

P.C.를 이용한 물과 증기 열물성치의 전산수식화에 관한 연구

金京錫* · 金坦寧** · 金京根** · 金鎔模***

A Study on the Computerized Formulation of the Thermodynamic Properties of Water and Steam by Personal Computer

K.S. Kim, W.Y. Kim, K.K. Kim, Y.M. Kim

Abstract

Properties of water and steam are very important for the steam ejector CAD program as a subroutine and design of the Shell & Tube type steam condenser. Present formular programs are based on the Skeleton Table of ASME, and are able to calculate the thermodynamic properties of water and steam throughout the whole of the region that extend in pressure from 0 to 1000 bar and temperatrue from 0, 01 to 800°C.

When comparing calculated values for specific volume, enthalpy and entropy with the Skeleton Table 1967 and IAPS Skeleton Table 1984, values fell well within tolerances specified except near the extremes of the range of interest at the critical point and triple point, where deviations were slightly larger.

기호설명

A : 일의 열당량
 f : Gibbs의 자유에너지
 g : Helmholtz의 자유 엔탈피
 h : 엔탈피
 P : 압력
 R : 기체상수
 S : 엔트로피
 T : 온도
 U : 내부에너지
 X : 건도
 β : 환산압력

ϵ : 환산엔트로피
 ζ : 환산자유에너지
 θ : 환산온도
 σ : 환산엔트로피
 φ : 환산자유엔탈피
 χ : 환산비용적

첨 자

c_1 : 임계점
 f : 액상
 g : 기상
 K : 포화선

* 正會員, 韓國海技研修院, 副教授

** 正會員, 韓國海洋大學校, 教授

*** 正會員, 韓國熱流體産業, 代表

- L : 액선
 s : 포화상태
 t : 삼중점
 1~6 : 영역구분

I. 서 론

보일러, 증발 또는 응축을 동반하는 각종 열교환기, 폐열회수장치, 증기 이젝터 등과 같은 열유체기기의 정밀한 열설계에 있어서 전자계산기를 이용하여 유동 및 열전달을 해석하기 위한 반복계산이 필수적으로 요구된다. 이러한 과정에서 물 또는 포화 및 과열증기에 대한 필요한 물성치들을 고정도로 신속하게 파악하는 것은 매우 중요하다.

선진각국에서는 증기 물성치들을 독자적으로 전산수식화하여 대형계산기에 입력해 줌으로써 자국 내에서의 연구 및 실설계에 도움이 되도록 하고 있으며, 측정기술의 진전과 더불어 증기 물성치에 수정이 가하여 질 경우 이를 수시로 해당 전산수식에 반영하고 있는 실정이다. 이에 비하여 우리나라의 경우에는 증기 물성치들에 대한 국가차원의 전산수식화 노력은 거의 전무한 실정이며, 일본의 도움으로 S대학의 대형계산기에 일본기계학회의 증기물성치 프로그램이 수록되어 있는 상태이다.

한편 최근에는 용량과 계산속도면에서 P.C는 괄목할만한 발전을 함으로써 웬만한 정도의 열기기들은 P.C를 이용하여 필요한 열설계를 할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 이러한 점에 착안을 하여 정확도를 거의 희생시키지 않으면서 열물성치들을 P.C 레벨에서 전산수식화함으로써, 열물성치들을 필요한 간격으로 출력한다거나, 가역 및 비가역 상태에서의 단열열낙차를 계산한다거나, 어떤 열설계계산 프로그램의 부프로그램으로 연결할 수 있게 하였다.

증기 물성치에 관한 본격적인 연구는 1921년 미국기계학회에서 연구위원회를 조직함으로써 비롯되었으며, 비슷한 시기에 영국, 독일 및 체코슬라바키아에서도 착수되었다. 대표적인

연구로서 R.B.McClintock의 연구¹와 미국기계학회 산하의 IFC(International Formulation Committee)가 1967년에 제시한 계산식², 또한 1984년 IAPS(International Association for the Properties of Steam)에 의한 전산수식³ 및 임계점(Critical Point) 근처의 열물성치를 보다 정확히 나타낸 Torquato의 연구⁴ 등이 있다. 또한 Harr⁵가 개발한 물성치 전산프로그램은 비교적 계산시간이 긴 단점을 갖고 있으며, Irvine⁷의 연구결과는 1985년에 IAPS가 제시한 Skelton Table⁸에 제시된 값과 매우 일치하는 전산수식을 개발하였다. 또한 최근 M.C. Aggarwal⁹은 1984년의 IAPS의 계산식의 단점을 보완하여 특히 포화수 및 포화증기의 물성치에 관한 전산수식을 발표하고 그 오차에 대한 평가를 하였으며, 임계점 근방에서는 전산수식의 계산오차가 상당히 큼을 밝히고 있다.

