

이소부탄(R600a)의 열물리적성질

남혁, 홍창섭

위대한 수령 김일성 동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《랭동기생산을 늘이는것은 공업을 발전시키는데서 매우 중요한 자리를 차지합니다. 공업이 발전하면 할수록 랭동기에 대한 수요는 더 늘어납니다.》(《김일성전집》 제60권 224페이지)

지금까지 선박공업과 랭동공업에서는 랭매로 R12와 R22 등을 많이 리용하였다. 그러나 염소를 포함한 랭매들은 오존층을 파괴하며 기타 프레온가스들은 지구온난화에 영향을 미치게 된다.

따라서 세계적으로 이러한 물질을 대용하는 랭매들이 연구개발되고있다.

포화탄화수소랭매인 이소부탄(R600a)은 환경에 영향을 주지 않으면서 랭동효과를 얻으므로 현재 소형랭동기와 바다물을 담수로 만드는 장치에 널리 리용되고있다.

프레온랭매대신 이소부탄을 리용하는데서 그것의 열물리적성질에 대한 믿음성있는 자료들이 요구되고있지만 실험자료들만 일부 발표[3]되어있고 비오존파괴랭매 R134a처럼 연구자료들이 충분하지 못하다.

이소부탄의 실험자료들은 여러 선행연구들에 발표되어있지만 랭매의 작업구간에서 전부 얻어내지 못하였으며 특히 실험값들이 매 온도 및 압력조건에서 8~10개 정도밖에 소개되지 못하였다. 포화탄화수소랭매의 열물리적특성을 결정하기 위한 일반식들이 여러가지 수학적방법으로 소개되어있다.[1, 2]

우리는 선행연구에서 측정한 이소부탄의 실험자료에 기초하여 밀도, 비열, 동력학적 점성계수와 열전도계수 등 열물리적특성량을 결정하기 위한 문제를 고찰하였다.

1. 이소부탄의 밀도와 비열

선행연구에서 제기한 높은 온도구역에 해당하는 밀도의 온도의존식[1]에서 6개의 결수들을 실험값으로부터 결정하였다. 결수값들을 식에 넣어 이소부탄의 포화선상에 해당하는 액체밀도와 온도사이관계를 끌어내면 다음과 같다.

$$\rho' = \rho_{cr} \exp[1.454 \cdot 8(1-\tau)^{1/3} + 0.25\psi(\tau)] \quad (1)$$

여기서 $\psi(\tau) = (\tau - 1)0.2(\tau + 1)^2 + 0.5$, $\tau = \frac{T}{T_{cr}}$ 이다.

건포화 및 과열증기구역에서 기체의 밀도식은 다음과 같다.[2]

$$\rho'' = \frac{1}{v} \quad (2)$$

여기서 $v = \frac{RT}{3P} + A(T, P) + B(T, P)$ 이다.

$$A(T, P) = \left[\frac{X}{2} + \left(\frac{X^2}{4} + \frac{Y^3}{27} \right)^{0.5} \right]^{1/3}$$

$$B(T, P) = \left[\frac{X}{2} - \left(\frac{X^2}{4} + \frac{Y^3}{27} \right)^{0.5} \right]^{1/3}$$

$$X = a_1 \left(\frac{T}{P} \right)^3 + \left(\frac{a_2}{T} + a_3 T^2 + a_4 T \right) \frac{1}{3P^2} + \left(\frac{a_5}{T^2} + a_6 + a_7 \right) \frac{1}{P}$$

$$Y = \left(b_1 + b_2 T + \frac{b_3}{T_3} \right) \frac{1}{P} + b_4 \left(\frac{T}{P} \right)^2$$

여기서 이소부탄의 경우에

$$a_1 = \frac{2}{27} R^3, \quad a_2 = -2.526 \ 58 \cdot 10^7 R, \quad a_3 = 2.371 \ 448 \cdot 10^{-5}, \quad a_4 = -304.180 \ 7R,$$

$$a_5 = 1.465 \ 876 \cdot 10^{-5}, \quad a_6 = 1.261 \ 45 \cdot 10^{-5} R, \quad a_7 = -9 \ 930 \ 86 \cdot 10^{-1},$$

$$b_1 = 304.180 \ 7, \quad b_2 = -2.371 \ 448 \cdot 10^{-5} R, \quad b_3 = 2.526 \ 584 \cdot 10^7, \quad b_4 = -\frac{1}{3} R^2$$

이라는것을 실험적으로 구하였다.

