-543.
- Piao, C.C., Sato, H., and Watanabe, K. 1988. "A Study of Thermodynamic properties of CFC alternative R134a." Proceedings of the 9th Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp.235-238.
- Piao, C.C., Sato, H., and Watanabe, K. 1989. "an experimental study for TVT properties CFC alternative refrigerant 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane(R-134a)," *ASHRAE Technical dat bulletin*, Vol.6, No.1, pp.1-9.
- Piao, C., Ikeya, Y., Sato, H., and Watanabe, K.

1990. "An Experimental Study of Isobaric Specific Heats for CFC Alternatives." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.99-102.
- Popowicz, A., Oi, T., Shulman, J., and Ishida, T. 1982. "Vapor pressure isotope effects in liquid fluorofom." *Journal of Chemical Physics*, Vol.76, pp.3732-3743.
- Riedel, L. 1941. "Bestimmung der thermischen und kalorischen eigenschaften von difluoromonochoräthan." *Zeitschrift für die gesamte Kläte-Industrie*, Vol.48, No.7, pp.105-107.
- Rodgers, A.S., Chao, J., Wilhoit, R.C., and Zwolinski, B.J. 1974. "Ideal gas thermodynamic properties of eight chloro- and fluoromethanes." *Journal of Physical Chemistry Ref. Data* 3, pp.117-140.
- Rubio, R.G., Zollweg, J.A., and Streett, W.B. 1989. "A P-V-T surface for trifluoromethane." *Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie*, Vol.93, pp.791-800.
- Russel, O., Golding, D.R.V., and Yost, D.M. 1944. "The heat capacity, heats of transition, fusion and vaporization, vapor pressure, and entropy of 1, 1, 1 trifluor oethane." *Journal of American Chemical Society*, Vol.66, pp.16-20.
- Saitoh, A., Sato, H., and Watanabe, K. 1988. "Measurement of heat capacity at constant pressure for liquid R134a." Program and Abstracts of Papers of the 29th High Pressure Conference of Japan, pp.114-115, Fujisawa, Japan.
- Sato, H. 1990. "Thermodynamic Properties of CFC Alternatives," Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.135-138.
- Sato, H., Uematsu, M., Watanabe, K., and Okada, M. 1987. "Saturated liquid density of 1, 1-difluoroethane (R 152a) and thermodynamic properties along the vapor-liquid coexistence curve." *Fluid Phase Equilibria*, Vol.36, pp.16-20.
- Sato, H., Kamei, A., Qian, Z.Y., and Watanabe, K. 1988. "A practical procedure for calculating thermodynamic properties of refrigerants." Proceedings of the 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Vol.1, pp.18-23, Seoul, Korea.
- Smith, D.C., Brown, G.M., Nielsen, J.R., Smith, R.M., and Liang, C.Y. 1952. "Infrared and raman Spectra of fluorinated Ethanes. III. The series CH_3CF_3 , $\text{CH}_3\text{CF}_2\text{Cl}$, CH_3CFC_2 , and CH_3CCl_3 ." *Journal of Chemical Physics*, Vol.20, pp.473-486.
- Soll, J. 1938. U.S. Patent 2, 118, 901. Cited in Mears et al. 1955. *Ind. Eng. Chem.*, Vol.47, pp.1449-1454.
- Sukornick, B. 1989. "Potentially acceptable substitutes for the chlorofluorocarbons: properties and performance features of HFC-134a, HCFC-123, and HCFC-141b." *International Journal of Thermophysics*, Vol.10, pp.553-561.
- Tamatsu, T., Sato, H., and Watanabe, K. 1990. "Measurements of PVT Properties of HFC-134." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.83-86.
- Tanaka, Y. et al, 1989, Proc. Annual Meeting of Japan Society, Refrigeration, p.9
- Tanikawa, W., Kabata, Y., Sato, H., and Watanabe, K, 1989 "Measurement of the vapor-liquid coexistence curve in the critical region of HCFC123" Proceedings of the 2nd Asian Thermophysical Properties Conference, pp.513-518.
- Thinh, T.P., Duran, J.L., Ramalho, R.S., and Kalia-guine, S. 1971. "Equations improve C_p^0 predictions." *Hydrocarbons Processing*,

