

TASS/SMR 코드에 IAPWS-IF97 증기표 적용

Application of IAPWS-IF97 steam table to TASS/SMR Code

김수형, 김희철
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

TASS/SMR에 사용할 목적으로 증기표 (Steam table) 프로그램을 작성하였다. IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam)에서 작성한 Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97) 식을 사용하였다. 작성된 프로그램은 프로그램 단위별로 검증을 수행하였으며 검증 결과 IAPWS에서 제공한 검증용 표와 같은 값을 얻었다. IAPWS-IF97 식을 사용한 ASME 증기표와 비교한 결과 계산영역 내에서 동일한 결과를 얻었다. 기존의 TASS/SMR에 사용된 식과 비교한 결과 기존 식에 비해서 미분값의 계산이 불연속적인 부분 없이 일관성 있게 계산되는 것으로 나타났다.

Abstract

To calculate water properties in TASS/SMR system thermo-hydraulic analysis code, steam table program was made based on the IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam) industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam (IAPWS-IF97). All program units were verified using the test values of IAPWS. The calculation results were exactly same with the test values. New steam table program was validated using ASME steam table based on the IAPWS-IF97. It showed same calculation results in calculation range. Comparing with the previous TASS/SMR steam table programs, the derivatives of water properties were calculated continuously and consistently.

1. 서론

SMART 및 SMART-P의 성능, 안전해석을 위하여 개발된 TASS/SMR 코드[1]는 IFC-67식을 바탕으로 한 근사 함수(Fitting function)와 Look-up Table을 이용한 증기표 프로그램을 갖고 있다. British Unit을 바탕으로 하고 있으며 계산 범위는 임계점 이하이다. TASS/SMR의 내부 유닛을 SI단위로 전환하면서 증기표 프로그램의 단위를 SI 단위로 바꿀 필요성이 발생하였으며, 또 IFC-67식을 사용함으로써 발생하는 문제를 개선하기 위해 증기표 프로그램을 다시 작성하게 되었다.

새로 작성된 증기표 프로그램은 IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam)의 IAPWS-IF97 (IAPWS Industrial Formulation 1997)[2, 3, 4]을 사용하였다. 이 식은 기존에 TASS/SMR에 사용하는 식에 비하여 계산 가능 범위의 크기가 넓어지고 정확도도 높아졌다.

2. IAPWS-IF97 소개

IFC-67 (The 1967 IFC Formulation for Industrial Use)식은 지난 30여 년 동안 물과 증기의 열역학적 물성치 (Thermodynamic properties)를 구하는데 이용되어왔다. 현재 주로 사용되고 있는 ASME 증기표 (Steam table)는 이 식을 바탕으로 하고 있다. IFC-67 식은 여러 Set의 식으로 이루어져있으며 0.00061~100 MPa, 0.01~800°C 영역을 계산범위로 한다. 이 영역은 6개의 영역으로 나뉘어지며 각 영역별로 계산식이 있다. 각 영역마다 계산식의 형태가 다르며, 계산식의 형태가 복잡하여 프로그램하기 어려운 편이다. 각 영역의 경계에서 물성치를 계산할 때 반복계산을 할 경우 경계치가 일치하지 않아 계산 영역을 바꾸며 진동하는 경우가 발생한다[3].

IFC-67의 문제를 개선하기 위하여 IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam)에서는 1990년에 새로운 식을 개발하기로 결정하였다. 1985년 발행된 Skeleton table[5]을 기초로 하여 과학적 사용을 위한 상관식 (IAPWS-95)[6]이 개발되었고 공업적 사용을 위하여 IAPWS-IF97 (IAPWS Industrial Formulation 1997)[2]이 개발되었다. 대부분의 식이 다음과 같은 간단한 형태의 식으로 제공된다. $z = f(x, y)$ 일 때

$$z = \sum_i^k N_i (ax + b)^{I_i} (cy + d)^{J_i}.$$

IAPWS-IF97은 IFC-67에 비하여 계산속도, 계산 정확도, 영역 경계에서의 불연속 등이 현저히 개선되었다. 속도는 Subcritical 영역에서 5배 이상 증가하였고 Supercritical 영역에서는 3배 이상 증가하였다[3].

IAPWS-IF97은 다섯 개의 영역으로 나누어져 있고 각 영역마다 방정식이 정의되어 있으며 적용 범위는 다음과 같다.