본 연구에서는 1967년 IFC의 전산식에 기초하여 압력 0~1000 bar, 온도 0.01~800 °C의 범위에 대하여 P.C를 이용한 전산수식화를 도모하여, 특히 포화상태와 과열증기 상태의 열물성치들의 출력치를 Skeleton Table의 값과 구체적으로 비교하였다.

II. 기초유도함수 및 계산영역의 구분

2.1 기초유도함수

물 및 증기에 대한 모든 물성치들은 그중 2개를 독립변수로 택하면 나머지는 종속변수가 되어 기본적으로 수식에 의해 구할 수 있다. 다음과 같이 Van der Waals 상태방정식,

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1)$$

을 근사적으로 전개시키면,

$$v - b = \frac{RT}{P + (a/v^2)} = \frac{RT}{P} \left[1 - \frac{a}{Pv^2} + \frac{a^2}{P^2v^4} - \frac{a^3}{P^3v^6} + \dots \right] \quad (2)$$

위 식 우변 제2항 이하의 고차항에 대하여 근사적으로 $Pv = RT$ 를 적용시키면 위식은 다

음과 같이 표현할 수 있다.

$$v - b = \frac{RT}{P} - \frac{a}{RT} + \frac{a^2 P}{R^3 T^3} - \frac{a^3 P^2}{R^5 T^5} + \dots$$

$$= \frac{RT}{P} - \sum a_i \frac{P_i^m}{T_i^n} \quad (3)$$

그러므로 실측을 통하여 우변 각항 상수값을 구하면 상태방정식을 정할 수 있으며, 나머지 물성치들은 열역학 일반관계식을 이용하여 기본적으로 구할 수 있다¹⁰⁾.

본 연구에서 채택한 바와 같은 또 한가지의 방법은 Gibbs의 식과 Helmholtz의 식을 이용하여 필요한 물성치들을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 열역학 제1법칙으로부터 내부에너지 및 엔탈피는 각각,

$$dU = T dS - A P dv \quad (4)$$

$$dh = T ds + A v dP \quad (5)$$

또한 Gibbs의 자유에너지 식,

$$f = U - TS \quad (6)$$

를 미분하여 식(4)를 이용하여 정리하면,

$$df = -AP dv - S dT \quad (7)$$

그리고 Helmholtz의 자유엔탈피 식,

$$g = h - TS \quad (8)$$

를 미분하여 식(5)를 이용하여 정리하면,

$$dg = A v dP - S dT \quad (9)$$

가 된다. 그러므로 본 연구에서 구하고자 하는 온도와 압력과의 관계는 식(7)로부터,

$$P = -\frac{1}{A} \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)_T \quad (10)$$

비체적은 식(9), 엔탈피는 식(7)과 식(8)로부터 각각,

$$v = \frac{1}{A} \left(\frac{\partial g}{\partial P} \right)_T \quad (11)$$

$$S = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_v = - \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_P \quad (12)$$

실제의 열물성치들을 전산화하는 경우에는 임계점에서의 값,

$$\begin{aligned} \text{임계압력} & : P_{c1} = 221.2 \text{ bar} \\ \text{임계온도} & : T_{c1} = 374.15 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{임계비용적} & : v_{c1} = 0.00317 \text{ cm}^3/\text{g} \quad (13) \\ \text{임계엔탈피} & : h_{c1} = 70.1204 \text{ kJ/kg} \\ \text{임계엔트리피} & : S_{c1} = 0.1083275143 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

에 대한 비로서 다음과 같은 환산압력 (Reduced Pressure), 환산온도 (Reduced Temperature) 및 환산물성치 (Reduced Property)를 이용한다. 이와 같이 하는 이유는 어느 물질에 대한 열물성치들을 임계치에 대한 값들을 이용하여 무차원화하여 두면, 다른 물질에도 그대로 적용되는 장점을 갖는데, 이를 대응 상태의 원리 (Principle of corresponding states)라고 한다.

