부록 : ES_StableIF97 에서 사용된 IAPWS-IF97 공식들

A.1 IAPWS-IF97

ES_StableIF97 프로그램은 IAPWS-IF97 공식에 따라 작성되었습니다.

IAPWS-IF97 은 "IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam"의 약자이며, IAPWS 은 국제적인 비영리 국가간 단체로 "The International Association for the Properties of Water and Steam"의 약자입니다. IAPWS 와 IAPWS-IF97 에 대한 자세한 사항은 IAPWS 의 웹 사이트 "http://www.iapws.org" 을 참조하시기 바랍니다.

IAPWS 에서는 IAPWS-IF97 과 관련하여 여러 문서를 발간하였는데, 그 가운데 IAPWS-IF97 의 근간이 되는 문서는 아래 IAPWS-IF97 문서 목록 가운데 첫 번째 문서인 "IAPWS-IF97"이라는 약자로 표시된 문서입니다. 동 문서에는 모든 기본 공식(Basic Equation)이 포함되어 있으며, 아울러 구역 1 과 구역 2 의 역 공식(Backward Equation)과, 구역 2 의 준 안정(Metastable) 증기에 대한 공식도 수록되어 있습니다.

아래 문서 목록 가운데 두 번째 및 세 번째, 네 번째 문서인 "IAPWS-IF97-01" 및 "IAPWS-IF97-03", "IAPWS-IF97-04" 약자로 표시된 문서들은 "IAPWS-IF97" 문서의 보충 문서로서, 구역 1, 2, 3, 4 의 역 공식들을 포함하고 있습니다

그리고 다섯 번째 및 여섯 번째 문서인 "IAPWS-IF97-Vis" 및 "IAPWS-IF97-ThCond"는 IAPWS-IF97 문서의 일부라기 보다는 IAPWS 의 별도의 문서로서 각각 절대 점도(Dynamic Viscosity)와 열 전도도(Thermal Conductivity)에 대한 공식이 수록되어 있습니다.

A.2 ES_StableIF97 에서 사용된 IAPWS-IF97 문서 목록

ES_StableIF97 프로그램은 IAPWS 의 아래 문서들의 공식을 사용하여 작성되었습니다.

이후의 설명에서 이들 문서를 참조할 때 약자를 사용하여 참조됩니다.

약자	문서 제목	공식
IAPWS-IF97	"Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", authorized by IAPWS at its meeting in Lucerne, Switzerland, August 2007.	✓ 모든 기본 공식 ✓ 구역 1 과 2 의 T(p,h) 및 T(p,s) 역 공식 ✓ 구역 2 의 준 안정 증기 공식
IAPWS-IF97-01	"Supplementary Release on Backward Equations for Pressure as a Function of Enthalpy and Entropy p(h,s) to the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", authorized by IAPWS at its meeting in Gaithersburg, Maryland, USA, September 2001.	✓ 구역 1 과 2 의 p(h,s) 역 공식
IAPWS-IF97-03	"Revised Supplementary Release on Backward Equations for the Functions T(p,h), v(p,h) and T(p,s), v(p,s) for Region 3 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", authorized by IAPWS at its meeting in Kyoto, Japan, September 2004.	✓ 구역 3 의 T(p,h) 및 v(p,h), T(p,s), v(p,s) 역 공식 ✓ 구역 3 의 포화선에 대한 psat(h) 및 psat(s)의 역 공식

약자	문서 제목	공식
IAPWS-IF97-04 *	"Supplementary Release on Backward Equations p(h,s) for Region 3, Equations as a Function of h and s for the Region Boundaries, and an Equation Tsat(h,s) for Region 4 of the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", authorized by IAPWS at its meeting in Kyoto, Japan, September 2004.	✓ 구역 3 의 p(h,s) 및 T(h,s), v(h,s)의 역 공식 ✓ 엔탈피와 엔트로피가 주어진 경우의 구역 경계선의 공식들 ✓ 2 상(Two-Phase) 구역의 Tsat(h,s) 및 psat(h,s), x(h,s)의 역 공식
IAPWS-IF97-Vis *	"Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance", authorized by IAPWS at its meeting in Berlin, Germany, September 2008.	✓ 온도와 밀도가 주어진 경우의 절대 점도 공식
IAPWS-IF97-ThCond *	"Revised Release on the IAPWS Formulation 1985 for the Thermal Conductivity of Ordinary Water Substance", authorized by IAPWS at its meeting in Berlin, Germany, September 2008.	✓ 온도와 밀도가 주어진 경우의 열 전도도 공식

* : 참조의 편리를 위하여 ENGSoft 가 임의로 붙인 약자입니다.

A.3 IAPWS-IF97 의 구역(Region) 구분

IAPWS-IF97 은 온도와 압력 범위 별로 아래와 같이 5 개의 구역으로 구분하여 공식을 제공합니다.

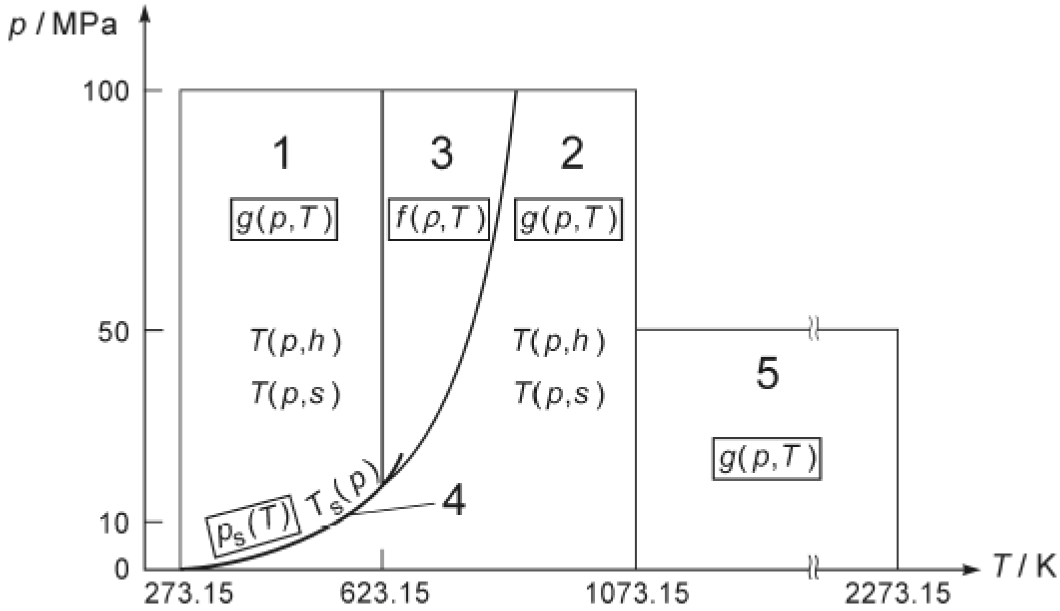

Fig. 1. Regions and equations of IAPWS-IF97.

구역 1 : 온도 623.15 K 이하의 과냉 액체 구역 (최대 압력 100 MPa)

구역 2 : 온도 1073.15 K 이하의 과열 증기 구역 (최대 압력 100 MPa)

구역 3 : 구역 1 과 구역 2 사이의 과냉 액체 및 과열 증기 구역 (최대 압력 100 MPa)

구역 4 : 포화 구역

구역 5 : 온도 1073.15 K 와 2273.15 K 사이의 과열 증기 구역 (최대 압력 50 MPa)

A.4 IAPWS-IF97 의 상수들

IAPWS-IF97 은 일반 물의 기준 상수 값들을 아래와 같이 규정하고 있습니다.

- 가스 상수 (Specific gas constant) : R = 0.461526 kJ/kg/K

- 임계점 (Critical point parameters) : Tc = 647.096 K, Pc = 22.064 MPa, Density_c = 322 kg/m3

- 삼중점 (Triple point parameter) : Tt = 273.16 K, Pt = 611.657 Pa, Ht = 0.611783 J/kg, St = 0, Ut = 0

임계점은 포화선의 끝 점입니다.

삼중점은 포화수의 내부에너지(Ut)와 엔트로피(St) 값이 0 이 되는 점입니다.

ES_StableIF97 의 최저 압력은, 온도 273.15 K 에서의 포화 압력인 611.213 Pa 을 사용합니다.

기술된 내용 가운데 그림이나, 공식, 표들은, 위에 기술된 IAPWS-IF97 문서들의 PDF 파일에서 화면 갈무리로 복사해온 것입니다.

IAPWS-IF97 문서 서두에 보면 동 문서의 일부분 혹은 전체에 대한 출판이 모든 국가에서 허용된다는 문구가 있습니다. 단, 모든 권한이 IAPWS 에 있음을 표시하는 조건하에서 입니다.

이와 같은 정신에 따라, ENGSoft 는 아래 설명에서 사용된 그림이나 공식, 표들은 그 저작권이 IAPWS 에 있음을 확인합니다.