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K} \quad \text{for } P \leq 100 \text{ MPa}$$

$$1073.15 \text{ K} < T \leq 2273.15 \text{ K} \quad \text{for } P \leq 10 \text{ MPa}$$

그림 1은 다섯 개의 영역을 보여준다. 영역 1은 $\sim 350^\circ\text{C}$ 의 과냉액체의 영역이다. 영역 2는 $\sim 800^\circ\text{C}$ 의 과열증기 영역이다. 영역 3과는 압력과 온도의 관계를 나타내는 상관식으로 구분된다. 영역 3은 350°C 보다 온도가 높고 영역 2와 3의 경계에서의 압력보다 높다. 영역 4는 액체-기체의 포화경계이고 임계온도 (374.946°C)까지 확장된 영역이다. 영역 5는 $800\sim 2000^\circ\text{C}$ 영역의 고온증기 영역이다. 영역 1, 2, 3은 압력 $\sim 100 \text{ MPa}$ 를 포함하는 반면 영역 5는 최대압력이 10 MPa 이다. 영역 1, 2, 5에서는 열역학적 물성치를 계산하기 위하여 압력과 온도를 독립변수로 하는 Gibbs free energy 식을 사용한다. 영역 3에서는 밀도와 온도를 독립변수로 하는 Helmholtz free energy 식을 기본식으로 사용한다. 모든 영역에서 열역학적 물성치는 기본식을 적당히 미분하고 결합하여 계산하게 된다. 계산 방법은 표 1에 나타내었다.

기본식을 통하여 계산된 비체적, 엔탈피, 정압비열, 음속, 포화온도는 IAPWS-95식의 값과 비교하여 열역학적 데이터의 오차범위 내에 드는 것으로 평가되었다. 영역 1, 3에서 비평형 (Metastable) 상태의 물성치를 계산할 수 있다. 영역 2에 대해서는 비평형 상태의 물성치를 계산하기 위한 별도의 식이 있다. 각 영역의 경계에서의 값은 일관성 (Consistency)있게 각 영역에서 계산된다.

기본식 외에 Backward equation이 있다. 영역 1과 2에서는 $T(p, h)$, $T(p, s)$ 의 형태이다. 또 $p(h, s)$ 형태의 식도 제공된다[7]. 이 식들은 기본식과 수치적으로 일관성 있게 작성되었으며 $p(h, s)$ 식은 엔탈피와 엔트로피가 물성치로 주어졌을 때 반복계산을 위한 초기치로 유용하게 사용된다. 각 영역별 제공식을 표 2에 나타내었다.

IAPWS-IF97식 이외에 보조식으로 표면장력[9], 열전도도[10], 점도[11] 식을 사용하였고 포화 영역에서의 물과 수증기의 밀도[12]를 사용하였다.

3. 프로그램 구조

기존의 TASS/SMR11의 증기표 계산 프로그램들은 British 단위를 사용하고 있고, 계산할 수 있는 범위가 임계점 이하의 온도와 압력으로 제한되어있다. 또 표를 내삽하는 방법과 식을 이용하는 방법이 혼용되어 있어서 일관성 있는 계산이 부족한 편이고, 계산에 사용되는 미분값이 다르게 나타나는 경우도 있다.

프로그램은 COMPAQ Visual Fortran 6.1을 이용하여 작성되었으며 3개의 Module과 TASS/SMR을 위한 Subroutine으로 구성되어 있다. Module Procedure는 Fortran 90 이상에서 적용이 가능한 것으로 C++의 Class와 비슷한 개념이며 객체지향형 프로그램에 주로 이용된다. Module은 각종 변수, Parameter, Subroutine, Function 등을 정의해 둔 집합이며 다른 프로그램 단위에서 Use 명령어를 이용하여 Module 내의 함수와 변수를 사용하게 된다. 작성된 Module은 다음과 같다.

1) IF97_COEFF

기본식에 사용되는 지수와 계수를 선언한 것이다. 또 미분값 계산에 사용되는 계수를 계산하여 선언하였다.

2) IF97_ELE

IAPWS-IF97의 기본식과 역방향 식, 보조식 등을 작성한 것이다. 기본식에 충실하게 작성되어 있으며 변수의 범위를 판단하지 않고 사용된다. 따라서 입력값이 범위에 맞는가를 판단하는 것은 이 Module을 사용하는 프로그램에서 판단해야한다.

3) IF97

IF97_ELE에 선언된 프로그램들을 이용하여 실제 물성치를 계산하는 프로그램이다. 각 영역별 물성치를 계산하거나 영역 3의 밀도 또는 온도를 반복계산하기 위한 프로그램을 포함하고 있다.

TASS/SMR을 위한 Subroutine은 Module IF97과 IF97_ELE에서 작성된 Subroutine 및

Function을 이용하여 작성하였다. 프로그램의 계산속도를 향상시키기 위하여 계산 속도가 느린 연산자 (Arithmetic operator)의 사용을 피해야 한다[13]. 프로그램은 TASS/SMR에 맞도록 계산 순서를 최적화시켰다. 작성된 Routine을 표 3, 4, 5에 나타내었다.

4. 프로그램 검증

증기표 프로그램은 TASS/SMR과 같은 System의 열역학적 거동을 계산하는 코드에서 거동결과에 영향을 미치는 중요한 프로그램으로 정확하고 일관성 있어야 한다. 프로그래밍된 식들이 제대로 된 값을 계산하는지 검증하고 다른 증기표와 비교하여 검증하였다. IAPWS-IF97 식의 계산을 위해서 변수는 Real 8 Byte로 선언되어야 한다.