-50~+10°C구간에서 포화액체의 비열은 다음과 같다.

$$c'_x = c_0 + c_1 T_x + c_2 T_x^2 \quad (3-1)$$

+10~+100°C구간에서 포화액체의 비열은 다음과 같다.

$$c'_x = c_3 + c_4 T_x + c_5 T_x^2 + c_6 T_x^3 + c_7 T_x^4 \quad (3-2)$$

여기서 이소부탄의 경우에 실험적으로 결수들을 구하면

$$c_0 = 2.282, \quad c_1 = 4.675 \cdot 10^{-3}, \quad c_2 = -2.625 \cdot 10^{-5}, \quad c_3 = 2.468 \ 1,$$

$$c_4 = -6.482 \ 6 \cdot 10^{-4}, \quad c_5 = 5.985 \cdot 10^{-5}, \quad c_6 = -9.558 \ 1 \cdot 10^{-6}, \quad c_7 = 4.381 \ 2 \cdot 10^{-8}.$$

식 (3-1)에서 $T_x = T - 223$, 식 (3-2)에서 $T_x = T - 283$ 이다.

건포화 및 과열증기구역에서 등적비열은 다음과 같이 결정한다.

$$c_v = c_v^{\text{리}} + \Delta c_v \quad (4)$$

여기서 $c_v^{\text{리}}$ 는 이상가스의 등적비열이며 Δc_v 는 실제가스의 성질을 고려한 수정항이다.

$$c_v^{\text{리}} = 3.609 \ 87 - 7.822 \ 1\tau + 8.873\tau^2 - 3.736\tau^3 + 1.225 \ 5\tau^4 \quad (5)$$

$$\Delta c_v = -T \int_0^v \left(\frac{\partial^2 P}{\partial T} \right) \partial v \quad (6)$$

식 (2)를 변환하고 식 (5)에 대입하여 Δc_v 를 결정한다.

실제가스의 등압비열은 열력학적미분방정식에 의하여 결정한다.

$$c_p = c_v - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)^2 \bigg/ \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right) \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에 있는 미분식들은 R600a의 비리알상태방정식(베네찌가-메브-루비나식)에 의해 결정한다.

$$P = \frac{RT}{v} + \frac{1}{v^2} \left\{ RT \left(B_0 + \frac{B_1}{v} \right) - \left(B_2 + \frac{B_3}{v} - \frac{B_3 \cdot B_4}{v^4} \right) - \frac{1}{T^2} \left[B_5 - \frac{B_6}{v} \left(1 + \frac{B_7}{v^2} \right) e^{-B_7/v^2} \right] \right\}$$

여기서 이소부탄의 경우에 실험적으로 결수들을 구하면

$$\begin{aligned} B_0 &= 2.371 \ 45 \cdot 10^{-3}, \ B_1 = 1.261 \ 45 \cdot 10^{-5}, \ B_2 = 301.181, \\ B_3 &= 0.993 \ 1, \ B_4 = 5 \cdot 10^{-9}, \ B_5 = 2.526 \ 58 \cdot 10^7, \\ B_6 &= 1.465 \ 876 \cdot 10^3, \ B_7 = 1.726 \ 4 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

2. 이소부탄의 동력학적점성결수와 열전도결수

대기압(0.1MPa)과 림제온도에서 동력학적점성결수는 다음과 같다.[2]

$$\ln(\eta_{\text{bar}}^{\text{cr}} \cdot 10^6) = -13.5 + \ln(P_{\text{cr}}^{2/3} R^{-1/2} T_{\text{cr}}^{-1/6}) \quad (8)$$

$$\ln \eta_{\text{cr}} = \ln \eta_{\text{bar}}^{\text{cr}} + D_{\eta} + \Delta_{\eta} \quad (9)$$

여기서 $D_{\eta} = 0.9$, $\Delta_{\eta} = 0$ 이다.

