

순수물질에 대한 포화액체밀도 상관식의 성능비교

이 경 렬, 박 경 근^{*†}

국민대학교 대학원 기계공학과, *국민대학교 기계자동차공학부

Performance Comparison of Correlations of the Saturated Liquid Densities for Pure Substances

Kyoung Youl Lee, Kyoung Kuhn Park^{*†}

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

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

ABSTRACT: A few correlation equations of the saturated liquid density are reviewed and a new equation is proposed. Performance of each equation is examined using the data listed in the ASHRAE table for 22 pure substance refrigerants. The new four-parameter equation yields an average absolute deviation of 0.03% for 22 refrigerants. Performance of the new four-parameter equation is found to be equivalent to those of the existing equations such as Hou-Martin equation(0.03%) and Iglesias-Silva-Hall equation(0.08%).

Key words: Correlation(상관식), Saturated liquid density(포화액체밀도), Refrigerant(냉매)

기 호 설 명

- a : 선형계수
- A : Iglesias-Silva-Hall 식(11)의 계수
- b : 지수 또는 계수
- c : 계수
- i : 데이터 번호, 항 번호
- k : 지수
- M : 분자량
- n : 지수 또는 계수
- N : 데이터 점의 개수
- P : 압력 [kPa]
- R : 기체상수 [kJ/kgK]
- T : 포화온도 [K]

- Z : 압축성 인자
- Z_{RA} : 수정 Rackett 식(7)의 상수

그 리 스 문 자

- α : 지수 또는 상수
- β : 지수 또는 상수
- θ : 온도의 함수(=1- T_r)
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- τ : 온도의 함수(=1/ T_r -1)
- ϕ : 온도의 함수[= (T - T_i)/(T_c - T_i)]

하첨자

- c : 임계점
- cal : 계산값
- f : 포화액체

† Corresponding author
 Tel.: +82-2-910-4679; fax: +82-2-910-4839
 E-mail address: pkk@kookmin.ac.kr

- g : 포화증기
- r : 환산상태
- t : 삼중점
- tbl : 상태량표의 값

1. 서론

냉매를 작동유체로 사용하는 시스템을 열역학적으로 해석할 때는 물질의 상태량들을 필수적으로 알아야 한다. 물질의 상태량 중 포화액체밀도는 냉동, 공조 분야에서 선택된 물질을 냉매로 사용하기 위하여 필요한 열역학적 상태량이며 특히, 냉매의 수송 및 저장이 필요한 경우에는 반드시 알아야 한다. 포화액체(saturated liquid)란 어떤 물질이 포화온도와 포화압력에서 평형상태의 액체로 존재할 때를 말한다. 포화액체밀도는 압력-비체적-온도(pressure-volume-temperature)면에서 포화액체곡선 위의 한 점으로 지정된다. 이는 증발이 시작되기 바로 직전의 상태이다. 포화액체밀도는 Clapeyron 식을 이용하여 증발엔탈피(enthalpy of vaporization)를 구할 때에 필요하며, 열전달의 예측을 위해 사용되는 상관식에는 포화액체밀도가 포함되어 있으므로 포화액체밀도의 정확한 계산은 열전달 계수의 산출에 영향을 미치게 된다.

따라서 물질을 냉매로 사용하기 위해서는 포화액체밀도를 모든 온도범위에서 정확하게 나타내는 상관식이 필요하다. 대표적인 포화액체밀도 상관식으로 Hou-Martin 식⁽¹⁾, Rackett 식⁽²⁾, 수정 Rackett 식⁽³⁾, Iglesias-Silva-Hall 식⁽⁴⁾ 등이 있다.

본 연구에서는 포화액체밀도에 관한 기존 상관식을 검토하며, 새로운 상관식을 제안하고 기존의 식과 비교하고자 한다. 비교를 위해서 신뢰도가 높다고 생각되는 ASHRAE 자료⁽⁵⁾를 데이터로 사용하여 성능이 우수한 상관식을 파악함으로써 개개 물질의 포화액체밀도의 정확한 계산 및 재현에 기여하고자 한다.