- vol.50, pp.98-104.
- UNEP. 1987. Montreal protocol for substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme.
- Ueno, Y., Sekikawa, M., Nagasaka, Y., and Nagashima, A. 1990. "The Thermal Conductivity of HCFC-123 and HFC-134a in the Liquid Phase." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov.6-8, pp.123-126.
- Valentine, R.H., Brodale, G.E., and Giauque, W.F. 1962. "Trifluoromethane : Entropy, low temperature heat capacity, heats of fusion and vaporization, and vapor pressure." Journal of Physical Chemistry, Vol.66, pp. 392-395.
- Valtz, A., Laugier, S., and Richon, R. 1986. "Bubble pressures and saturated liquid molar volumes of difluoromonochloromethane-fluorochloroethane binary mixture," International Journal of Refrigeration, Vol.9, pp.282.
- Vanderkooi, W.N., and De Vries, T. 1956. "The heat of capacity of gases at low pressure using a wire-ribbon method." Journal of Physical Chemistry, Vol.60, pp.636-639.
- Wagner, W. 1968. "Thermodynamische eigenschaften von trifluormethan (R23)." Kältetechnik-Klimatisierung, Vol.20, pp.238-240.
- Watanabe, K. 1989. "A challenge to the CFC problems-thermophysical properties of promising alternatives." Proceedings of the Second Asian Thermophysical Properties Conference, pp.45-55.
- Waxman, M., and W.T. chen. 1964. "A rugged null-type pressure transducer of high reproducibility for accurate gas phase PVT measurements." J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol.69C, pp.27-33.
- Weber, L.A. 1989a. "Vapor pressures and gas phase PVT data for 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane." International Journal of Thermophysics, Vol.10, pp.617-628.
- Weber, L.A. 1989b., National Institute of Standards and Technology. Manuscript, "Vapor pressures and gas-phase PVT data for 1, 1-dichloro-2, 2, 2-trifluoroethane," submitted for publication in Journal of Chemical and engineering Data.
- Weber, L.A., and Levelt Sengers, J.M.H. 1989. National Institute of Standards and technology, Gaithersberg, MD. Manuscript, "Critical Parameters and saturation densities of 1, 1-dichloro-2, 2, 2-trifluoroethane," accepted for publication in Fluid Phase Equilibria.
- Willson, D.P., and K.R. Hules. 1981. "Experimental study of the thermodynamic properties of 1, 2-dichloro-tetrafluoroethane." Proc. Eight Symp. Thermophysical Prop., pp.361-369. New York : ASME.
- Wilson, D.P., and Basu, R.S. 1988. "Thermodynamic properties of a new stratospherically safe working fluid-refrigerant 134a." ASHARE Transactions, Vol.94, Part.2.
- Yada, N., Uematsu, M., and Watanabe, K. 1988. "Study of the PVTx properties for binary R 152a+R 114 system" (in Japanese). Transactions of the JAR, Vol.5, No.1, pp. 107-115.
- Yamashita, T., Kubota, H., Tanaka, Y., Makita, T., and Kashiwagi, H. 1988. "Measurements of physical properties of new fluorocarbons." Proceedings of the Ninth Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp.227-230.
- Yamashita, T., Kubota, h., Makita, T., and Kashiwagi, H. 1989. "Physical properties of new halogenated hydrocarbons." Proceedings of the Tenth Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp.75-78.
- Yata, J., Hori, M., and Minamiyama, T. 1990. "Re-

fractive Index of HCFC-22 and HFC-13-4 a." Proceedings of the 11th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Nov. 6-8, pp.111-114.

Zander, M. 1968. "Pressure-Volume-Tempera-

ture behavior of chlorodifluoromethane (Freon 22) in the gaseous and liquid states." Proceedings of the 4th Symposium on Thermophysical Properties of Gases, Liquids and solids, ASME, pp.114-123.