대기압(0.1MPa)과 림제온도에서 열전도결수는 다음과 같다.[2]

$$\ln \lambda_{\text{bar}}^{\text{cr}} = -6.35 + \ln(P_{\text{cr}}^{2/3} R^{-1/2} T_{\text{cr}}^{-1/6}) + 0.91 \ln(c_v^{\text{cr}} / R) \quad (10)$$

림제점에서는 $\tau = T/T_{\text{cr}} = 1$ 이며 식 (4)에 의하면 $c_v^{\text{cr}} = 2.146 \ 7 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 이다.

$$\begin{aligned} \ln \frac{c_v^0}{R} &= \ln \frac{2.146 \ 7}{143.05} = -4.199 \ 262 \\ \ln \eta_{\text{cr}} &= \ln \eta_{\text{bar}}^{\text{cr}} + 0.28 D_{\eta} + \Delta_{\eta} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $D_{\eta} = 1.79$, $\Delta_{\eta} = 0.1$ 이다.

표준(0°C, 0.1MPa)조건에서 동력학적점성결수와 열전도결수는 다음과 같다.[2]

$$\eta_{\text{nor}} = \eta_{\text{bar}}^{\text{cr}} \exp[D_{\eta} \cdot \theta(r)] \quad (12)$$

$$\lambda_{\text{nor}} = \lambda_{\text{bar}}^{\text{cr}} \exp[D_{\lambda} \cdot \theta(\tau)] \quad (13)$$

여기서 $\theta(\tau)$ 는 무차원온도결수이다.

$$\theta(\tau) = \ln \tau + A \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right)^2 \left(\frac{\tau - 1}{\tau} - \ln \tau \right) \left[1 - B \left(\frac{\tau - 1}{\tau} \right)^4 \right] \quad (14)$$

여기서 실험값들로부터 구한 결수들의 값은 $A = 0.5$, $B = 0.1$ 이다.

포화선상에서 액상의 동력학적점성결수는 다음과 같다.[2]

$$\eta' = \eta_{\text{cr}} \exp\{p_{\eta}' \theta(\tau) + q_{\eta}' [\theta(\tau)]^{1/3}\} \quad (15)$$

여기서 $p_{\eta}' = -1.8$, $q_{\eta}' = -2.0$ 이다.

건포화선상에서 동력학적점성결수는 다음과 같다.[2]

$$\eta'' = \eta_{\text{cr}} \exp\{p_{\eta}'' \theta(\tau) + q_{\eta}'' [\theta(\tau)]^{1/3}\} \quad (16)$$

여기서 $p_{\eta}'' = 0$, $q_{\eta}'' = 2.0$ 이다.[2]

포화선상에서 열전도결수는 다음과 같다.

$$\lambda' = \lambda_{cr} \exp\{p'_\lambda \theta(\tau) + q'_\lambda [\theta(\tau)]^{1/3}\} \quad (17)$$

여기서 $p'_\lambda = 0$, $q'_\lambda = -1.04$ 이다.

건포화선상에서 열전도계수는 다음과 같다.

$$\lambda'' = \lambda_{cr} \exp\{p''_\eta \theta(\tau) + q''_\eta [\theta(\tau)]^{1/3}\} \quad (18)$$

여기서 $p''_\eta = 1.24$, $q''_\eta = 1.04$ 이다.[2]

과열증기구역에서 동력학적점성계수와 열전도계수는 다음의 식으로 결정한다.[2]

$$\eta = \eta_{nor} + a_\eta \left[\exp\left(b_\eta \frac{\rho}{\rho_{cr}}\right) - d_\eta \right] (\eta_{cr} - \eta_{bar}^{cr}) \quad (19)$$

밀도비 ρ/ρ_{cr} 가 0.1~0.3에서는 $a_\eta = 0.4$, $b_\eta = 1.584$, $d_\eta = 1.00$ 이다.

$$\lambda = \lambda_{nor} + a_\eta \left[\exp\left(b_\eta \frac{\rho}{\rho_{cr}}\right) - d_\eta \right] (\eta_{cr} - \eta_{bar}^{cr}) \quad (20)$$

밀도비 ρ/ρ_{cr} 가 0.0~0.5에서 $a_\eta = 1.26$, $b_\eta = 0.535$, $d_\eta = 1.00$ 이다.