2. 포화액체밀도 상관식

많은 포화액체밀도 상관식들이 문헌을 통해서 제안되었다. 이와 관련하여 직선지름법칙(law of rectilinear diameter)으로 불리지는 다음 관계가

근사적으로 성립함이 알려져 있다.

$$\frac{\rho_f + \rho_g}{2\rho_c} = \alpha + \beta \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (1)$$

여기서 ρ_f 는 포화액체밀도, ρ_g 는 포화증기밀도, ρ_c 는 임계밀도, T_c 는 임계온도, α 와 β 는 상수이다. Guggenheim⁽⁶⁾은 여러 물질에 대한 실험값을 그래프 상에 표시하고 직선지름법칙에 기초하여 포화액체밀도와 포화증기밀도에 관한 다음의 경험적인 상관식을 얻어냈다.

$$\frac{\rho_f}{\rho_c} - 1 = \frac{7}{4} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/3} + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\rho_g}{\rho_c} - 1 = (-)\frac{7}{4} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/3} + \frac{3}{4} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 더하면 직선지름법칙을 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

Hou and Martin⁽¹⁾은 Guggenheim의 포화액체밀도 상관식을 다항식으로 일반화하여 식의 성능을 크게 향상시켰다. 즉 ρ_f 를 $[1 - (T/T_c)]^{1/3}$ 의 멱급수 형태로 다음과 같이 표현하였다.

$$\rho_r - 1 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n (1 - T_r)^{1/3} \quad (4)$$

또한, 무한급수인 식(4)의 우변에서 차례로 4 항만을 취하여 식을 구성하여도 성능 면에서 충분하다는 것을 밝혔다.

다항식 형태인 식(4)의 항들 중에서 포화액체밀도를 나타내는데 영향력이 크다고 생각되는 항들을 최적화 과정을 통해 선택하여 4 개 항으로 표현하면 다음과 같다(이하 HM4 식으로 약함).

$$\rho_r - 1 = a_1 \theta^{k_1} + a_2 \theta^{k_2} + a_3 \theta^{k_3} + a_4 \theta^{k_4} \quad (5)$$

여기서 $\theta = 1 - T_r$ 이며 $T_r (= T/T_c)$ 은 환산온도, $\rho_r (= \rho_f/\rho_c)$ 은 환산 포화액체밀도, k_i 는 지수이며 1/3의 정수 배수이다. 즉, $k_i = N_i/3$ 이며 $N_i = 1, 2, 3, \dots$ 이다. 식(5)는 포화액체밀도를 온도만의 함수로 표현한 것이며 현재 포화액체밀도를 나타내는 상관식으로 주로 사용되고 있다.

Rackett⁽²⁾은 간단한 형태의 다음 포화액체밀도 상관식을 제안하였다.

$$\log(1/\rho_r) = \theta^{2/7} \log Z_c \quad (6)$$

여기서 Z_c 는 임계 압축성인자(critical compressibility factor)이다. 준경험식 (6)은 환산온도와 임계 압축성인자의 함수로 포화액체밀도를 표현하고 있다. Rackett⁽²⁾에 의하면 식(6)은 일부 물질에 대해서만 비교적 잘 맞는다. 따라서 여러 냉매를 다루는데 있어서는 그 사용에 주의가 필요로 한다.

Spencer and Danner⁽³⁾는 Rackett 식(6)을 보완하여 보다 정확도가 높은 다음의 수정 Rackett 식을 제안하였다(이하 MR 식으로 약함).

$$\log \rho_f = \log \left(\frac{P_c}{RT_c} \right) - [1 + (1 - T_r)^{2/7}] \log Z_{RA} \quad (7)$$

여기서 P_c 는 임계압력, R 은 기체상수이고 Z_{RA} 는 수정 Rackett 식의 상수이다. 실험 데이터가 어느 정도 있는 경우 Z_{RA} 의 최적값은 선형 회귀분석(linear regression analysis)을 수행하여 결정된다.