A.5 IAPWS-IF97 문서에서 사용되는 약어 목록

열역학적 성질 약어

c_p	Specific isobaric heat capacity
c_v	Specific isochoric heat capacity
f	Specific Helmholtz free energy
g	Specific Gibbs free energy
h	Specific enthalpy
M	Molar mass
p	Pressure
R	Specific gas constant
R_m	Molar gas constant
s	Specific entropy
T	Absolute temperature [a]
u	Specific internal energy
v	Specific volume
w	Speed of sound
x	General quantity
β	Transformed pressure, Eq. (29a)
γ	Dimensionless Gibbs free energy, $\gamma = g/(RT)$
δ	Reduced density, $\delta = \rho/\rho^*$
Δ	Difference in any quantity
η	Reduced enthalpy, $\eta = h/h^*$
θ	Reduced temperature, $\theta = T/T^*$
ϑ	Transformed temperature, Eq. (29b)
π	Reduced pressure, $\pi = p/p^*$
ρ	Mass density
σ	Reduced entropy, $\sigma = s/s^*$
τ	Inverse reduced temperature, $\tau = T^*/T$
ϕ	Dimensionless Helmholtz free energy, $\phi = f/(RT)$

위 첨자

o	Ideal-gas part
r	Residual part
*	Reducing quantity
′	Saturated liquid state
″	Saturated vapor state

아래 첨자

c	Critical point
max	Maximum value
RMS	Root-mean-square value
s	Saturation state
t	Triple point
tol	Tolerance of a quantity

A.6 "IAPWS-IF97"의 기본 공식(Basic Equation)과 역 공식(Backward Equation)

IAPWS-IF97 에서 제공되는 공식에는 기본 공식과 역 공식이 있습니다.

기본 공식은 말 그대로 물과 증기 성질을 나타내는 원래의 공식입니다. 구역 1, 2, 5 의 기본 공식 독립 변수는 온도와 압력이며, 구역 3 의 기본 공식 독립 변수는 온도와 밀도입니다. 구역 4 의 기본 공식 독립 변수는 온도입니다.

만일, 구하고자 하는 성질의 독립 변수가 기본 공식의 독립 변수와 다를 때, 기본 공식을 사용해서 값을 구하려면 시행 착오 법에 의한 반복 계산으로 구해야 합니다.

예를 들어 압력과 엔탈피 값이 주어진 상태에서 구역 1 의 비체적 값을 구하려면, 온도와 압력이 독립 변수인 구역 1 의 기본 공식에 주어진 압력 값과 임의의 온도 값을 반복적으로 입력하여 계산된 엔탈피 값이, 주어진 엔탈피 값과 같아지는 온도 값을 찾은 후에, 주어진 압력 값과 찾은 온도 값을 가지고, 구역 1 의 비체적을 구하는 기본 공식에 입력해 원하는 비체적 값을 구해야 합니다.

기본 공식을 사용한 이러한 시행 착오 법에 의한 계산은 시간이 많이 걸리므로, IAPWS 에서는 시간을 단축하기 위해 구역 1 에서 압력과 엔탈피를 가지고 온도를 계산할 수 있는 공식을 제공하는데 이러한 공식을 역 공식이라고 합니다. 역 공식의 계산 결과는 기본 공식의 계산 결과와 정확히 같을 수는 없으나, IAPWS 에서 규정한 일정 오차 범위 내에서 일치합니다.

A.7 "IAPWS-IF97"의 기본 공식

구역 1 기본 공식

구역 1 의 기본 공식은 깁스 자유에너지(Gibbs Free Energy) g 의 함수이며, IAPWS-IF97 원문의 공식은 아래와 같습니다.

The basic equation for this region is a fundamental equation for the specific Gibbs free energy g. This equation is expressed in dimensionless form, $\gamma = g/(RT)$, and reads

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma(\pi,\tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1-\pi)^{I_i} (\tau - 1.222)^{J_i}, \qquad (7)$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with $p^* = 16.53$ MPa and $T^* = 1386$ K ; R is given by Eq. (1). The coefficients n_i and exponents I_i and J_i of Eq. (7) are listed in Table 2.

위의 공식 (7)을 살펴 보면 깁스 자유에너지는 압력과 온도의 함수입니다. 이를 압력과 온도의 무 차원 수인, 파이(π)와 타우(τ)에 대한 함수로 변형한, 무 차원 깁스 자유에너지 함수, 즉 감마(γ) 함수로 변형한 것입니다.

압력의 무차원 독립 변수 파이(π)의 기준 압력은 16.53 MPa 이며, 온도의 무차원 독립 변수 타우(τ)의 기준 온도는 1386 oK 입니다.

공식 (7)의 계수 값들은 아래 Table 2 와 같습니다.

Table 2. Numerical values of the coefficients and exponents of the dimensionless Gibbs free energy for region 1, Eq. (7)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	0	−2	0.146 329 712 131 67	18	2	3	$-0.441\,418\,453\,308\,46 \times 10^{-5}$
2	0	−1	−0.845 481 871 691 14	19	2	17	$-0.726\,949\,962\,975\,94 \times 10^{-15}$
3	0	0	$-0.375\,636\,036\,720\,40 \times 10^{1}$	20	3	−4	$-0.316\,796\,448\,450\,54 \times 10^{-4}$
4	0	1	$0.338\,551\,691\,683\,85 \times 10^{1}$	21	3	0	$-0.282\,707\,979\,853\,12 \times 10^{-5}$
5	0	2	−0.957 919 633 878 72	22	3	6	$-0.852\,051\,281\,201\,03 \times 10^{-9}$
6	0	3	0.157 720 385 132 28	23	4	−5	$-0.224\,252\,819\,080\,00 \times 10^{-5}$
7	0	4	$-0.166\,164\,171\,995\,01 \times 10^{-1}$	24	4	−2	$-0.651\,712\,228\,956\,01 \times 10^{-6}$
8	0	5	$0.812\,146\,299\,835\,68 \times 10^{-3}$	25	4	10	$-0.143\,417\,299\,379\,24 \times 10^{-12}$
9	1	−9	$0.283\,190\,801\,238\,04 \times 10^{-3}$	26	5	−8	$-0.405\,169\,968\,601\,17 \times 10^{-6}$
10	1	−7	$-0.607\,063\,015\,658\,74 \times 10^{-3}$	27	8	−11	$-0.127\,343\,017\,416\,41 \times 10^{-8}$
11	1	−1	$-0.189\,900\,682\,184\,19 \times 10^{-1}$	28	8	−6	$-0.174\,248\,712\,306\,34 \times 10^{-9}$
12	1	0	$-0.325\,297\,487\,705\,05 \times 10^{-1}$	29	21	−29	$-0.687\,621\,312\,955\,31 \times 10^{-18}$
13	1	1	$-0.218\,417\,171\,754\,14 \times 10^{-1}$	30	23	−31	$0.144\,783\,078\,285\,21 \times 10^{-19}$
14	1	3	$-0.528\,383\,579\,699\,30 \times 10^{-4}$	31	29	−38	$0.263\,357\,816\,627\,95 \times 10^{-22}$
15	2	−3	$-0.471\,843\,210\,732\,67 \times 10^{-3}$	32	30	−39	$-0.119\,476\,226\,400\,71 \times 10^{-22}$
16	2	0	$-0.300\,017\,807\,930\,26 \times 10^{-3}$	33	31	−40	$0.182\,280\,945\,814\,04 \times 10^{-23}$
17	2	1	$0.476\,613\,939\,069\,87 \times 10^{-4}$	34	32	−41	$-0.935\,370\,872\,924\,58 \times 10^{-25}$

구역 1 의 다른 모든 성질 값들은 공식 (7)과 그 편 미분 식들의 조합으로 구할 수 있습니다. 주어지는 값인 압력과 온도를 제외한 다른 성질 값들의 계산 공식은 아래 Table 3 과 같습니다.

Table 3. Relations of thermodynamic properties to the dimensionless Gibbs free energy γ and its derivatives [a] when using Eq. (7)

Property	Relation
Specific volume $v = (\partial g/\partial p)_T$	$v(\pi,\tau)\dfrac{p}{RT} = \pi\gamma_\pi$
Specific internal energy $u = g - T(\partial g/\partial T)_p - p(\partial g/\partial p)_T$	$\dfrac{u(\pi,\tau)}{RT} = \tau\gamma_\tau - \pi\gamma_\pi$
Specific entropy $s = -(\partial g/\partial T)_p$	$\dfrac{s(\pi,\tau)}{R} = \tau\gamma_\tau - \gamma$
Specific enthalpy $h = g - T(\partial g/\partial T)_p$	$\dfrac{h(\pi,\tau)}{RT} = \tau\gamma_\tau$
Specific isobaric heat capacity $c_p = (\partial h/\partial T)_p$	$\dfrac{c_p(\pi,\tau)}{R} = -\tau^2\gamma_{\tau\tau}$
Specific isochoric heat capacity $c_v = (\partial u/\partial T)_v$	$\dfrac{c_v(\pi,\tau)}{R} = -\tau^2\gamma_{\tau\tau} + \dfrac{(\gamma_\pi - \tau\gamma_{\pi\tau})^2}{\gamma_{\pi\pi}}$
Speed of sound $w = v\left[-(\partial p/\partial v)_s\right]^{1/2}$	$\dfrac{w^2(\pi,\tau)}{RT} = \dfrac{\gamma_\pi^2}{\dfrac{(\gamma_\pi - \tau\gamma_{\pi\tau})^2}{\tau^2\gamma_{\tau\tau}} - \gamma_{\pi\pi}}$

[a] $\gamma_\pi = \left[\dfrac{\partial\gamma}{\partial\pi}\right]_\tau$, $\gamma_{\pi\pi} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma}{\partial\pi^2}\right]_\tau$, $\gamma_\tau = \left[\dfrac{\partial\gamma}{\partial\tau}\right]_\pi$, $\gamma_{\tau\tau} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma}{\partial\tau^2}\right]_\pi$, $\gamma_{\pi\tau} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma}{\partial\pi\partial\tau}\right]$

위의 Table 3 에서 사용된 감마 함수의 편 미분 식들의 공식은 아래 Table 4 와 같습니다.