가. 검증용 Table

기본식과 보조식들이 제대로 Coding되었는지 확인하도록 IAPWS에서는 검증용 표를 제공하고 있다. 기본식을 검증하기 위하여 여러 가지 물성치를 구하게 된다. 여러 가지 물성치를 구하기 위해서는 기본식의 값과 함께 기본 변수 (압력과 온도 혹은 밀도와 온도)의 첫 번째 및 두 번째 값을 모두 구하여야 한다. 프로그램의 작성 중에 실수가 있다면 어떤 부분에서 오류가 있는 지 쉽게 구분할 수 있다. 표 6에 기본식 검증표 및 계산값을 수록하였다. 역방향식도 IAPWS에서 제공하는 별도의 검증표를 만족하였다.

나. Steam Table 비교

1) ASME Steam Table

2000년에 발간된 ASME International Steam Tables for Industrial Use는 IAPWS-IF97식을 기본으로 하여 작성되었으며 IAPWS-IF97식을 이용한 계산결과를 표와 그래프의 형태로 신고 있다[3]. 작성된 프로그램을 이용하여 같은 형태의 표를 작성하였으며 일부를 표 7에 나타내었다. 표 7은 과열증기 또는 과냉액체의 비체적, 엔탈피, 엔트로피를 적용가능한 범위 내에서 계산한 것을 나타낸 표이다. 음영처리 된 부분은 임계압력 이하의 물을 나타낸다. ASME 증기표 계산 결과와 동일한 값을 얻었다. 이외에도 포화 엔탈피, 포화 비체적, 포화 엔트로피, 정압비열, 음속, 점도, 열전도도, Prandtl 수 등

도 ASME 증기표와 동일한 결과를 얻었다.

2) TASS/SMR

기존의 TASS/SMR에서 사용하고 있는 증기표는 임계압력 및 온도 이하에서 사용이 가능하다. 비교를 위하여 TASS/SMR에서 사용한 증기표 프로그램을 SI 단위를 사용할 수 있도록 수정하였으며 새로 작성된 프로그램과 비교하였다 (표 8).

포화된 물과 증기의 비체적, 엔탈피, 온도는 거의 동일 한 값을 보이거나 미분값은 차이가 나는 부분이 있었다. IAPWS-IF97식을 이용한 계산이 전 영역에 걸쳐서 안정된 계산을 보이는 것으로 나타났다 (그림 2, 3, 4).

과냉액체 및 과열증기 영역에서의 계산결과는 포화액체 및 포화증기의 계산 결과와 마찬가지로 엔탈피, 비체적, 온도 등의 계산은 거의 동일하게 나타났지만 미분값 계산의 경우 포화영역에서 멀어짐에 따라서 오차가 나타났다.

그림 5에 IAPWS-IF97식의 영역 5를 제외한 영역에 대하여 엔탈피, 비체적의 계산값을 나타내었으며 전 영역에서 무리 없이 계산을 수행하였다.

5. 결 론

IAPWS-IF97 식을 적용하기 위하여 필요한 자료를 수집하여 정리하였다. 수집된 자료와 이론적 식을 바탕으로 하여 TASS/SMR에 적용할 프로그램을 작성하였다. 작성된 프로그램은 프로그램 단위별로 검증을 수행하였으며 검증 결과 IAPWS에서 제공한 검증용표와 같은 값을 얻었다. IAPWS-IF97 식을 사용한 ASME 증기표와 비교한 결과 계산영역 내에서 동일한 결과를 얻었다. 기존의 TASS/SMR에 사용된 식과 비교한 결과 기존 식에 비해서 미분값의 계산이 불연속적인 부분 없이 일관성 있게 계산되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

참고문헌

- [1] 심석구 외, "TASS 코드 특정 기술보고서," KAERI/TR-845/97, 한국원자력연구소, 2/13/1996.
- [2] Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, Erlangen, Germany, September 1997
- [3] W. Wagner, J.R. Cooper, A. Dittmann, J. Kijima, H.-J. Kretschmar, A. Kruse, R. Mareš, K. Oguchi, H. Sato, I. Stöcker, O. Šifner, Y. Takaishi, I. Tanishita, J. Trübenbach, and Th. Willkommen, "The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", ASME J. Eng. Gas Turbines & Power, 122, pp. 150-182, 2000
- [4] William T. Parry, James C. Bellows., John S. Gallagher and Allan H. Harvey, ASME International Steam Tables for Industrial Use : Based on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (IAPWS-IF97), CRTD-Vol. 58, ASME Press, 2000
- [5] IAPWS Release on the Skeloton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance (Revision of the Release of 1985), September 1994
- [6] Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, Fredericia, Denmark, September 1996.
- [7] 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, Gaithersburg, Maryland, USA, September 2001.
- [8] Richard E. Sonntag and Gordon J. Van Wylen, Introduction to Thermodynamics : Classical and Statistical, John Wiley & Sons, 1991.
- [9] IAPWS Release on Surface Tension of Ordinary Water Substance, September 1994.
- [10] Revised Release on the IAPS Formulation 1985 for the Thermal Conductivity of Ordinary Water Substance, London, England, September 1998.
- [11] Revised Release on the IAPS Formulation 1985 for the Viscosity of Ordinary

Water Substance, Erlangen, Germany, September, 1997.