Iglesias-Silva and Hall⁽⁴⁾은 16 개 냉매에 대해 다음 상관식을 제안하였다(이하 ISH1 식으로 약함).

$$\rho_r = \frac{1 + A_1(1 - \phi)^3 + A_3(1 - \phi)^n}{1 - A_2(1 - \phi)^{1-\beta}} \quad (8)$$

여기서 $n = 0.5$ 이고 β 는 0.32 ~ 0.34 사이의 값을 갖는다고 알려져 있다. A_1 은 냉매에 따라 최적화된 값을 갖는 매개변수이며 A_2, A_3 는 다음 식으로 결정된다.

$$A_2 = 0.03 [M(T_t/T_c)]^{0.5} - 27 \times 10^{-5} [M(T_t/T_c)]^2 (A_1 - 1) \quad (9)$$

$$A_3 = (1 - A_2)(\rho_t/\rho_c) - 1 - A_1 \quad (10)$$

여기서 M 은 분자량이고, T_t 는 삼중점 온도(triple point temperature), ρ_t 는 삼중점에서의 포화액체 밀도이다. $\phi = (T - T_t)/(T_c - T_t)$ 는 온도의 함수이다. 1 개의 매개변수 A_1 의 값을 냉매에 따라 최적화함으로써 A_2, A_3 의 값을 구할 수 있다.

Nasrifar et al.⁽⁷⁾은 삼중점 온도의 데이터가 없는 경우에 최저온도에서의 값을 이용하여도 식(8)이 성능 면에서 문제가 없음을 확인하였다. 또한 식(8)을 확장하여 혼합물에 대해서도 포화액체밀도를 계산하는데 적용하였다.

최근에 Chouaieb et al.⁽⁸⁾은 매개변수가 2 개인 다음의 상관식을 제안하고 포화액체밀도 계산을 수행하였다(이하 CGB 식으로 약함).

$$\ln \rho_r = a(1 + \theta^b - \exp(-\theta^b)) \quad (11)$$

여기서 $\theta = 1 - T_r$ 이다. 이 상관식은 냉매에 따라 a, b 값만을 최적화함으로써 포화액체밀도를 예측하게 된다. Chouaieb et al.은 식(11)이 수정 Rackett 식(7)보다 성능이 우수하다고 보고하였다.

3. 새로운 상관식의 제시

기존의 포화액체밀도에 관한 상관식들은 다음과 같이 밀도를 온도의 함수로 나타낸 형태이다.

$$\rho_r = f(1 - T_r) \quad (12)$$

여기서 양변을 T_r 로 나누어 종속변수를 온도의 역수로 선택하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\rho_r/T_r = f(1/T_r - 1) \quad (13)$$

Park⁽⁹⁾은 포화증기밀도가 온도에 따라 크게 변화하므로, 밀도보다는 밀도의 로그함수를 상관식의 종속변수로 선택하는 것이 효과적임을 밝힌 바 있다. 포화액체밀도에 대해서도 밀도의 로그함수를 종속변수로 택하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(\rho_r/T_r) = f(1/T_r - 1) \quad (14)$$

종속변수에 포함되어 있는 온도의 항을 우변으로 이항하고 임계점 부근의 포화액체밀도의 거동을 고려하면 최종적으로 매개변수가 4 개인 다음의 식을 얻을 수 있다(이하 New4 식으로 약함).

$$\ln \rho_r = a\tau^n + b\tau + c \ln T_r \quad (15)$$

여기서 τ 는 $(1/T_r - 1)$ 이다. 또한 여기서 New4

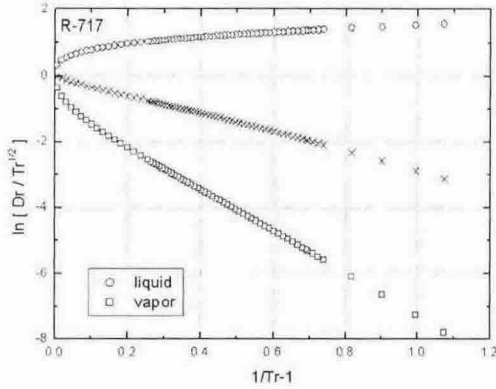


Fig. 1 Plot of $\ln(\rho_r/\sqrt{T_r})$ vs. $1/T_r-1$.