Table 4. The dimensionless Gibbs free energy γ and its derivatives [a] according to Eq. (7)

$$\gamma = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1-\pi)^{I_i} (\tau - 1.222)^{J_i}$$

$$\gamma_\pi = \sum_{i=1}^{34} -n_i I_i (7.1-\pi)^{I_i - 1} (\tau - 1.222)^{J_i} \qquad \gamma_{\pi\pi} = \sum_{i=1}^{34} n_i I_i (I_i - 1)(7.1-\pi)^{I_i - 2} (\tau - 1.222)^{J_i}$$

$$\gamma_\tau = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1-\pi)^{I_i} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1} \qquad \gamma_{\tau\tau} = \sum_{i=1}^{34} n_i (7.1-\pi)^{I_i} J_i (J_i - 1)(\tau - 1.222)^{J_i - 2}$$

$$\gamma_{\pi\tau} = \sum_{i=1}^{34} -n_i I_i (7.1-\pi)^{I_i - 1} J_i (\tau - 1.222)^{J_i - 1}$$

[a] $\gamma_\pi = \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \pi}\right]_\tau$, $\gamma_{\pi\pi} = \left[\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \pi^2}\right]_\tau$, $\gamma_\tau = \left[\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}\right]_\pi$, $\gamma_{\tau\tau} = \left[\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \tau^2}\right]_\pi$, $\gamma_{\pi\tau} = \left[\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \pi \partial \tau}\right]$

구역 2 기본 공식

구역 2 의 기본 공식도 깁스 자유에너지(Gibbs Free Energy) g 의 함수이지만, 이상 기체 부분(Ideal Gas Part)과 나머지 부분(Residual Part)으로 분리되어 있습니다. IAPWS-IF97 원문의 공식은 아래와 같습니다.

The basic equation for this region is a fundamental equation for the specific Gibbs free energy g. This equation is expressed in dimensionless form, $\gamma = g/(RT)$, and is separated into two parts, an ideal-gas part γ^{o} and a residual part γ^{r}, so that

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma(\pi,\tau) = \gamma^{\mathrm{o}}(\pi,\tau) + \gamma^{\mathrm{r}}(\pi,\tau) \ , \tag{15}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with R given by Eq. (1).

The equation for the ideal-gas part γ^{o} of the dimensionless Gibbs free energy reads

$$\gamma^{\mathrm{o}} = \ln \pi + \sum_{i=1}^{9} n_i^{\mathrm{o}} \tau^{J_i^{\mathrm{o}}} \ , \tag{16}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 540$ K. The coefficients n_1^{o} and n_2^{o} were adjusted in such a way that the values for the specific internal energy and specific entropy in the ideal-gas state relate to Eq. (8). Table 10 contains the coefficients n_i^{o} and exponents J_i^{o} of Eq. (16).

The form of the residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy is as follows:

$$\gamma^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i} \ , \tag{17}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 540$ K. The coefficients n_i and exponents I_i and J_i of Eq. (17) are listed in Table 11.

위의 공식 (15)를 살펴 보면 무 차원 깁스 자유에너지 함수, 즉 감마(γ) 함수가 이상 기체 부분의 감마 함수와 나머지 부분의 감마 함수의 합으로 구성되어 있습니다. 그리고 이상 기체 부분의 감마 함수는 공식 (16)과 같으며, 나머지 부분의 감마 함수는 공식 (17)과 같습니다.

압력의 무차원 독립 변수 파이(π)의 기준 압력은 1 MPa 이며, 온도의 무차원 독립 변수 타우(τ)의 기준 온도는 540 oK 입니다.

이상 기체 부분과 나머지 부분의 감마 공식 (16) 및 (17)의 계수 값들은 각각 아래 Table 10 및 Table 11 과 같습니다.

Table 10. Numerical values of the coefficients and exponents of the ideal-gas part γ^{o} of the dimensionless Gibbs free energy for region 2, Eq. (16)[a]

i	J_i^o	n_i^o	i	J_i^o	n_i^o
1[a]	0	$-0.969\,276\,865\,002\,17 \times 10^{1}$	6	−2	$0.142\,408\,191\,714\,44 \times 10^{1}$
2[a]	1	$0.100\,866\,559\,680\,18 \times 10^{2}$	7	−1	$-0.438\,395\,113\,194\,50 \times 10^{1}$
3	−5	$-0.560\,879\,112\,830\,20 \times 10^{-2}$	8	2	$-0.284\,086\,324\,607\,72$
4	−4	$0.714\,527\,380\,814\,55 \times 10^{-1}$	9	3	$0.212\,684\,637\,533\,07 \times 10^{-1}$
5	−3	$-0.407\,104\,982\,239\,28$			

[a] If Eq. (16) is incorporated into Eq. (18), instead of the values for n_1^o and n_2^o given above, the following values for these two coefficients must be used: $n_1^o = -0.969\,372\,683\,930\,49 \times 10^{1}$, $n_2^o = 0.100\,872\,759\,700\,06 \times 10^{2}$.

Table 11. Numerical values of the coefficients and exponents of the residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy for region 2, Eq. (17)

i	I_i	J_i	n_i
1	1	0	$-0.177\,317\,424\,732\,13 \times 10^{-2}$
2	1	1	$-0.178\,348\,622\,923\,58 \times 10^{-1}$
3	1	2	$-0.459\,960\,136\,963\,65 \times 10^{-1}$
4	1	3	$-0.575\,812\,590\,834\,32 \times 10^{-1}$
5	1	6	$-0.503\,252\,787\,279\,30 \times 10^{-1}$
6	2	1	$-0.330\,326\,416\,702\,03 \times 10^{-4}$
7	2	2	$-0.189\,489\,875\,163\,15 \times 10^{-3}$
8	2	4	$-0.393\,927\,772\,433\,55 \times 10^{-2}$
9	2	7	$-0.437\,972\,956\,505\,73 \times 10^{-1}$
10	2	36	$-0.266\,745\,479\,140\,87 \times 10^{-4}$
11	3	0	$0.204\,817\,376\,923\,09 \times 10^{-7}$
12	3	1	$0.438\,706\,672\,844\,35 \times 10^{-6}$
13	3	3	$-0.322\,776\,772\,385\,70 \times 10^{-4}$
14	3	6	$-0.150\,339\,245\,421\,48 \times 10^{-2}$
15	3	35	$-0.406\,682\,535\,626\,49 \times 10^{-1}$
16	4	1	$-0.788\,473\,095\,593\,67 \times 10^{-9}$
17	4	2	$0.127\,907\,178\,522\,85 \times 10^{-7}$
18	4	3	$0.482\,253\,727\,185\,07 \times 10^{-6}$
19	5	7	$0.229\,220\,763\,376\,61 \times 10^{-5}$
20	6	3	$-0.167\,147\,664\,510\,61 \times 10^{-10}$
21	6	16	$-0.211\,714\,723\,213\,55 \times 10^{-2}$
22	6	35	$-0.238\,957\,419\,341\,04 \times 10^{2}$
23	7	0	$-0.590\,595\,643\,242\,70 \times 10^{-17}$
24	7	11	$-0.126\,218\,088\,991\,01 \times 10^{-5}$

25	7	25	$-0.389\,468\,424\,357\,39 \times 10^{-1}$
26	8	8	$0.112\,562\,113\,604\,59 \times 10^{-10}$
27	8	36	$-0.823\,113\,408\,979\,98 \times 10^{1}$
28	9	13	$0.198\,097\,128\,020\,88 \times 10^{-7}$
29	10	4	$0.104\,069\,652\,101\,74 \times 10^{-18}$
30	10	10	$-0.102\,347\,470\,959\,29 \times 10^{-12}$
31	10	14	$-0.100\,181\,793\,795\,11 \times 10^{-8}$
32	16	29	$-0.808\,829\,086\,469\,85 \times 10^{-10}$
33	16	50	$0.106\,930\,318\,794\,09$
34	18	57	$-0.336\,622\,505\,741\,71$
35	20	20	$0.891\,858\,453\,554\,21 \times 10^{-24}$
36	20	35	$0.306\,293\,168\,762\,32 \times 10^{-12}$
37	20	48	$-0.420\,024\,676\,982\,08 \times 10^{-5}$
38	21	21	$-0.590\,560\,296\,856\,39 \times 10^{-25}$
39	22	53	$0.378\,269\,476\,134\,57 \times 10^{-5}$
40	23	39	$-0.127\,686\,089\,346\,81 \times 10^{-14}$
41	24	26	$0.730\,876\,105\,950\,61 \times 10^{-28}$
42	24	40	$0.554\,147\,153\,507\,78 \times 10^{-16}$
43	24	58	$-0.943\,697\,072\,412\,10 \times 10^{-6}$

구역 2 의 다른 모든 성질 값들은 공식 (15)와 (16) 그리고 (17)과 그들의 편 미분 식들의 조합으로 구할 수 있습니다. 주어지는 값인 압력과 온도를 제외한 다른 성질 값들의 계산 공식은 아래 Table 12 와 같습니다.