식(13)의 값들을 환산치로서 정리하면,

$$\text{환산압력} : \beta = P/P_{c1} = -(\partial \varphi / \partial \chi)_\theta$$

$$\text{환산온도} : \theta = T/T_{c1}$$

$$\text{환산비용적} : \chi = v/v_{c1} \quad (14)$$

$$= (\partial \xi / \partial \beta)_\theta$$

$$\text{환산엔트리피} : \sigma = S/(P_{c1}v_{c1}/T_{c1})$$

$$= -(\partial \xi / \partial \theta)_\beta$$

$$= (\partial \varphi / \partial \theta)_\chi$$

$$\text{환산엔탈피} : \varepsilon = h/(P_{c1}v_{c1}) = \xi + \theta \sigma$$

$$= \varphi + \beta \chi + \theta \sigma$$

단 위식에서,

$$\xi = g/(P_{c1}v_{c1}) = \varepsilon - \theta \sigma$$

$$\varphi = f/(P_{c1}v_{c1}) = \xi - \beta \chi$$

2.2 계산영역의 구분

실제로 절대압력 0~1000 bar, 온도 0.01~800 °C 범위의 압력수, 포화수 및 포화증기 그리고 과열증기의 열물성치를 하나의 수식으로 표현하는 것은 도저히 불가능하고 또한 정확도가 떨어지므로 여러개의 영역으로 구분을 한다.

Fig. 1은 본 연구에서 ASME의 규정에 따른 영역의 구분을 나타낸다. 이를 환산온도 θ 및

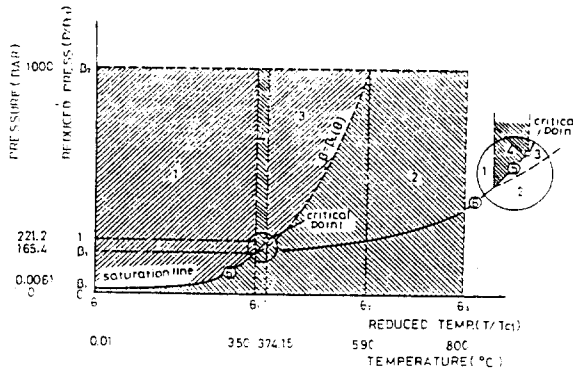


Fig. 1 Illustration of sub-region on the pressure-temperature diagram

Table 1. Reduced temperature and pressure ranges of each sub-region

Temperature range	Pressure range	Sub region
$\theta_1 \leq \theta \leq \theta_1$	$0 < \beta < \beta_k(\theta)$ $\beta = \beta_k(\theta)$ $\beta_k(\theta) < \beta < \beta_2$	2 6 1
$\theta_1 < \theta < 1$	$0 < \beta < \beta_L(\theta)$ $\beta_L(\theta) < \beta < \beta_k(\beta)$ $\beta = \beta_k(\theta)$ $\beta_k(\theta) < \beta < \beta_2$	2 3 5 4
$1 < \theta < \theta_2$	$0 < \beta < \beta_L(\theta)$ $\beta_L(\beta) < \beta < \beta_2$	2 3
$\theta_2 \leq \theta \leq \theta_3$	$0 < \theta < \beta_2$	2

환산압력 β 를 이용하여 도표로 정리한 것을 Table 1에 나타낸다.

이와 같이 하여 전산수식화를 수행할 경우의 가장 큰 어려움은 영역과 영역의 경계선상에서 물성치 값의 불일치성이 상존하는데 특히 영역 1-4, 영역 2-3에서 심하며, Fig. 1에서 예상 가능한 바와 같이 임계점 근방에서는 배정도의 계산을 조심스럽게 행하지 않으면 전혀 틀린 값이 얻어진다. 또한 증기 물성치의 전산수식화는 원래 대형계산기를 이용하는 것을 전제로 하여왔기 때문에 본 연구에서와 같이 P.C를 이용하고자 하는 경우에는 계산속도 및 각 상수들의 유효자리수에 대단한 제한이 가하여진다.

III. 영역별 전산수식화

3.1 포화압력과 온도

먼저 가장 근간이 되는 액상(Liquid phase)과 기상(Vapor phase)이 상평형(Phase equilibrium)상태를 이루는 기액의 경계선 즉 환산포화압력과 환산포화온도의 관계는 다음식과 같다.

$$\beta_k(\theta) = \exp \left\{ \frac{1}{\theta} \frac{\sum_{v=1}^5 k_v (1-\theta)^v}{1+k_6(1-\theta)+k_7(1-\theta)^2} \frac{(1-\theta)}{k_8(1-\theta)^2+k_9} \right\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= -7.691\ 234\ 564 \times 10^0 \\ k_2 &= -2.608\ 023\ 696 \times 10^1 \\ k_3 &= -1.681\ 706\ 546 \times 10^2 \\ k_4 &= 6.423\ 285\ 504 \times 10^1 \\ k_5 &= -1.189\ 646\ 225 \times 10^2 \\ k_6 &= 4.167\ 117\ 320 \times 10^0 \\ k_7 &= 2.097\ 506\ 760 \times 10^1 \\ k_8 &= 10^9 \\ k_9 &= 6 \end{aligned}$$

단 위식에서 상수 $k_1 \sim k_9$ 까지의 값들은 전술한 바와 같이 계산기의 용량에 주로 관계하여 간략히 표현한 상수이다. 위식에서 임의의 포화압력에 대한 포화온도의 계산은 포화압력에 대한 편차를 10^{-14} 까지 수립시켜 반복계산하였다. 위식은 삼중점(Triple point)에서 임계점까지에 대하여 적용이 가능하다.