식(15)를 일부 물질의 포화액체밀도 데이터에 곡선 적합한 결과에 의하면 계수 c 의 값은 $1/2$ 에 가까웠으며, $c = 1/2$ 로 가정하여도 성능 면에서 충분하다고 가정하여 매개변수가 3 개로써 비교적 간단한 다음의 식을 얻었다(이하 New3 식으로 약함).

$$\ln(\rho_r/\sqrt{T_r}) = a\tau^n + b\tau \quad (16)$$

Fig. 1에서 보듯이 이와 같은 관계에서도 직선지름법칙이 성립함을 알 수 있다.

4. 상관식의 성능비교

본 연구에서는 포화액체밀도에 대한 상관식의 성능을 비교하고자 한다. 상관식의 성능비교를 위하여 비교적 신뢰도가 높다고 생각되는 ASHRAE 상태량표^[5]에 나와 있는 22 개 냉매에 대한 최저 온도에서 임계점까지의 포화액체밀도 데이터를 이용하였다. 상관식의 구성에 필요한 임계온도, 최저온도 또는 삼중점 온도, 임계밀도 값을 Table 1에 나열하였다. 평균 절대편차(AAD), 제공근 평균 제공편차(RMS)는 다음과 같이 정의한다.

$$AAD = \frac{1}{N} \sum_i |DEV_i| \quad (\%) \quad (17)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i DEV_i^2} \quad (\%) \quad (18)$$

Table 1 Critical temperature, minimum temperature and critical density

Subst.	T_c (K)	T_{min} (K)	ρ_c (kg/m ³)
R-22	369.30	173.15	523.80
R-23	299.28	118.02*	525.90
R-32	351.26	136.34*	424.00
R-125	339.17	172.52*	568.00
R-134a	374.21	169.85*	511.90
R-152a	386.41	154.56*	368.00
R-143a	345.86	161.34*	434.00
R-245fa	427.20	223.15	517.00
R-717	405.40	195.50*	225.00
R-718	647.10	273.16*	322.09
R-744	304.13	216.59*	466.50
R-50	190.56	90.69*	162.70
R-170	305.33	98.15	206.60
R-290	369.85	123.15	220.50
R-600	425.16	173.15	227.80
R-600a	407.85	173.15	224.40
R-1150	282.35	103.99*	214.20
R-1270	365.57	133.15	223.40
R-704	5.20	2.18*	69.64
R-728	126.19	63.15*	313.10
R-732	154.58	54.36*	436.10
R-740	150.66	83.80*	530.90

*triple point temperature

여기서 N 은 데이터 점의 개수이며, 편차(DEV)는 다음과 같다.

$$DEV = \frac{\Delta h_{cal} - \Delta h_{tbl}}{\Delta h_{tbl}} \times 100(\%) \quad (19)$$

3.1 매개변수가 4 개인 상관식의 성능비교

본 연구에서 제안하는 New4 식(15)와 HM4 식(5)의 성능을 비교하였다. 비선형 변수 상관식인 New4 식(15)의 경우에 최적화의 대상은 제공근 제공편차(RMS) 값이다. 우선 HM4 식(5)에 대해 각 항의 지수를 $1/3, 2/3, 1, 4/3$ 으로 고정할 경우에 대해 두 식의 성능을 비교하였다. 총 22 개 냉매에 대하여 두 상관식을 이용하여 포화액체밀도를 구했을 때 계산되는 평균 절대편차(AAD)를 Table 2에 나타내었다. 각각의 냉매에 대한 상관식의 성능을 비교하면 R-22, R-23, R-170, R-