Table 12. Relations of thermodynamic properties to the ideal-gas part γ^{o} and the residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy and their derivatives[a] when using Eq. (15) or Eq. (18)

Property	Relation
Specific volume $v = (\partial g/\partial p)_T$	$v(\pi,\tau)\dfrac{p}{RT} = \pi\left(\gamma_\pi^{\mathrm{o}} + \gamma_\pi^{\mathrm{r}}\right)$
Specific internal energy $u = g - T(\partial g/\partial T)_p - p(\partial g/\partial p)_T$	$\dfrac{u(\pi,\tau)}{RT} = \tau\left(\gamma_\tau^{\mathrm{o}} + \gamma_\tau^{\mathrm{r}}\right) - \pi\left(\gamma_\pi^{\mathrm{o}} + \gamma_\pi^{\mathrm{r}}\right)$
Specific entropy $s = -(\partial g/\partial T)_p$	$\dfrac{s(\pi,\tau)}{R} = \tau\left(\gamma_\tau^{\mathrm{o}} + \gamma_\tau^{\mathrm{r}}\right) - \left(\gamma^{\mathrm{o}} + \gamma^{\mathrm{r}}\right)$
Specific enthalpy $h = g - T(\partial g/\partial T)_p$	$\dfrac{h(\pi,\tau)}{RT} = \tau\left(\gamma_\tau^{\mathrm{o}} + \gamma_\tau^{\mathrm{r}}\right)$
Specific isobaric heat capacity $c_p = (\partial h/\partial T)_p$	$\dfrac{c_p(\pi,\tau)}{R} = -\tau^2\left(\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{o}} + \gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{r}}\right)$
Specific isochoric heat capacity $c_v = (\partial u/\partial T)_v$	$\dfrac{c_v(\pi,\tau)}{R} = -\tau^2\left(\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{o}} + \gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{r}}\right) - \dfrac{(1+\pi\gamma_\pi^{\mathrm{r}} - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{r}})^2}{1-\pi^2\gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{r}}}$
Speed of sound $w = v\left[-(\partial p/\partial v)_s\right]^{1/2}$	$\dfrac{w^2(\pi,\tau)}{RT} = \dfrac{1+2\pi\gamma_\pi^{\mathrm{r}} + \pi^2{\gamma_\pi^{\mathrm{r}}}^2}{\left(1-\pi^2\gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{r}}\right) + \dfrac{\left(1+\pi\gamma_\pi^{\mathrm{r}} - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{r}}\right)^2}{\tau^2\left(\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{o}} + \gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{r}}\right)}}$

[a] $\gamma_\pi^{\mathrm{r}} = \left[\dfrac{\partial\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\pi}\right]_\tau$, $\gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{r}} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\pi^2}\right]_\tau$, $\gamma_\tau^{\mathrm{r}} = \left[\dfrac{\partial\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\tau}\right]_\pi$, $\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{r}} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\tau^2}\right]_\pi$, $\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{r}} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\pi\partial\tau}\right]$, $\gamma_\tau^{\mathrm{o}} = \left[\dfrac{\partial\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\tau}\right]_\pi$, $\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{o}} = \left[\dfrac{\partial^2\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\tau^2}\right]_\pi$

위의 Table 12 에서 사용된 이상 기체 부분의 감마 함수 및 나머지 부분의 감마 함수의 편 미분 식들의 공식은 각각 아래 Table 13 및 Table 14 와 같습니다.

Table 13. The ideal-gas part γ^{o} of the dimensionless Gibbs free energy and its derivatives [a] according to Eq. (16)

$$\gamma^{\mathrm{o}} = \ln\pi + \sum_{i=1}^{9} n_i^{\mathrm{o}} \tau^{J_i^{\mathrm{o}}}$$

$$\gamma_{\pi}^{\mathrm{o}} = 1/\pi + 0$$

$$\gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{o}} = -1/\pi^2 + 0$$

$$\gamma_{\tau}^{\mathrm{o}} = 0 + \sum_{i=1}^{9} n_i^{\mathrm{o}} J_i^{\mathrm{o}} \tau^{J_i^{\mathrm{o}}-1}$$

$$\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{o}} = 0 + \sum_{i=1}^{9} n_i^{\mathrm{o}} J_i^{\mathrm{o}} \left(J_i^{\mathrm{o}}-1\right) \tau^{J_i^{\mathrm{o}}-2}$$

$$\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{o}} = 0 + 0$$

[a] $\gamma_{\pi}^{\mathrm{o}} = \left[\frac{\partial\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\pi}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{o}} = \left[\frac{\partial^2\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\pi^2}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\tau}^{\mathrm{o}} = \left[\frac{\partial\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\tau}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{o}} = \left[\frac{\partial^2\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\tau^2}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{o}} = \left[\frac{\partial^2\gamma^{\mathrm{o}}}{\partial\pi\,\partial\tau}\right]$

Table 14. The residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy and its derivatives [a] according to Eq. (17)

$$\gamma^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i\, \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}$$

$$\gamma_{\pi}^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i\, I_i\, \pi^{I_i-1} (\tau - 0.5)^{J_i} \qquad \gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i\, I_i (I_i - 1) \pi^{I_i-2} (\tau - 0.5)^{J_i}$$

$$\gamma_{\tau}^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i\, \pi^{I_i} J_i (\tau - 0.5)^{J_i-1} \qquad \gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i\, \pi^{I_i} J_i (J_i - 1)(\tau - 0.5)^{J_i-2}$$

$$\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{43} n_i\, I_i\, \pi^{I_i-1} J_i (\tau - 0.5)^{J_i-1}$$

[a] $\gamma_{\pi}^{\mathrm{r}} = \left[\frac{\partial\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\pi}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\pi\pi}^{\mathrm{r}} = \left[\frac{\partial^2\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\pi^2}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\tau}^{\mathrm{r}} = \left[\frac{\partial\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\tau}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\tau\tau}^{\mathrm{r}} = \left[\frac{\partial^2\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\tau^2}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\pi\tau}^{\mathrm{r}} = \left[\frac{\partial^2\gamma^{\mathrm{r}}}{\partial\pi\,\partial\tau}\right]$

구역 3 기본 공식

구역 3 의 기본 공식은 헬름홀즈 자유에너지(Helmholtz Free Energy) f 의 함수이며, IAPWS-IF97 원문의 공식은 아래와 같습니다.

The basic equation for this region is a fundamental equation for the specific Helmholtz free energy f. This equation is expressed in dimensionless form, $\phi = f/(RT)$, and reads

$$\frac{f(\rho,T)}{RT} = \phi(\delta,\tau) = n_1 \ln\delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} \tau^{J_i} , \tag{28}$$

where $\delta = \rho/\rho^*$, $\tau = T^*/T$ with $\rho^* = \rho_c$, $T^* = T_c$ and R, T_c, and ρ_c given by Eqs. (1), (2), and (4). The coefficients n_i and exponents I_i and J_i of Eq. (28) are listed in Table 30.

위의 공식 (28)을 살펴 보면 헬름홀즈 자유에너지는 밀도와 온도의 함수입니다. 이를 밀도와 온도의 무 차원 수인, 델타(δ)와 타우(τ)에 대한 함수로 변형한, 무 차원 헬름홀즈 자유에너지 함수, 즉 화이(ϕ) 함수로 변형한 것입니다.

밀도의 무차원 독립 변수 델타(δ)의 기준 밀도는 임계 밀도인 ρc(322 kg/m3)이며, 온도의 무차원 독립 변수 타우(t)의 기준 온도는 임계 온도인 Tc(647.096 oK) 입니다.

공식 (28)의 계수 값들은 아래 Table 30 와 같습니다.

Table 30. Numerical values of the coefficients and exponents of the dimensionless Helmholtz free energy for region 3, Eq. (28)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	–	–	$0.106\,580\,700\,285\,13 \times 10^{1}$	21	3	4	$-0.201\,899\,150\,235\,70 \times 10^{1}$
2	0	0	$-0.157\,328\,452\,902\,39 \times 10^{2}$	22	3	16	$-0.821\,476\,371\,739\,63 \times 10^{-2}$
3	0	1	$0.209\,443\,969\,743\,07 \times 10^{2}$	23	3	26	$-0.475\,960\,357\,349\,23$
4	0	2	$-0.768\,677\,078\,787\,16 \times 10^{1}$	24	4	0	$0.439\,840\,744\,735\,00 \times 10^{-1}$
5	0	7	$0.261\,859\,477\,879\,54 \times 10^{1}$	25	4	2	$-0.444\,764\,354\,287\,39$
6	0	10	$-0.280\,807\,811\,486\,20 \times 10^{1}$	26	4	4	$0.905\,720\,707\,197\,33$
7	0	12	$0.120\,533\,696\,965\,17 \times 10^{1}$	27	4	26	$0.705\,224\,500\,879\,67$
8	0	23	$-0.845\,668\,128\,125\,02 \times 10^{-2}$	28	5	1	$0.107\,705\,126\,263\,32$
9	1	2	$-0.126\,543\,154\,777\,14 \times 10^{1}$	29	5	3	$-0.329\,136\,232\,589\,54$
10	1	6	$-0.115\,244\,078\,066\,81 \times 10^{1}$	30	5	26	$-0.508\,710\,620\,411\,58$
11	1	15	$0.885\,210\,439\,843\,18$	31	6	0	$-0.221\,754\,008\,730\,96 \times 10^{-1}$
12	1	17	$-0.642\,077\,651\,816\,07$	32	6	2	$0.942\,607\,516\,650\,92 \times 10^{-1}$
13	2	0	$0.384\,934\,601\,866\,71$	33	6	26	$0.164\,362\,784\,479\,61$
14	2	2	$-0.852\,147\,088\,242\,06$	34	7	2	$-0.135\,033\,722\,413\,48 \times 10^{-1}$
15	2	6	$0.489\,722\,815\,418\,77 \times 10^{1}$	35	8	26	$-0.148\,343\,453\,524\,72 \times 10^{-1}$
16	2	7	$-0.305\,026\,172\,569\,65 \times 10^{1}$	36	9	2	$0.579\,229\,536\,280\,84 \times 10^{-3}$
17	2	22	$0.394\,205\,368\,791\,54 \times 10^{-1}$	37	9	26	$0.323\,089\,047\,037\,11 \times 10^{-2}$
18	2	26	$0.125\,584\,084\,243\,08$	38	10	0	$0.809\,648\,029\,962\,15 \times 10^{-4}$
19	3	0	$-0.279\,993\,296\,987\,10$	39	10	1	$-0.165\,576\,797\,950\,37 \times 10^{-3}$
20	3	2	$0.138\,997\,995\,694\,60 \times 10^{1}$	40	11	26	$-0.449\,238\,990\,618\,15 \times 10^{-4}$

구역 3 의 다른 모든 성질 값들은 공식 (28)과 그 편 미분 식들의 조합으로 구할 수 있습니다. 주어지는 값인 밀도와 온도를 제외한 다른 성질 값들의 계산 공식은 아래 Table 31 과 같습니다.