[12] Revised Supplementary Release on Saturation Properties of Ordinary Water Substance, St. Petersburg, Russia, September 1992 (IAPWS)

[13] Compaq Visual Fortran Programmer's Guide, August, 2000

표 1. 기본식을 이용한 물성치 계산방법

	Gibbs free energy	Helmholtz free energy
정의	$\gamma(\pi, \tau) = \frac{g(p, T)}{RT}$	$\phi(\delta, \tau) = \frac{f(\rho, T)}{RT}$
비체적 또는 압력	$v = \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T$ $v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi \gamma_\pi$	$p = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$ $\frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = \delta \phi_\delta$
내부에너지	$u = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p - p \left(\frac{\partial g}{\partial p} \right)_T$ $\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau \gamma_\tau - \pi \gamma_\pi$	$u = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho$ $\frac{u(\delta, \tau)}{RT} = \tau \phi_\tau$
엔트로피	$s = - \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p$ $\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau \gamma_\tau - \gamma$	$s = - (\partial f / \partial T)_\rho$ $\frac{s(\delta, \tau)}{R} = \tau \phi_\tau - \phi$
엔탈피	$h = g - T \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_p$ $\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau \gamma_\tau$	$h = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho + \rho \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$ $\frac{h(\delta, \tau)}{RT} = \tau \phi_\tau + \delta \phi_\delta$
	상평형 조건 (Maxwell criterion)	$\frac{p_s}{RT\rho'} = \delta' \phi_\delta(\delta', \tau)$ $\frac{p_s}{RT\rho''} = \delta'' \phi_\delta(\delta'', \tau)$ $\frac{p_s}{RT} \left(\frac{1}{\rho''} - \frac{1}{\rho'} \right) = \phi(\delta', \tau) - \phi(\delta'', \tau)$

참고) δ reduced density, $\delta = \rho/\rho^*$, $d\delta = \frac{d\rho}{\rho^*}$

π reduced pressure, $\pi = p/p^*$, $d\pi = \frac{dp}{p^*}$

τ Inverse reduced temperature, $\tau = T^*/T$, $d\tau = -\frac{\tau}{T} dT$

표 2. IAPWS-IF97에서 제공되는 식

영역	기본식	T (p, h)	T (p, s)	p (h, s)	비고
1	g (p, T)	○	○	○	
2	g (p, T)	○	○	○	역방향 식 (내부적으로 3개 영역)
3	h (p, T)	×	×	×	
4	Saturation Line (P와 T의 관계식)				
5	g (p, T)	×	×	×	

표 3. Module IF97_ELE의 구성

계산값	Function	Subroutine
영역1 기본식	BEQR1, BEQR1_T, BEQR1_TT, BEQR1_X, BEQR1_XT, BEQR1_XX	BEQR1_ALL, BEQR1_T_ALL, BEQR1_WO_F, BEQR1_X_ALL_XT, BEQR1_X_TT
영역2 기본식	BEQR2, BEQR2_T, BEQR2_TT, BEQR2_X, BEQR2_XT, BEQR2_XX	BEQR2_ALL, BEQR2_T_ALL, BEQR2_WO_F, BEQR2_X_ALL_XT, BEQR2_X_TT
영역3 기본식	BEQR3_X	BEQR3_ALL, BEQR3_T_ALL, BEQR3_WO_F, BEQR3_X_ALL, BEQR3_X_ALL_XT, BEQR3_X_T
영역4 기본식	PSAT_T, TSAT_P	DPSAT_T, DTSAT_T, PDTDPSAT_97
영역5 기본식		BEQ_NEW
T (p, h)	T_PH_1, T_PH_2, T_PH_2A, T_PH_2B, T_PH_2C	
T (p, s)	T_PS_1, T_PS_2A, T_PS_2B, T_PS_2C	
p (h, s)	P_HS_1, P_HS_2A, P_HS_2B, P_HS_2C	
경계값	B23_T,P, B2AB_H_S, B2BC_H_P, B2BC_P_H	
포화밀도	DFSAT_T, DGSAT_T	
표면장력	SURF_TENS	
점도	VISC_TD	
열전도도	COND_TD	