다음으로 위의 식들로부터 여러가지 조건에서 이소부탄의 동력학적점성계수와 열전도계수에 대한 값들을 계산하였다.

림계조건과 표준조건에서 열물리적특성자료들은 표 1과 같다.

표 1. 열물리적방정식들의 파라메터

대기압 (9), (11)		림계점 (10), (12)		표준조건 (10), (12)	
$\eta_{bar}^{cr} / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\ln \lambda_{bar}^{cr} / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\eta_{cr} / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\ln \lambda_{cr} / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\eta_{nor} / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\ln \lambda_{nor} / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
10.109	2.82	24.864	5.145	6.987 73	1.353

표준조건과 포화선상 및 과열증기구역에서의 동력학적점성계수와 열전도계수를 계산한 결과는 표 2, 3과 같다.

표 2. 포화선상에서 동력학적점성 및 열전도계수

$T/^\circ\text{C}$	$\theta(\tau)$	$\eta' / (\cdot 10^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta'' / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda' / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda'' / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
-20	-0.499 8	2.989	5.085	0.117 4	1.212 8
0	-0.410 3	2.300	5.625	0.111 4	1.4228 3
20	-0.333 2	1.812	6.215	0.105 8	0.653 1
40	-0.264 3	1.444	6.889	0.100 3	1.901 9
60	-0.201 2	1.153	7.701	0.094 6	2.199 6

표 3. 과열증기구역에서 동력학적점성 및 열전도계수

$T/^\circ\text{C}$	$\frac{\rho}{\rho_{cr}} \cdot 10^2$	$\eta_{nor} / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\eta / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$\lambda_{nor} / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
-20	9.004 4	6.452 8	6.538	1.152 7	1.163 8
0	18.380 7	6.987 7	7.162	1.353 0	1.381 0
20	34.079 0	7.489 8	7.817	1.553 2	1.605 4
40	58.944 9	7.967 0	8.488	1.757 1	1.847 9
60	97.125 1	8.434 6	9.416	1.967 2	2.118 4

우의 자료들에 대한 오차를 계산하면 표 4, 5와 같다.

표 4. 표준조건에서 오차평가

$\eta_{\text{nor}} / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$			$\lambda / (\cdot 10^2 \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$		
계산값	실험값	상대오차/%	계산값	실험값	상대오차/%
6.988 7	6.97	0.25	1.353	1.349	0.2

표 5. 포화선상 및 과열증기구역에서의 오차평가

$T/^\circ\text{C}$	$\eta' / (\cdot 10^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		상대오차/%	$\eta / (\cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		상대오차/%
	계산값	실험값		계산값	실험값	
20	1.812	1.804	0.44	7.817	7.865	0.61
40	1.444	1.442	0.14	8.488	8.493	0.06
60	1.153	1.157	0.35	9.416	9.424	0.08
평균	—	—	0.31	—	—	0.25

맺는말

림계점에서 열물리적특성량을 계산하고 그에 기초하여 경험결수들을 리용한 식 (12)–(20)에서 이소부탄에 해당하는 결수들을 결정하였다. 표준조건과 포화증기구역에서 오차를 판정한 결과 평균상대오차가 0.5%이하였다.

참고문헌

- [1] A. B. Баранено и др.; Холодильные машины, Политехника, 36~87, 2006.
- [2] R. K. Rajput; Refrigeration and Air-Conditioning, S. K. Kataria, 115~145, 2007.
- [3] M. S. Sattar; International of Aerospace and Mechanical Engineering, 25, 50, 2007.

주체103(2014)년 5월 5일 원고접수

Thermophysical Characteristics of Isobutane (R600a)

Nam Hyok, Hong Chang Sop

Thermophysical parameters of isobutane (R600a) have been decided and experimental approximating expressions newly formed.

And errors have been checked over the normal condition and the range of saturated vapor, as a result, the relative average error is less than 0.5%.

Key words: isobutane, R600a, saturated vapor range, experimental approximating expression