Table 31. Relations of thermodynamic properties to the dimensionless Helmholtz free energy ϕ and its derivatives [a] when using Eq. (28)

Property	Relation
Pressure $p = \rho^2 (\partial f/\partial \rho)_T$	$\dfrac{p(\delta,\tau)}{\rho RT} = \delta\phi_\delta$
Specific internal energy $u = f - T(\partial f/\partial T)_\rho$	$\dfrac{u(\delta,\tau)}{RT} = \tau\phi_\tau$
Specific entropy $s = -(\partial f/\partial T)_\rho$	$\dfrac{s(\delta,\tau)}{R} = \tau\phi_\tau - \phi$
Specific enthalpy $h = f - T(\partial f/\partial T)_\rho + \rho(\partial f/\partial \rho)_T$	$\dfrac{h(\delta,\tau)}{RT} = \tau\phi_\tau + \delta\phi_\delta$
Specific isochoric heat capacity $c_v = (\partial u/\partial T)_\rho$	$\dfrac{c_v(\delta,\tau)}{R} = -\tau^2\phi_{\tau\tau}$
Specific isobaric heat capacity $c_p = (\partial h/\partial T)_p$	$\dfrac{c_p(\delta,\tau)}{R} = -\tau^2\phi_{\tau\tau} + \dfrac{(\delta\phi_\delta - \delta\tau\phi_{\delta\tau})^2}{2\delta\phi_\delta + \delta^2\phi_{\delta\delta}}$
Speed of sound $w = (\partial p/\partial \rho)_s^{1/2}$	$\dfrac{w^2(\delta,\tau)}{RT} = 2\delta\phi_\delta + \delta^2\phi_{\delta\delta} - \dfrac{(\delta\phi_\delta - \delta\tau\phi_{\delta\tau})^2}{\tau^2\phi_{\tau\tau}}$
Phase-equilibrium condition (Maxwell criterion)	$\dfrac{p_s}{RT\rho'} = \delta'\phi_\delta(\delta',\tau)$; $\dfrac{p_s}{RT\rho''} = \delta''\phi_\delta(\delta'',\tau)$ $\dfrac{p_s}{RT}\left(\dfrac{1}{\rho''} - \dfrac{1}{\rho'}\right) = \phi(\delta',\tau) - \phi(\delta'',\tau)$

[a] $\phi_\delta = \left[\dfrac{\partial\phi}{\partial\delta}\right]_\tau$, $\phi_{\delta\delta} = \left[\dfrac{\partial^2\phi}{\partial\delta^2}\right]_\tau$, $\phi_\tau = \left[\dfrac{\partial\phi}{\partial\tau}\right]_\delta$, $\phi_{\tau\tau} = \left[\dfrac{\partial^2\phi}{\partial\tau^2}\right]_\delta$, $\phi_{\delta\tau} = \left[\dfrac{\partial^2\phi}{\partial\delta\partial\tau}\right]$

위의 Table 31 에서 사용된 화이 함수의 편 미분 식들의 공식은 아래 Table 32 와 같습니다.

Table 32. The dimensionless Helmholtz free energy equation and its derivatives[a] according to Eq. (28)

$$\phi = n_1 \ln\delta + \sum_{i=2}^{40} n_i\ \delta^{I_i}\ \tau^{J_i}$$

$$\phi_\delta = n_1 / \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i\ I_i\ \delta^{I_i-1}\ \tau^{J_i} \qquad \phi_{\delta\delta} = -n_1 / \delta^2 + \sum_{i=2}^{40} n_i\ I_i(I_i-1)\,\delta^{I_i-2}\ \tau^{J_i}$$

$$\phi_\tau = 0 + \sum_{i=2}^{40} n_i\ \delta^{I_i}\ J_i\ \tau^{J_i-1} \qquad \phi_{\tau\tau} = 0 + \sum_{i=2}^{40} n_i\ \delta^{I_i}\ J_i(J_i-1)\,\tau^{J_i-2}$$

$$\phi_{\delta\tau} = 0 + \sum_{i=2}^{40} n_i\ I_i\ \delta^{I_i-1}\ J_i\ \tau^{J_i-1}$$

[a] $\phi_\delta = \left[\frac{\partial\phi}{\partial\delta}\right]_\tau$, $\phi_{\delta\delta} = \left[\frac{\partial^2\phi}{\partial\delta^2}\right]_\tau$, $\phi_\tau = \left[\frac{\partial\phi}{\partial\tau}\right]_\delta$, $\phi_{\tau\tau} = \left[\frac{\partial^2\phi}{\partial\tau^2}\right]_\delta$, $\phi_{\delta\tau} = \left[\frac{\partial^2\phi}{\partial\delta\partial\tau}\right]$

구역 4 기본 공식 (포화 상태 공식)

구역 4 의 기본 공식은 포화 압력과 포화 온도에 대하여 직접 풀 수 있는 2 차 방정식이며, IAPWS-IF97 원문의 공식은 아래와 같습니다.

The equation for describing the saturation line is an implicit quadratic equation which can be directly solved with regard to both saturation pressure p_s and saturation temperature T_s. This equation reads

$$\beta^2\vartheta^2 + n_1\beta^2\vartheta + n_2\beta^2 + n_3\beta\vartheta^2 + n_4\beta\vartheta + n_5\beta + n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8 = 0\,, \tag{29}$$

where

$$\beta = \left(p_s / p^*\right)^{1/4} \tag{29a}$$

and

$$\vartheta = \frac{T_s}{T^*} + \frac{n_9}{\left(T_s / T^*\right) - n_{10}} \tag{29b}$$

with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 1$ K; for the coefficients n_1 to n_{10} see Table 34.

위의 공식 (29)는 포화 압력과 포화 온도의 무 차원 수인 베타(β)와 세타(θ)의 함수입니다. 위의 포화 온도의 무차원 수를 나태내는 그리스 문자는 필기체 세타입니다.

포화 압력의 무차원 독립 변수 베타(β)의 기준 밀도는 1 Mpa 이며, 온도의 무차원 독립 변수 세타(θ)의 기준 온도는 임 1 oK 입니다.

구역 4 의 포화 상태 공식은 포화 압력이나 포화 온도에 대하여 직접 풀 수 있으므로, 기본 공식과 역 공식의 구분이 필요치 않으나, IAPWS-IF97 에서는 포화 온도를 독립 변수로 하여 포화 압력을 구하는 공식을 기본 공식이라고 칭하였으며, 포화 압력을 독립 변수로 하여 포화 온도를 구하는 공식을 역 공식이라고 칭하였습니다.

포화 온도를 독립 변수로 하여 포화 압력을 구하는 기본 공식과 공식의 계수들은 아래 공식 (30)과 Table 34 와 같습니다.

The solution of Eq. (29) with regard to saturation pressure is as follows:

$$\frac{p_s}{p^*} = \left[\frac{2C}{-B + \left(B^2 - 4AC\right)^{1/2}} \right]^4 , \tag{30}$$

where $p^* = 1$ MPa and

$$A = \vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2$$

$$B = n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5$$

$$C = n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8$$

with ϑ according to Eq. (29b). The coefficients n_i of Eq. (30) are listed in Table 34.

Table 34. Numerical values of the coefficients of the dimensionless saturation equations, Eqs. (29) to (31)

i	n_i	i	n_i
1	$0.116\,705\,214\,527\,67 \times 10^4$	6	$0.149\,151\,086\,135\,30 \times 10^2$
2	$-0.724\,213\,167\,032\,06 \times 10^6$	7	$-0.482\,326\,573\,615\,91 \times 10^4$
3	$-0.170\,738\,469\,400\,92 \times 10^2$	8	$0.405\,113\,405\,420\,57 \times 10^6$
4	$0.120\,208\,247\,024\,70 \times 10^5$	9	$-0.238\,555\,575\,678\,49$
5	$-0.323\,255\,503\,223\,33 \times 10^7$	10	$0.650\,175\,348\,447\,98 \times 10^3$

한편 포화 압력을 독립 변수로 하여 포화 온도를 구하는 역 공식은 아래 공식 (31)과 같으며, 공식의 계수는 기본 공식과 동일한 Table 34 의 계수를 사용합니다.

The saturation-temperature solution of Eq. (29) reads

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10} + D - \left[\left(n_{10} + D\right)^2 - 4\left(n_9 + n_{10}D\right) \right]^{1/2}}{2} , \tag{31}$$

where $T^* = 1$ K and

$$D = \frac{2G}{-F - \left(F^2 - 4EG\right)^{1/2}}$$

with

$$E = \beta^2 + n_3\beta + n_6$$

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7$$

$$G = n_2\beta^2 + n_5\beta + n_8$$

and β according to Eq. (29a). The coefficients n_i of Eq. (31) are listed in Table 34.

구역 5 기본 공식

구역 5 의 기본 공식도 깁스 자유에너지(Gibbs Free Energy) g 의 함수이지만, 구역 2 와 동일하게 이상 기체 부분(Ideal Gas Part)과 나머지 부분(Residual Part)으로 분리되어 있습니다. IAPWS-IF97 원문의 공식은 아래와 같습니다.

The basic equation for this high-temperature region is a fundamental equation for the specific Gibbs free energy g. This equation is expressed in dimensionless form, $\gamma = g/(RT)$, and is separated into two parts, an ideal-gas part γ° and a residual part γ^{r}, so that

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma(\pi,\tau) = \gamma^{\circ}(\pi,\tau) + \gamma^{\mathrm{r}}(\pi,\tau) \ , \tag{32}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with R given by Eq. (1).