표 4. Module IF97의 구성

계산값	Function	Subroutine
엔탈피	H_PT_1, H_PT_2, H_DT_3	DH_PT_1, DH_PT_2, DH_DT_3
비체적	V_PT_1, V_PT_2	DV_PT_1, DV_PT_2, DVPH_PT_1, DVPH_PT_2
압력	P_DT_3	DP_DT_3, DPPH_DT_3
엔트로피	S_XT	
밀도 (영역3)		D_PT_3
온도 (영역3)		D_T_PH_3

표 5. TASS/SMR의 물성치 계산 Routine

계산값	Function	Subroutine
포화 엔탈피	PHFSAT, PHGSAT	PDHFSAT, PDHGSAT
포화 비체적	PVFSAT, PVGSAT	PDVFSAT, PDVGSAT
포화 압력	PTSAT	
포화 온도	TPSAT	PDTSAT
엔탈피	PHSUB, PHSUP	PDHSUB, PDHSUP
비체적	PVSUB, PVSUP, PSPVOL	PDVSUB, PDVSUP, PDSPVOL
온도	PTSUB, PTSUP, PTWAT	PDTSUB, PDTSUP
점도, 열전도도, Prandtl No., 정압비열		MUKPRS, MUKPRW, MUKPRG

표 6. 기본식 검증용 표

	검증용 값	계산값	검증용 값	계산값	검증용 값	계산값
영역 1,식 (52)						
T	300	300	300	300	500	500
p	3	3	80	80	3	3
v	0.100 215 168 E-2	0.100 215 168 E-02	0.971 180 894 E-3	0.971 180 894 E-03	0.120 241 800 E-2	0.120 241 800 E-02
h	0.115 331 273 E3	0.115 331 273 E+03	0.184 142 828 E3	0.184 142 828 E+03	0.975 542 239 E3	0.975 542 239 E+03
u	0.112 324 818 E3	0.112 324 818 E+03	0.106 448 356 E3	0.106 448 356 E+03	0.971 934 985 E3	0.971 934 985 E+03
s	0.392 294 792	0.392 294 792 E+00	0.368 563 852	0.368 563 852 E+00	0.258 041 912 E1	0.258 041 912 E+01
c_p	0.417 301 218 E1	0.417 301 218 E+01	0.401 008 987 E1	0.401 008 987 E+01	0.465 580 682 E1	0.465 580 682 E+01
w	0.150 773 921 E4	0.150 773 921 E+04	0.163 469 054 E4	0.163 469 054 E+04	0.124 071 337 E4	0.124 071 337 E+04
영역 2,식 (53)						
T	300	300	700	700	700	700
p	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	30	30
v	0.394 913 866 E2	0.394 913 866 E+02	0.923 015 898 E2	0.923 015 898 E+02	0.542 946 619 E-2	0.542 946 619 E-02
h	0.254 991 145 E4	0.254 991 145 E+04	0.333 568 375 E4	0.333 568 375 E+04	0.263 149 474 E4	0.263 149 474 E+04
u	0.241 169 160 E4	0.241 169 160 E+04	0.301 262 819 E4	0.301 262 819 E+04	0.246 861 076 E4	0.246 861 076 E+04
s	0.852 238 967 E1	0.852 238 967 E+01	0.101 749 996 E2	0.101 749 996 E+02	0.517 540 298 E1	0.517 540 298 E+01
c_p	0.191 300 162 E1	0.191 300 162 E+01	0.208 141 274 E1	0.208 141 274 E+01	0.103 505 092 E2	0.103 505 092 E+02
w	0.427 920 172 E3	0.427 920 172 E+03	0.644 289 068 E3	0.644 289 068 E+03	0.480 386 523 E3	0.480 386 523 E+03
영역 3,식 (56)						
T	650	650	650	650	750	750
ρ	500	500	200	200	500	500
p	0.255 837 018 E2	0.255 837 018 E+02	0.222 930 643 E2	0.222 930 643 E+02	0.783 095 639 E2	0.783 095 639 E+02
h	0.186 343 019 E4	0.186 343 019 E+04	0.237 512 401 E4	0.237 512 401 E+04	0.225 868 845 E4	0.225 868 845 E+04
u	0.181 226 279 E4	0.181 226 279 E+04	0.226 365 868 E4	0.226 365 868 E+04	0.210 206 932 E4	0.210 206 932 E+04
s	0.405 427 273 E1	0.405 427 273 E+01	0.485 438 792 E1	0.485 438 792 E+01	0.446 971 906 E1	0.446 971 906 E+01
c_p	0.138 935 717 E2	0.138 935 717 E+02	0.446 579 342 E2	0.446 579 342 E+02	0.634 165 359 E1	0.634 165 359 E+01
w	0.502 005 554 E3	0.502 005 554 E+03	0.383 444 594 E3	0.383 444 594 E+03	0.760 696 041 E3	0.760 696 041 E+03
영역 4,식 (57)						
T	p	p				
300	0.353 658 941 E-2	0.353 658 941 E-02				
500	0.263 889 776 E1	0.263 889 776 E+01				
600	0.123 443 146 E2	0.123 443 146 E+02				
p	T	T				
0.1	0.372 755 919 E3	0.372 755 919 E+03				
1	0.453 035 632 E3	0.453 035 632 E+03				
10	0.584 149 488 E3	0.584 149 488 E+03				
영역 5,식 (60)						
T	1500	1500	1500	1500	2000	2000
p	0.5	0.5	8	8	8	8
v	0.138 455 354 E1	0.138 455 354 E+01	0.865 156 616 E-1	0.865 156 616 E-01	0.115 743 146	0.115 743 146 E+00
h	0.521 976 332 E4	0.521 976 332 E+04	0.520 609 634 E4	0.520 609 634 E+04	0.658 380 291 E4	0.658 380 291 E+04
u	0.452 748 654 E4	0.452 748 654 E+04	0.451 397 105 E4	0.451 397 105 E+04	0.565 785 774 E4	0.565 785 774 E+04
s	0.965 408 431 E1	0.965 408 431 E+01	0.836 546 724 E1	0.836 546 724 E+01	0.915 671 044 E1	0.915 671 044 E+01
c_p	0.261 610 228 E1	0.261 610 228 E+01	0.264 453 866 E1	0.264 453 866 E+01	0.285 306 750 E1	0.285 306 750 E+01
w	0.917 071 933 E3	0.917 071 933 E+03	0.919 708 859 E3	0.919 708 859 E+03	0.105 435 806 E4	0.105 435 806 E+04