Table 2 Comparison of the performance of equations for saturated liquid density

Subst.	NDP*	M**=1		M**=2		M**=3				M**=4		
		MR	ISHI	CGB	New2	ISH3	HM3	HM3 ^{opt}	New3	HM4	HM4 ^{opt}	New4
R-22	69	0.09	0.37	0.08	0.05	0.033	0.054	0.012	0.032	0.008	0.008	0.026
R-23	69	0.21	0.20	0.11	0.11	0.088	0.087	0.047	0.060	0.022	0.022	0.064
R-32	68	0.24	0.08	0.13	0.23	0.043	0.076	0.013	0.022	0.025	0.011	0.011
R-125	69	0.18	0.73	0.07	0.31	0.037	0.060	0.020	0.013	0.030	0.005	0.004
R-134a	69	0.20	0.42	0.11	0.19	0.056	0.085	0.012	0.012	0.035	0.006	0.012
R-152a	69	0.26	0.08	0.12	0.16	0.055	0.081	0.012	0.008	0.033	0.004	0.005
R-143a	66	0.25	0.35	0.10	0.13	0.054	0.082	0.013	0.009	0.032	0.005	0.010
R-245fa	67	0.25	0.69	0.08	0.23	0.036	0.033	0.033	0.060	0.034	0.013	0.031
R-717	67	0.19	0.08	0.04	0.29	0.027	0.021	0.021	0.043	0.022	0.021	0.019
R-718	69	2.93	2.08	1.09	0.25	0.484	0.402	0.072	0.046	0.189	0.030	0.045
R-744	67	0.49	0.51	0.01	0.05	0.015	0.010	0.007	0.004	0.007	0.004	0.003
R-50	28	0.13	0.02	0.03	0.14	0.012	0.029	0.007	0.032	0.011	0.006	0.008
R-170	67	0.12	0.34	0.18	0.13	0.081	0.102	0.064	0.100	0.056	0.066	0.069
R-290	67	0.12	0.18	0.12	0.05	0.058	0.087	0.035	0.047	0.054	0.015	0.033
R-600	67	0.13	0.09	0.16	0.13	0.065	0.081	0.022	0.044	0.030	0.028	0.036
R-600a	63	0.10	0.10	0.14	0.15	0.046	0.066	0.011	0.033	0.019	0.008	0.013
R-1150	67	0.24	0.27	0.16	0.12	0.049	0.080	0.008	0.045	0.019	0.005	0.006
R-1270	69	0.52	0.23	0.15	0.04	0.089	0.108	0.036	0.040	0.044	0.044	0.054
R-704	32	3.35	1.15	0.80	0.26	0.222	0.163	0.077	0.056	0.104	0.031	0.052
R-728	26	0.36	0.07	0.11	0.12	0.057	0.077	0.022	0.022	0.016	0.014	0.022
R-732	22	0.26	0.14	0.15	0.25	0.062	0.089	0.014	0.032	0.017	0.006	0.005
R-740	26	0.21	0.26	0.04	0.12	0.036	0.039	0.030	0.028	0.021	0.021	0.032
AVE.		0.49	0.38	0.18	0.16	0.078	0.087	0.027	0.036	0.038	0.017	0.025

*data from ASHRAE⁽⁵⁾

**the number of adjustable parameters for each equation

600, R-1270, R-728, R-740에 대하여는 지수를 고정한 HM4 식(5)가 나머지 15개 냉매에 대하여는 본 연구에서 새로 제안한 New4 식(15)가 좋게 나타났다. 전반적인 성능을 비교하면 New4 식(15)가 22개 냉매에 대하여 0.03%의 AAD로 ASHRAE 상태량표⁽⁵⁾를 재현하고 있어 0.04%의 지수를 고정한 HM4 식(5)보다 성능 면에서 약간 우수하다고 볼 수 있다.

다음으로 각각의 냉매에 대해 New4 식(15)와 지수를 최적화한 HM 식(5)의 성능을 비교하였다(이하 HM4^{opt} 식으로 약함). 각각의 냉매에 대해 살펴보면 R-32, R-125, R-717, R-744, R-732에 대하여는 New4 식(15)가 나머지 17개 냉매에 대하여는 지수를 최적화한 HM4^{opt} 식이 우수하게 나타났다. 전반적인 성능을 비교해 보면 HM4^{opt} 식이 0.02%의 AAD를 나타내어 0.03%의 New4 식(15)보다 좋지만 그 차이는 미미하다. HM4^{opt} 식의 경우에는 냉매에 따라 각 항의 지수를 최적

화해야 하는 단점이 있다.

결론적으로 본 연구에서 새로 제안한 New4 식(15)는 지수를 고정한 HM4 식(5)보다는 우수하고, 지수를 최적화한 HM4^{opt} 식과는 성능 면에서 대등하다고 볼 수 있다. HM4^{opt} 식의 경우에는 냉매에 따라서 지수를 최적화해야 하는 단점이 있다.