The equation for the ideal-gas part γ° of the dimensionless Gibbs free energy reads

$$\gamma^{\circ} = \ln \pi + \sum_{i=1}^{6} n_i^{\circ} \tau^{J_i^{\circ}} \ , \tag{33}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 1000$ K. The coefficients n_1° and n_2° were adjusted in such a way that the values for the specific internal energy and specific entropy in the ideal-gas state relate to Eq. (8). Table 37 contains the coefficients n_i° and exponents J_i° of Eq. (33).

The form of the residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy is as follows:

$$\gamma^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{6} n_i \, \pi^{I_i} \, \tau^{J_i} \ , \tag{34}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 1000$ K. The coefficients n_i and exponents I_i and J_i of Eq. (34) are listed in Table 38.

위의 공식 (32)를 살펴 보면 무 차원 깁스 자유에너지 함수, 즉 감마(γ) 함수가 이상 기체 부분의 감마 함수와 나머지 부분의 감마 함수의 합으로 구성되어 있습니다. 그리고 이상 기체 부분의 감마 함수는 공식(33)과 같으며, 나머지 부분의 감마 함수는 공식 (34)와 같습니다.

압력의 무차원 독립 변수 파이(π)의 기준 압력은 1 MPa 이며, 온도의 무차원 독립 변수 타우(τ)의 기준 온도는 1000 oK 입니다.

이상 기체 부분과 나머지 부분의 감마 공식 (33) 및 (34)의 계수 값들은 각각 아래 Table 37 및 Table 38 과 같습니다.

Table 37. Numerical values of the coefficients and exponents of the ideal-gas part γ^o of the dimensionless Gibbs free energy for region 5, Eq. (33)

i	J_i^o	n_i^o	i	J_i^o	n_i^o
1	0	$-0.131\ 799\ 836\ 742\ 01 \times 10^{2}$	4	-2	$0.369\ 015\ 349\ 803\ 33$
2	1	$0.685\ 408\ 416\ 344\ 34 \times 10^{1}$	5	-1	$-0.311\ 613\ 182\ 139\ 25 \times 10^{1}$
3	-3	$-0.248\ 051\ 489\ 334\ 66 \times 10^{-1}$	6	2	$-0.329\ 616\ 265\ 389\ 17$

Table 38. Numerical values of the coefficients and exponents of the residual part γ^r of the dimensionless Gibbs free energy for region 5, Eq. (34)

i	I_i	J_i	n_i
1	1	1	$0.157\ 364\ 048\ 552\ 59 \times 10^{-2}$
2	1	2	$0.901\ 537\ 616\ 739\ 44 \times 10^{-3}$
3	1	3	$-0.502\ 700\ 776\ 776\ 48 \times 10^{-2}$
4	2	3	$0.224\ 400\ 374\ 094\ 85 \times 10^{-5}$
5	2	9	$-0.411\ 632\ 754\ 534\ 71 \times 10^{-5}$
6	3	7	$0.379\ 194\ 548\ 229\ 55 \times 10^{-7}$

구역 5 의 다른 모든 성질 값들은 공식 (32)와 (33) 그리고 (34)와 그들의 편 미분 식들의 조합으로 구할 수 있습니다. 주어지는 값인 압력과 온도를 제외한 다른 성질 값들의 계산 공식은 아래 Table 39 와 같습니다.

Table 39. Relations of thermodynamic properties to the ideal-gas part γ^{o} and the residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy and their derivatives[a] when using Eq. (32)

Property	Relation
Specific volume $v=(\partial g/\partial p)_T$	$v(\pi,\tau)\frac{p}{RT}=\pi\left(\gamma_\pi^{\text{o}}+\gamma_\pi^{\text{r}}\right)$
Specific internal energy $u=g-T(\partial g/\partial T)_p-p(\partial g/\partial p)_T$	$\frac{u(\pi,\tau)}{RT}=\tau\left(\gamma_\tau^{\text{o}}+\gamma_\tau^{\text{r}}\right)-\pi\left(\gamma_\pi^{\text{o}}+\gamma_\pi^{\text{r}}\right)$
Specific entropy $s=-(\partial g/\partial T)_p$	$\frac{s(\pi,\tau)}{R}=\tau\left(\gamma_\tau^{\text{o}}+\gamma_\tau^{\text{r}}\right)-\left(\gamma^{\text{o}}+\gamma^{\text{r}}\right)$
Specific enthalpy $h=g-T(\partial g/\partial T)_p$	$\frac{h(\pi,\tau)}{RT}=\tau\left(\gamma_\tau^{\text{o}}+\gamma_\tau^{\text{r}}\right)$
Specific isobaric heat capacity $c_p=(\partial h/\partial T)_p$	$\frac{c_p(\pi,\tau)}{R}=-\tau^2\left(\gamma_{\tau\tau}^{\text{o}}+\gamma_{\tau\tau}^{\text{r}}\right)$
Specific isochoric heat capacity $c_v=(\partial u/\partial T)_v$	$\frac{c_v(\pi,\tau)}{R}=-\tau^2\left(\gamma_{\tau\tau}^{\text{o}}+\gamma_{\tau\tau}^{\text{r}}\right)-\frac{(1+\pi\gamma_\pi^{\text{r}}-\tau\pi\gamma_{\pi\tau}^{\text{r}})^2}{1-\pi^2\gamma_{\pi\pi}^{\text{r}}}$
Speed of sound $w=v\left[-(\partial p/\partial v)_s\right]^{1/2}$	$\frac{w^2(\pi,\tau)}{RT}=\frac{1+2\pi\gamma_\pi^{\text{r}}+\pi^2{\gamma_\pi^{\text{r}}}^2}{\left(1-\pi^2\gamma_{\pi\pi}^{\text{r}}\right)+\frac{\left(1+\pi\gamma_\pi^{\text{r}}-\tau\pi\gamma_{\pi\tau}^{\text{r}}\right)^2}{\tau^2\left(\gamma_{\tau\tau}^{\text{o}}+\gamma_{\tau\tau}^{\text{r}}\right)}}$

[a] $\gamma_\pi^{\text{r}}=\left[\frac{\partial\gamma^{\text{r}}}{\partial\pi}\right]_\tau$, $\gamma_{\pi\pi}^{\text{r}}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{\text{r}}}{\partial\pi^2}\right]_\tau$, $\gamma_\tau^{\text{r}}=\left[\frac{\partial\gamma^{\text{r}}}{\partial\tau}\right]_\pi$, $\gamma_{\tau\tau}^{\text{r}}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{\text{r}}}{\partial\tau^2}\right]_\pi$, $\gamma_{\pi\tau}^{\text{r}}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{\text{r}}}{\partial\pi\partial\tau}\right]$, $\gamma_\tau^{\text{o}}=\left[\frac{\partial\gamma^{\text{o}}}{\partial\tau}\right]_\pi$, $\gamma_{\tau\tau}^{\text{o}}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{\text{o}}}{\partial\tau^2}\right]_\pi$

위의 Table 39 에서 사용된 이상 기체 부분의 감마 함수 및 나머지 부분의 감마 함수의 편 미분 식들의 공식은 각각 아래 Table 40 및 Table 41 과 같습니다.

Table 40. The ideal-gas part γ^{o} of the dimensionless Gibbs free energy and its derivatives [a] according to Eq. (33)

γ^{o}	=	$\ln\pi$	+	$\sum_{i=1}^{6} n_i^{o}\tau^{J_i^{o}}$
γ_{π}^{o}	=	$1/\pi$	+	0
$\gamma_{\pi\pi}^{o}$	=	$-1/\pi^2$	+	0
γ_{τ}^{o}	=	0	+	$\sum_{i=1}^{6} n_i^{o} J_i^{o}\tau^{J_i^{o}-1}$
$\gamma_{\tau\tau}^{o}$	=	0	+	$\sum_{i=1}^{6} n_i^{o} J_i^{o}\left(J_i^{o}-1\right)\tau^{J_i^{o}-2}$
$\gamma_{\pi\tau}^{o}$	=	0	+	0

[a] $\gamma_{\pi}^{o}=\left[\frac{\partial\gamma^{o}}{\partial\pi}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\pi\pi}^{o}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{o}}{\partial\pi^2}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\tau}^{o}=\left[\frac{\partial\gamma^{o}}{\partial\tau}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\tau\tau}^{o}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{o}}{\partial\tau^2}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\pi\tau}^{o}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{o}}{\partial\pi\,\partial\tau}\right]$

Table 41. The residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy and its derivatives [a] according to Eq. (34)

$$\gamma^{r}=\sum_{i=1}^{6} n_i\,\pi^{I_i}\,\tau^{J_i}$$

$$\gamma_{\pi}^{r}=\sum_{i=1}^{6} n_i\,I_i\,\pi^{I_i-1}\,\tau^{J_i} \qquad \gamma_{\pi\pi}^{r}=\sum_{i=1}^{6} n_i\,I_i\left(I_i-1\right)\pi^{I_i-2}\,\tau^{J_i}$$

$$\gamma_{\tau}^{r}=\sum_{i=1}^{6} n_i\,\pi^{I_i}J_i\,\tau^{J_i-1} \qquad \gamma_{\tau\tau}^{r}=\sum_{i=1}^{6} n_i\,\pi^{I_i}J_i\left(J_i-1\right)\tau^{J_i-2}$$

$$\gamma_{\pi\tau}^{r}=\sum_{i=1}^{6} n_i\,I_i\,\pi^{I_i-1}J_i\,\tau^{J_i-1}$$

[a] $\gamma_{\pi}^{r}=\left[\frac{\partial\gamma^{r}}{\partial\pi}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\pi\pi}^{r}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{r}}{\partial\pi^2}\right]_{\tau}$, $\gamma_{\tau}^{r}=\left[\frac{\partial\gamma^{r}}{\partial\tau}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\tau\tau}^{r}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{r}}{\partial\tau^2}\right]_{\pi}$, $\gamma_{\pi\tau}^{r}=\left[\frac{\partial^2\gamma^{r}}{\partial\pi\,\partial\tau}\right]$

구역 2 와 구역 3 경계선 보조 공식

구역 2 와 구역 3 의 경계선에서 온도 623.15 oK 이하에서는 구역 4 의 공식으로 계산되는 포화 압력으로 구역 경계를 구분할 수 있지만, 온도 623.15 oK 이상에서는 그 경계선을 정의하는 공식이 별도로 필요합니다. IAPWS-IF97 에서는 이 경계선을 정의하는 공식을 보조 공식으로 제공하고 있으며, 동 공식과 공식의 계수(Table 1)는 아래와 같습니다. 참고로, 이 경계선의 양 끝점은 623.15 oK 에서의 16.5292 MPa 과 863.15 oK 에서의 100 MPa 입니다.