단위 : T (K), p (MPa), ρ (kg/m^3), v (m^3/kg), h (kJ/kg), u (kJ/kg), s (kJ/kg-K), c_p (kJ/kg-K), w (m/sec)

표 7. 과열증기 및 과냉액체의 물성치

T (°C)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
p = 0.01 MPa			p = 0.02 MPa			p = 0.05 MPa			
0	0.0010002	-0.032023	-0.0002	0.0010002	-0.021835	-0.0002	0.0010002	0.0087278	-0.0002
50	14.867	2592.0	8.1741	0.0010121	209.34	0.7038	0.0010121	209.37	0.7038
100	17.197	2687.4	8.4488	8.5857	2686.2	8.1262	3.4188	2682.4	7.6952
150	19.514	2783.0	8.6892	9.7488	2782.3	8.3680	3.8899	2780.2	7.9412
200	21.826	2879.6	8.9048	10.907	2879.1	8.5842	4.3563	2877.8	8.1591
300	26.446	3076.7	9.2827	13.22	3076.5	8.9624	5.2841	3075.8	8.5386
400	31.064	3279.9	9.6093	15.53	3279.8	9.2892	6.2095	3279.3	8.8658
500	35.68	3489.7	9.8997	17.839	3489.6	9.5797	7.1339	3489.2	9.1565
600	40.296	3706.3	10.1630	20.147	3706.2	9.8431	8.0578	3706.0	9.4200
700	44.912	3929.9	10.4050	22.455	3929.8	10.0860	8.9814	3929.7	9.6625
800	49.528	4160.6	10.6310	24.763	4160.6	10.3110	9.9048	4160.4	9.8882
p = 0.1 MPa			p = 0.2 MPa			p = 0.5 MPa			
0	0.0010002	0.059662	-0.0001	0.0010001	0.16152	-0.0001	0.00099995	0.4670	-0.0001
50	0.0010121	209.41	0.7038	0.0010121	209.50	0.7037	0.0010119	209.76	0.7036
100	1.696	2675.8	7.3610	0.0010434	419.17	1.3069	0.0010433	419.40	1.3067
150	1.9367	2776.6	7.6147	0.95989	2769.1	7.2809	0.0010905	632.27	1.8419
200	2.1725	2875.5	7.8356	1.0805	2870.8	7.5081	0.42503	2855.9	7.0611
300	2.6389	3074.5	8.2171	1.3162	3072.1	7.8940	0.5226	3064.6	7.4614
400	3.1027	3278.5	8.5451	1.5493	3277.0	8.2235	0.61729	3272.3	7.7954
500	3.5656	3488.7	8.8361	1.7814	3487.6	8.5151	0.71095	3484.4	8.0891
600	4.0279	3705.6	9.0998	2.013	3704.8	8.7792	0.8041	3702.5	8.3543
700	4.49	3929.4	9.3424	2.2444	3928.8	9.0220	0.89696	3927.0	8.5977
800	4.952	4160.2	9.5681	2.4755	4159.8	9.2479	0.98967	4158.4	8.8240
p = 1.0 MPa			p = 2.0 MPa			p = 5.0 MPa			
0	0.0009997	0.97582	-0.0001	0.00099919	1.9923	0.0000	0.00099768	5.0325	0.0001
50	0.0010117	210.19	0.7033	0.0010113	211.05	0.7029	0.0010099	213.63	0.7015
100	0.001043	419.77	1.3063	0.0010425	420.53	1.3055	0.001041	422.78	1.3032