3.2 매개변수가 3 개인 상관식의 성능비교

무한급수인 식(4)의 우변에서 포화액체밀도를 나타내는데 영향력이 크다고 생각되는 항들을 선택하여 3개 항으로 표현하면 다음의 식을 얻는다(이하 HM3 식, 지수를 냉매에 따라 최적화한 식을 HM3^{opt}이라 약함).

$$\rho_r - 1 = a_1 \theta^{k_1} + a_2 \theta^{k_2} + a_3 \theta^{k_3} \quad (20)$$

그리고 Iglisias-Silva-Hall 식(8)의 경우에는 변수 A_1, A_2, A_3 를 모두 각각의 냉매에 따라 최적화함으로써 매개변수가 3 개인 보다 정확한 상관식을 얻을 수 있다(이하 ISH3 식으로 약함). HM3 식(20) 및 ISH3 식과 New3 식(16)의 성능을 비교하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

각각의 냉매에 대해 살펴보면 R-125, R-134a, R-152a, R-143a, R-718, R-744, R-704, R-728, R-740의 경우 New3 식(16)이 나머지 13 개 냉매에 대해서는 HM3^{opt} 식(20)이 가장 좋게 나타났다. 전반적으로 본 연구에서 제안한 New3 식(16)은 22 개 냉매에 대해 0.04%의 AAD로 ASHRAE 상태량표⁽⁵⁾의 데이터를 재현하여 0.09%의 HM3 식(20)과 ISH3 식(0.08%)보다 성능 면에서 우수하다고 볼 수 있다. 지수를 최적화한 HM3^{opt} 식의 경우 0.02%의 AAD를 나타내어 New3 식(16)보다 좋지만 그 차이는 미미하고, 냉매에 따라 각 항의 지수를 최적화해야 하는 단점이 있다.

3.3 매개변수가 2 개인 상관식의 성능비교

본 연구에서 제안하는 New3 식(16)의 최적지수와 최적계수를 구해 본 결과에 의하면 물질에 따라 n 은 0.300 ~ 0.336 사이의 값을 나타냈으며, $n=0.32$ 로 가정하여도 성능 면에서 충분하다고 판단하였다. 이렇게 할 경우 변수의 개수가 적어 상대적으로 형태가 간단해지고, 계수가 선형이므로 구조상 간단한 다음 형태의 포화액체밀도 상관식을 얻을 수 있다(이하 New2 식으로 약함).

$$\ln(\rho_r/\sqrt{T_r}) = a\tau^{0.32} + b\tau \quad (21)$$

본 연구에서는 현존하는 매개변수가 2 개인 CGB 식(11)과 선형계수로 이루어진 새로 제안한 New2 식(21)의 성능을 비교하였다. 비선형 변수 상관식인 CGB 식(11)의 경우에 최적화의 대상은 제공된 평균 제공편차(RMS)값이다. 선형 변수 상관식인 New2 식(21)의 경우에는 최소자승법(least squares method)을 이용하여 선형계수들을 구했다. 총 22 개 냉매에 대해 최적화한 상관식을 이용하여 구해지는 평균 절대편차(AAD)를 Table 2에 나타내었다.

각각의 냉매에 대한 상관식의 성능을 비교하면 R-22, R-718, R-170, R-290, R-600, R-1150,

R-1270, R-704에 대하여는 New2 식(21)이 나머지 14개 냉매에 대하여는 CGB 식(11)이 좋게 나타났다. 전반적인 성능을 비교하면 New2 식(21)이 22 개 냉매에 대하여 0.16%의 평균 절대편차(AAD)로 ASHRAE 상태량표⁽⁵⁾를 재현하고 있어 0.18%의 CGB 식(11)보다 약간 우수하다고 볼 수 있다. 또한 New2 식(21)은 변수가 선형이므로 CGB 식(11)보다 구조상으로 간단하다는 장점이 있다.

3.4 매개변수가 1 개인 상관식의 성능비교

1 개의 매개변수를 가지고 있는 비교적 간단한 형태의 포화액체밀도 상관식의 성능을 비교하였다. Rackett⁽²⁾ 식을 수정하여 성능을 높인 MR 식(7)과 ISH1 식(8)을 이용하여 계산되는 평균 절대편차를 Table 2에 나타내었다.