The boundary between regions 2 and 3 (see Fig. 1) is defined by the following simple quadratic pressure-temperature relation, the B23-equation

$$\pi = n_1 + n_2\theta + n_3\theta^2 \quad , \qquad (5)$$

where $\pi = p/p^*$ and $\theta = T/T^*$ with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 1$ K. The coefficients n_1 to n_3 of Eq. (5) are listed in Table 1. Equation (5) roughly describes an isentropic line; the entropy values along this boundary line are between $s = 5.047$ kJ kg^{-1} K^{-1} and $s = 5.261$ kJ kg^{-1} K^{-1}.

Alternatively Eq. (5) can be expressed explicitly in temperature as

$$\theta = n_4 + \left[\left(\pi - n_5 \right) / n_3 \right]^{1/2} \quad , \qquad (6)$$

with θ and π defined for Eq. (5) and the coefficients n_3 to n_5 listed in Table 1. Equations (5) and (6) cover the range from 623.15 K at a pressure of 16.5292 MPa to 863.15 K at 100 MPa.

Table 1. Numerical values of the coefficients of the B23-equation, Eqs. (5) and (6), for defining the boundary between regions 2 and 3

i	n_i	i	n_i
1	$0.348\,051\,856\,289\,69 \times 10^{3}$	4	$0.572\,544\,598\,627\,46 \times 10^{3}$
2	$-0.116\,718\,598\,799\,75 \times 10^{1}$	5	$0.139\,188\,397\,788\,70 \times 10^{2}$
3	$0.101\,929\,700\,393\,26 \times 10^{-2}$		

공식 (5)는 온도를 가지고 경계선 압력을 구하는 공식이고, 공식 (6)은 압력을 가지고 경계선 온도를 구하는 공식입니다.

구역 2 준 안정(Metastable) 증기 기본 공식

포화 증기 구역에서 팽창하는 저압 증기 터빈의 최종단 노즐에서는 그 팽창 속도가 매우 빨라서, 팽창하는 습증기(Wet Steam)가 평형 상태의 습증기 상태로 팽창하지 못하고 마치 과열 증기인 것처럼 팽창합니다. 달리 표현하면, 지금 습증기 구역에 있다는 것을 "잊어 먹고", 과열 증기와 동일한 형태로 팽창하는 것입니다.

이와같이 습증기 구역에서 과열증기 형태로 팽창하게 되면, 증기 터빈이 이용할 수 있는 가용 엔탈피 낙차가 줄어들게 되어 증기 터빈 효율의 저하를 초래하는데, 이러한 손실을 증기 터빈 설계에서는 과포화 손실(Supersaturation Loss)이라고 부르기도 합니다.

이러한 형태의 과정을 해석하기 위하여 준 안정(Metastable) 상태의 증기 성질을 알아야 하는데, IAPWS-IF97 에서는 이러한 준 안정 상태의 물 및 증기의 성질을 각 구역별 기본 공식으로부터 외삽법(Extrapolation)으로 구할 수 있다고 기술하고 있습니다.

하지만 구역 2 의 10 MPa 이하의 압력에서는 기본 공식이 준 안정 상태 증기의 성질을 구하는 공식으로 유효하지 않으며, 아래와 같은 별도의 공식을 제공하고 있습니다.

As for the basic equation, Eq. (15), the supplementary equation for a part of the metastable-vapor region bounding region 2 is given in the dimensionless form of the specific Gibbs free energy, $\gamma = g/(RT)$, consisting of an ideal-gas part γ^{o} and a residual part γ^{r}, so that

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma(\pi,\tau) = \gamma^{\mathrm{o}}(\pi,\tau) + \gamma^{\mathrm{r}}(\pi,\tau) \ , \qquad (18)$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with R given by Eq. (1).

The equation for the ideal-gas part γ^{o} is identical with Eq. (16) except for the values of the two coefficients n_1^{o} and n_2^{o}, see Table 10. For the use of Eq. (16) as part of Eq. (18) the coefficients n_1^{o} and n_2^{o} were slightly readjusted to meet the high consistency requirement between Eqs. (18) and (15) regarding the properties h and s along the saturated vapor line; see below.

The equation for the residual part γ^{r} reads

$$\gamma^{r} = \sum_{i=1}^{13} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i} \quad , \tag{19}$$

where $\pi = p/p^*$ and $\tau = T^*/T$ with $p^* = 1$ MPa and $T^* = 540$ K. The coefficients n_i and exponents I_i and J_i of Eq. (19) are listed in Table 16.

위 공식과 내용을 살펴보면, 준 안정 상태 공식이 구역 2 의 기본 공식과 동일하게, 이상 기체 부분(Ideal Gas Part)과 나머지 부분(Residual Part)으로 구성되어 있으며, 이상 기체 부분은 기본 공식과 동일하고 일부 계수들만 다르고, 나머지 부분은 공식과 계수가 모두 다릅니다.

이상 기체 부분에서 기본 공식과 다른 계수 값들은 기본 공식의 계수 값들의 표인 Table 10 에 기술되어 있으며, 나머지 부분의 계수 값들은 아래 Table 16 과 같습니다.

Table 16. Numerical values of the coefficients and exponents of the residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy for the metastable-vapor region, Eq. (19)

i	I_i	J_i	n_i
1	1	0	$-0.733\,622\,601\,865\,06 \times 10^{-2}$
2	1	2	$-0.882\,238\,319\,431\,46 \times 10^{-1}$
3	1	5	$-0.723\,345\,552\,132\,45 \times 10^{-1}$
4	1	11	$-0.408\,131\,785\,344\,55 \times 10^{-2}$
5	2	1	$0.200\,978\,033\,802\,07 \times 10^{-2}$
6	2	7	$-0.530\,459\,218\,986\,42 \times 10^{-1}$
7	2	16	$-0.761\,904\,090\,869\,70 \times 10^{-2}$
8	3	4	$-0.634\,980\,376\,573\,13 \times 10^{-2}$
9	3	16	$-0.860\,430\,930\,285\,88 \times 10^{-1}$
10	4	7	$0.753\,215\,815\,227\,70 \times 10^{-2}$
11	4	10	$-0.792\,383\,754\,461\,39 \times 10^{-2}$
12	5	9	$-0.228\,881\,607\,784\,47 \times 10^{-3}$
13	5	10	$-0.264\,565\,014\,828\,10 \times 10^{-2}$

주어지는 값인 압력과 온도를 제외한 다른 성질 값들의 계산 공식과 이상 기체 부분 공식의 편 미분 공식은 구역 2 의 기본 공식과 동일하며, 나머지 부분의 공식의 편 미분 공식은 아래 Table 17 과 같습니다.

Table 17. The residual part γ^{r} of the dimensionless Gibbs free energy and its derivatives[a] according to Eq. (19)

$$\gamma^{\mathrm{r}} = \sum_{i=1}^{13} n_i\, \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}$$

$$\gamma^{\mathrm{r}}_{\pi} = \sum_{i=1}^{13} n_i\, I_i\, \pi^{I_i - 1} (\tau - 0.5)^{J_i} \qquad \gamma^{\mathrm{r}}_{\pi\pi} = \sum_{i=1}^{13} n_i\, I_i (I_i - 1) \pi^{I_i - 2} (\tau - 0.5)^{J_i}$$

$$\gamma^{\mathrm{r}}_{\tau} = \sum_{i=1}^{13} n_i\, \pi^{I_i} J_i (\tau - 0.5)^{J_i - 1} \qquad \gamma^{\mathrm{r}}_{\tau\tau} = \sum_{i=1}^{13} n_i\, \pi^{I_i} J_i (J_i - 1)(\tau - 0.5)^{J_i - 2}$$

$$\gamma^{\mathrm{r}}_{\pi\tau} = \sum_{i=1}^{13} n_i\, I_i\, \pi^{I_i - 1} J_i (\tau - 0.5)^{J_i - 1}$$

[a] $\gamma^{\mathrm{r}}_{\pi} = \left[\frac{\partial \gamma^{\mathrm{r}}}{\partial \pi}\right]_{\tau}$, $\gamma^{\mathrm{r}}_{\pi\pi} = \left[\frac{\partial^2 \gamma^{\mathrm{r}}}{\partial \pi^2}\right]_{\tau}$, $\gamma^{\mathrm{r}}_{\tau} = \left[\frac{\partial \gamma^{\mathrm{r}}}{\partial \tau}\right]_{\pi}$, $\gamma^{\mathrm{r}}_{\tau\tau} = \left[\frac{\partial^2 \gamma^{\mathrm{r}}}{\partial \tau^2}\right]_{\pi}$, $\gamma^{\mathrm{r}}_{\pi\tau} = \left[\frac{\partial^2 \gamma^{\mathrm{r}}}{\partial \pi \partial \tau}\right]$

A.8 "IAPWS-IF97-Vis"의 절대 점도(Dynamic Viscosity) 기본 공식

IAPWS-IF97-Vis 에서는 기준 상수 값들을 아래와 같이 규정하고 있습니다.

reference temperature:	$T^* = 647.096\ \mathrm{K}$	(1)
reference density:	$\rho^* = 322.0\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$	(2)
reference pressure:	$p^* = 22.064\ \mathrm{MPa}$	(3)
reference viscosity:	$\mu^* = 1.00 \times 10^{-6}\ \mathrm{Pa{\cdot}s}$	(4)

기준 온도와 밀도, 압력은 IAPWS-IF97 의 임계점과 동일하며, 기준 절대 점도 값은 특별한 의미가 없은 임의의 기준 값입니다.