150	0.0010902	632.57	1.8414	0.0010895	633.19	1.8403	0.0010875	635.06	1.8369
200	0.206	2828.3	6.6955	0.0011561	852.57	2.3301	0.001153	853.80	2.3254
300	0.25798	3051.7	7.1247	0.1255	3024.3	6.7685	0.045347	2925.6	6.2109
400	0.30659	3264.4	7.4668	0.15121	3248.2	7.1290	0.05784	3196.6	6.6481
500	0.35411	3479.0	7.7640	0.17568	3468.1	7.4335	0.068583	3434.5	6.9778
600	0.40111	3698.6	8.0309	0.19961	3690.7	7.7042	0.078703	3666.8	7.2604
700	0.44783	3924.1	8.2755	0.22326	3918.2	7.9509	0.088515	3900.5	7.5137
800	0.49438	4156.1	8.5024	0.24674	4151.6	8.1791	0.098151	4137.9	7.7459
p = 10.0 MPa			p = 20.0 MPa			p = 50.0 MPa			
0	0.0009952	10.069	0.0003	0.00099035	20.034	0.0005	0.00097673	49.129	-0.0010
50	0.0010078	217.93	0.6992	0.0010035	226.51	0.6946	0.00099139	252.03	0.6810
100	0.0010385	426.55	1.2994	0.0010337	434.10	1.2918	0.0010201	456.87	1.2703
150	0.0010842	638.18	1.8315	0.0010779	644.52	1.8209	0.0010608	664.10	1.7914
200	0.0011482	855.92	2.3177	0.001139	860.39	2.3030	0.0011149	875.31	2.2631
300	0.001398	1343.1	3.2484	0.0013611	1334.1	3.2087	0.0012879	1323.7	3.1214
400	0.026439	3097.4	6.2139	0.0099496	2816.8	5.5525	0.0017309	1874.3	4.0028
500	0.032813	3375.1	6.5993	0.014793	3241.2	6.1445	0.0038894	2722.5	5.1759
600	0.038377	3625.8	6.9045	0.018184	3539.2	6.5077	0.0061087	3252.6	5.8245
700	0.043594	3870.3	7.1696	0.021133	3808.2	6.7994	0.0077176	3614.8	6.2180
800	0.048624	4114.7	7.4087	0.023869	4067.7	7.0534	0.0090741	3926.0	6.5226
p = 100 MPa									
0	0.00095669	95.386	-0.0086						
50	0.00097329	293.92	0.6586						
100	0.0010002	495.04	1.2373						
150	0.0010364	698.01	1.7477						
200	0.0010826	903.51	2.2066						
300	0.0012148	1328.9	3.0215						
400	0.0014432	1791.1	3.7638						
500	0.0018932	2316.2	4.4899						
600	0.0026723	2865.1	5.1580						
700	0.0035462	3330.8	5.6640						
800	0.0043355	3715.2	6.0405						

표 8. TASS/SMR11과 IAPWS-IF97 비교 (엔탈피, 비체적, 온도)

	TASS/SMR11	IAPWS-IF97
$h(p, T)$		
$v(p, h)$		
$T(p, h)$		

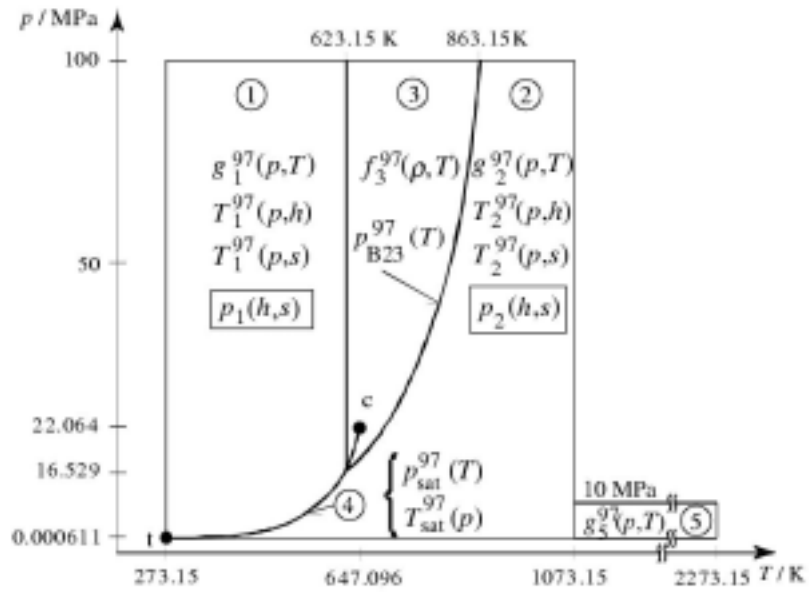
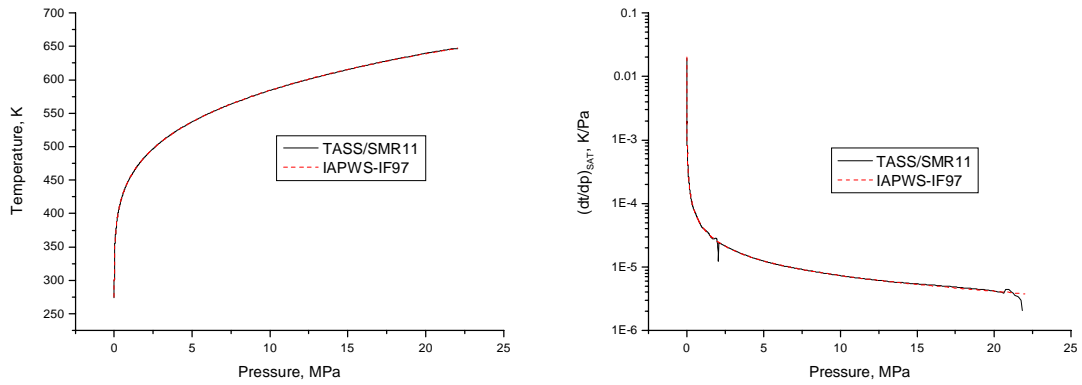