각각의 냉매에 대해 살펴보면 R-22, R-125, R-134a, R-143a, R-245fa, R-744, R-170, R-290, R-600a, R-1150, R-740은 MR 식(7)이 나머지 11 개 냉매에 대해서는 ISH1 식(8)이 성능 면에서 좋게 나타났다. 전반적으로는 ISH1 식(8)이 0.38%의 AAD로 ASHRAE 상태량표의 데이터를 재현하여 0.49%의 MR 식(7)보다 우수하다. 하지만 ISH1 식(8)은 그 형태가 MR 식(7)보다 매우 복잡하다는 단점이 있다.

지금까지 살펴본 바에 의하면 변수의 개수가 증가할수록 상관식의 정확도는 높아지는 것을 확인할 수 있지만 그 식의 형태가 매우 복잡해지는 것이 단점으로 지적된다.

4. 결론

순수 물질 냉매의 포화액체밀도를 계산하기 위한 기존의 상관식들을 검토하고, 새로운 형태의 상관식을 제안하였다. 총 22 개 냉매에 대하여 일부 상관식들의 성능을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제안한 매개변수가 4 개인 상관식의 경우에 0.03%의 AAD로 ASHRAE 상태량표를 재현하여 기존의 지수를 고정된 Hou-Martin 식(0.04%)보다 우수하고, 지수를 최적화한 Hou-Martin 식(0.02%)과는 성능 면에서 대등하다고 볼 수 있다.

(2) 매개변수를 3 개로 할 경우에 새로운 상관식은 0.04%의 AAD로 상태량표의 데이터를 재현하여 지수를 고정한 Hou-Martin 식(0.09%)과 Iglesias-Silva-Hall 식(0.08%)보다 우수하다. 지수를 최적화한 Hou-Martin 식(0.03%)은 성능 면에서 가장 좋게 나타났지만, 그 차이가 미미하고 냉매에 따라 지수를 최적화해야 한다는 단점이 있다.

(3) 매개변수가 2 개인 경우에도 새로 제안한 상관식이 0.16%의 AAD로 상태량표의 데이터를 재현하여 최근에 발표된 Chouaieb-Ghazouani-Bellagi 식(0.18%)보다 성능 면에서 우수하거나 동등하다고 볼 수 있다. 새로운 상관식은 구조적으로 간단하고 선형계수를 가지고 있다는 장점이 있다.

(4) 변수의 개수가 1 개인 가장 간단한 경우에는 Iglesias-Silva-Hall 식(0.38%)이 수정 Rackett 식(0.49%)보다 성능 면에서 우수하게 나타났지만 그 형태가 대단히 복잡하다는 것이 단점이다.

참고문헌

1. Hou, Y.Y. and Martin, J.J., 1959, Physical and thermodynamic properties of trifluoromethane, *AIChE J.*, Vol. 5, No. 1, pp. 125-129.
2. Rackett, H.G., 1970, Equation of state for saturated liquids, *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 15, No. 4, pp. 514-517.
3. Spencer, C.F. and Danner, R.P., 1972, Improved equation for prediction of saturated liquid density, *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 17, No. 2, pp. 236-241.
4. Iglesias-Silva, G.A. and Hall, K.R., 1997, A saturated liquid density equation for Refrigerants, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 131, pp. 97-105.
5. ASHRAE, 2001, *ASHRAE Handbook, Fundamentals Volume*, Chap. 20, ASHRAE, Atlanta, GA.
6. Guggenheim, E.A., 1945, The principle of corresponding states, *J. Chem. Phys.*, Vol. 13, No. 7, pp. 253-261.
7. Nasrifar, Kh., Ayatollahi, Sh. and Moshfeghian, M., 1999, An extended saturated liquid density equation, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 166, pp. 163-181.
8. Chouaieb, O., Ghazouani, J. and Bellagi, A., 2004, Simple correlations for saturated liquid and vapor densities of pure fluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 424, pp. 43-51.
9. Park, K.K., 1998, A new type of saturated vapor density correlation for refrigerants, *Korean Journal of the Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 550-557.