절대 점도를 구하는 기본 공식은 다음과 같습니다.

$$\bar{\mu} = \bar{\mu}_0(\bar{T}) \times \bar{\mu}_1(\bar{T}, \bar{\rho}) \times \bar{\mu}_2(\bar{T}, \bar{\rho}) . \qquad (10)$$

위의 식에서 사용되는 무차원 독립 변수 값들은 다음과 같습니다.

temperature:	$\bar{T} = T/T^*$	(5)
density:	$\bar{\rho} = \rho/\rho^*$	(6)
pressure:	$\bar{p} = p/p^*$	(7)
viscosity:	$\bar{\mu} = \mu/\mu^*$	(8)

공식 (10)에서 첫 번째 항은 희석 가스 한계(Dilute Gas Limit)에서의 점도를 나타내며, 두 번째 항은 유한 밀도(Finite Density)에 기인한 점도 보정을 나타냅니다. 그리고 세 번째 항은 임계점에서의 점도 보정을 나타냅니다.

세 번째 항의 임계점에서의 점도 보정은 임계점 근처에서 매우 작은 범위에서만 그 영향을 미칩니다. 정확히 말하면 임계점에서의 점도는 무한 대 값이지만, 세 번째 항의 영향은 아래 온도 및 밀도 범위 내에서만 확실한 영향을 미칠 뿐이며, 그 외의 범위에서는 해당 공식의 오차 범위보다 작은 영향을 미칩니다.

$$645.91\ \mathrm{K} < T < 650.77\ \mathrm{K}, \quad 245.8\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} < \rho < 405.3\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}} . \qquad (13)$$

IAPWS-IF-Vis 에서는 계산의 간편성과 계산 시간을 고려하여, 산업용으로 계산하는 경우에는 세 번째 항을 1 로 놓고 계산할 것을 권고하고 있습니다. ES_StableIF97 에서도 세 번째 항을 1 로 놓고 절대 점도를 계산합니다.

공식 (10)의 첫 번째 항은 아래 공식 (11)로 구하고, 공식의 계수 값들은 Table 1 과 같습니다.

$$\overline{\mu}_0(\overline{T}) = \frac{100\sqrt{\overline{T}}}{\sum_{i=0}^{3}\frac{H_i}{\overline{T}^i}} \ , \tag{11}$$

with coefficients H_i given in Table 1.

Table 1. Coefficients H_i for $\overline{\mu}_0(\overline{T})$

i	H_i
0	1.67752
1	2.20462
2	0.6366564
3	−0.241605

공식 (10)의 두 번째 항은 아래 공식 (12)로 구하고, 공식의 계수 값들은 Table 2 와 같습니다.

The second factor $\overline{\mu}_1$ represents the contribution to viscosity due to finite density:

$$\overline{\mu}_1(\overline{T},\overline{\rho}) = \exp\left[\overline{\rho}\sum_{i=0}^{5}\left(\frac{1}{\overline{T}}-1\right)^i \sum_{j=0}^{6} H_{ij}\,(\overline{\rho}-1)^j\right], \tag{12}$$

with coefficients H_{ij} given in Table 2. The third factor $\overline{\mu}_2$ represents the critical enhancement of the viscosity.

Table 2. Coefficients H_{ij} for $\overline{\mu}_1(\overline{T}, \overline{\rho})$

i	j	H_{ij}
0	0	5.20094×10^{-1}
1	0	8.50895×10^{-2}
2	0	-1.08374
3	0	-2.89555×10^{-1}
0	1	2.22531×10^{-1}
1	1	9.99115×10^{-1}
2	1	1.88797
3	1	1.26613
5	1	1.20573×10^{-1}
0	2	-2.81378×10^{-1}
1	2	-9.06851×10^{-1}
2	2	-7.72479×10^{-1}
3	2	-4.89837×10^{-1}
4	2	-2.57040×10^{-1}
0	3	1.61913×10^{-1}
1	3	2.57399×10^{-1}
0	4	-3.25372×10^{-2}
3	4	6.98452×10^{-2}
4	5	8.72102×10^{-3}
3	6	-4.35673×10^{-3}
5	6	-5.93264×10^{-4}

Note: Coefficients H_{ij} omitted from Table 2 are identically equal to zero.

A.9 "IAPWS-IF97-ThCond"의 열 전도도(Thermal Conductivity) 기본 공식

IAPWS-IF97-ThCond 에서는 산업용(Industrial Use)과 일반 및 과학용(General and Scientific Use) 2 가지의 공식을 제공하고 있으며, ES_StableIF97 에서는 산업용 공식을 사용하였습니다. 산업용 공식의 기준 상수 값들을 아래와 같이 규정하고 있습니다.

Reference temperature[2]:	$T^* = 647.26$ K	(1)
reference density:	$\rho^* = 317.7$ kg m^{-3}	(2)
reference thermal conductivity:	$\lambda^* = 1$ W m^{-1} K^{-1}	(3)

The two reference constants T^* and ρ^* are close to but not identical with the critical constants.

기준 온도와 밀도는 IAPWS-IF97 의 임계점에 근접하는 값들이지만 동일하지는 않습니다.

열 전도도를 구하는 기본 공식은 다음과 같습니다.

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_0(\bar{T}) + \bar{\lambda}_1(\bar{\rho}) + \bar{\lambda}_2(\bar{T}, \bar{\rho}) \tag{8}$$

위의 식에서 사용되는 무차원 독립 변수 값들은 다음과 같습니다.

Temperature:	$\bar{T} = T/T^*$	(4)
density:	$\bar{\rho} = \rho/\rho^*$	(5)
thermal conductivity:	$\bar{\lambda} = \lambda/\lambda^*$	(6)

위의 공식 (8)에서 첫 번째 항은 희석 가스 한계(Dilute Gas Limit)에서의 열 전도도를 나타내며 아래 공식 (9)로 구합니다.

The function $\bar{\lambda}_0(\bar{T})$ represents the thermal conductivity of steam in the ideal-gas limit and has the form

$$\bar{\lambda}_0(\bar{T}) = \sqrt{\bar{T}} \sum_{k=0}^{3} a_k \bar{T}^k \tag{9}$$

위의 공식 (9)의 계수 값들은 아래 Table B.I 과 같습니다.

Table B.I. Coefficients a_k for $\overline{\lambda}_0$ ($\overline{T}$)

a_0	=	0.010 281 1
a_1	=	0.029 962 1
a_2	=	0.015 614 6
a_3	=	-0.004 224 64

공식 (8)의 두 번째 항은 아래 공식 (10)으로 구합니다.

$$\overline{\lambda}_1(\overline{\rho}) = b_0 + b_1\overline{\rho} + b_2 \exp\left\{ B_1(\overline{\rho} + B_2)^2 \right\} \tag{10}$$

위의 공식 (10)의 계수 값들은 아래 Table B.II 과 같습니다.

Table B.II Coefficients b_i and B_i for $\overline{\lambda}_1$ ($\overline{\rho}$)

b_0	=	-0.397 070	B_1	=	-0.171 587
b_1	=	0.400 302	B_2	=	2.392 190
b_2	–	1.060 000			

공식 (8)의 세 번째 항은 아래 공식 (11)로 구합니다.

$$\bar{\lambda}_2(\bar{T},\bar{\rho}) = \left(\frac{d_1}{\bar{T}^{10}} + d_2\right)\bar{\rho}^{9/5}\exp[C_1(1 - \bar{\rho}^{14/5})]$$
$$+d_3 S\bar{\rho}^{Q}\exp\left[\left(\frac{Q}{1+Q}\right)\left(1 - \bar{\rho}^{1+Q}\right)\right] + d_4\exp\left(C_2\bar{T}^{3/2} + \frac{C_3}{\bar{\rho}^5}\right) \tag{11}$$

Here Q and S are functions of

$$\Delta\bar{T} = |\bar{T} - 1| + C_4, \tag{12}$$

where:

$$Q = 2 + \frac{C_5}{\Delta\bar{T}^{3/5}} \tag{13}$$

$$S = \begin{cases} \dfrac{1}{\Delta\bar{T}} & \text{for } \bar{T} \geq 1 \\ \dfrac{C_6}{\Delta\bar{T}^{3/5}} & \text{for } \bar{T} < 1 \end{cases} \tag{14}$$

위의 공식 (11)의 계수 값들은 아래 Table B.III 과 같습니다.

Table B.III Coefficients d_i and C_i for $\bar{\lambda}_2(\bar{T},\bar{\rho})$

d_1	=	0.070 130 9	C_1	=	0.642 857
d_2	=	0.011 852 0	C_2	=	-4.117 17
d_3	=	0.001 699 37	C_3	=	-6.179 37
d_4	=	-1.0200	C_4	=	0.003 089 76
			C_5	=	0.082 299 4
			C_6	=	10.0932

주) 각 공식들의 유효 범위와 정확도에 대해서는 관련 문헌을 참조 바랍니다.

(끝)