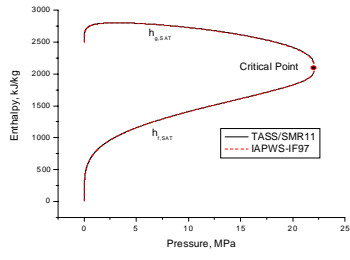
그림 1. IAPWS-IF97의 구조



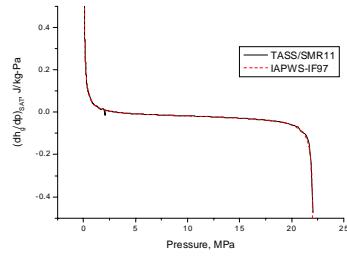
(a) 포화온도

(b) $(dT/dp)_{SAT}$

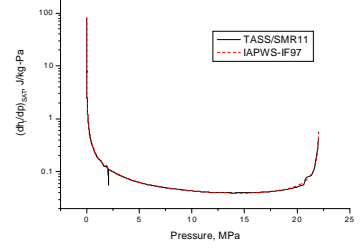
그림 2. 포화온도 및 미분값



(a) 포화엔탈피

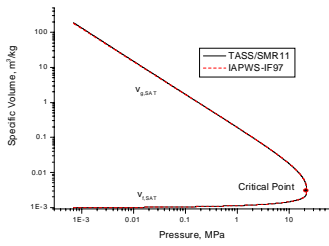


(b) $(dh_l/dp)_{SAT}$

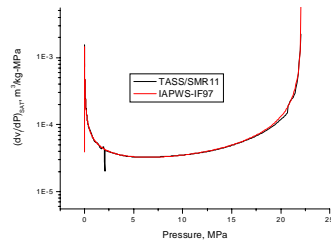


(c) $(dh_g/dp)_{SAT}$

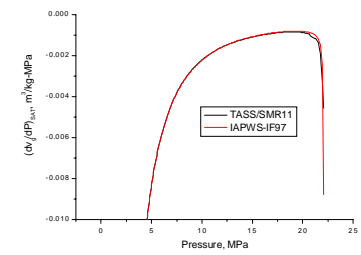
그림 3. 포화엔탈피 및 미분값



(a) 포화비체적

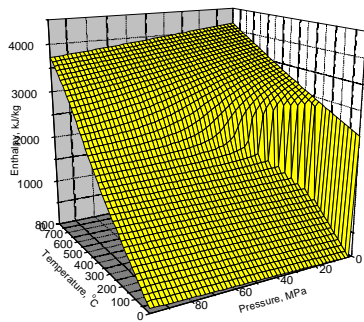


(b) $(dv_l/dp)_{SAT}$

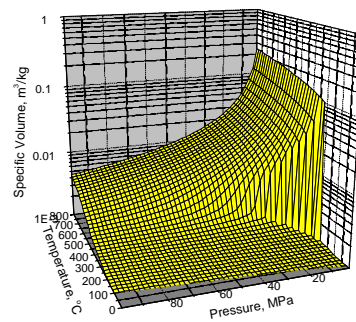


(c) $(dv_g/dp)_{SAT}$

그림 4. 포화비체적 및 미분값



(a) 엔탈피



(b) 비체적

그림 5. 엔탈피, 비체적 계산 결과 ($T = 0 - 800^{\circ}\text{C}$, $p = 0 - 100\text{ MPa}$)