3.2 영역-1

영역-1은 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 삼중점부터 임계압력 근방까지의 압력수(과냉수)영역이다. 임계치에 대한 각 물성치는 식 (16)~식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} \chi_1 &= v/v_{cl} = (\partial \xi_A / \partial \beta)_\theta \\ &= A_{11} A_5 Z^{-5/17} + \{ A_{12} + A_{13} \theta + A_{14} \theta^2 + A_{15} (a_6 - \theta)^{10} + A_{16} (a_7 + \theta^{19})^{-1} \} \\ &\quad - (a_8 + \theta^{11})^{-1} (A_{17} + 2A_{18} \beta + 3A_{19} \beta^2) \\ &\quad - A_{20} \theta^{18} (a_9 + \theta^2) \{ -3(a_{10} + \beta)^{-4} + a_{11} \} + 3A_{21} (a_{12} - \theta) \beta^2 + 4A_{22} \theta^{-20} \beta^3 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= h/(P_{cl} v_{cl}) = \xi_A + \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \theta \sigma_1 \\ &= \alpha_0 + A_0 \theta - \sum_{\nu=1}^{10} (\nu-2) A_\nu \theta^{\nu-1} \\ &\quad + A_{11} \left[Z \left\{ 17 \left[\frac{Z}{29} - \frac{Y}{12} \right] + 5\theta \frac{Y'}{12} \right\} + a_4 \theta - (a_3 - 1) \theta Y Y' \right] Z^{-5/17} \\ &\quad + \{ A_{12} - A_{14} \theta^2 + A_{15} (9\theta + a_6) (a_6 - \theta)^9 + A_{16} (20\theta^{19} + a_7) (a_7 + \theta^{19})^{-2} \} \beta \\ &\quad - (12\theta^{11} + a_8) (a_8 + \theta^{11})^{-2} (A_{17} \beta + A_{18} \beta^2 + A_{19} \beta^3) \\ &\quad + A_{20} \theta^{18} (17a_9 + 19\theta^2) \{ (a_{10} + \beta)^{-3} + a_{11} \beta \} + A_{21} a_{12} \beta^3 + 21 A_{22} \theta^{-20} \beta^4 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= S/(P_{cl} v_{cl} / T_{cl}) = -(\partial \xi_A / \partial \theta)_\beta - \alpha_1 \\ &= -\alpha_1 + A_0 \ln \theta - \sum_{\nu=2}^{10} (\nu-1) A_\nu \theta^{\nu-2} + A_{11} \left[\left\{ \frac{5}{12} Z - (a_3 - 1) Y \right\} Y' + a_4 \right] Z^{-5/17} \\ &\quad + \{ -A_{13} - 2A_{14} \theta + 10A_{15} (a_6 - \theta)^9 + 19A_{16} (a_7 + \theta^{19-2} \theta^{18}) \beta \\ &\quad - 11(a_8 + \theta^{11})^{-2} \theta^{10} (A_{17} \beta + A_{18} \beta^2 + A_{19} \beta^3) + A_{20} \theta^{17} (18a_9 + 20\theta^2) \{ (a_{10} + \beta)^{-3} + a_{11} \beta \} \\ &\quad + A_{21} \beta^3 + 20A_{22} \theta^{-21} \beta^4 \end{aligned} \quad (18)$$

식(16)~식(18)에서 ξ_A 및 이에 관련된 상수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \xi_A(\theta, \beta) &= A_0 \theta (1 - \ln \theta) + \sum_{\nu=1}^{10} A_\nu \theta^{\nu-1} + A_{11} \left[\frac{17}{29} Z - \frac{17}{1} Y \right] Z^{12/17} \\ &\quad + \{ A_{12} + A_{13} \theta + A_{14} \theta^2 + A_{15} (a_6 - \theta)^{10} + A_{16} (a_7 + \theta^{19})^{-1} \} \beta - (a_8 + \theta^{11})^{-1} (A_{17} \beta + A_{18} \beta^2 + \\ &\quad A_{19} \beta^3) - A_{20} \theta^{18} (a_9 + \theta^2) \{ (a_{10} + \beta)^{-3} + a_{11} \beta \} + A_{21} (a_{12} - \theta) \beta^3 + A_{22} \theta^{-20} \beta^4 \end{aligned}$$

$$Z = Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta) / 12$$

$$Y = 1 - a_1 \theta^2 - a_2 \theta^{-6}$$

$$Y' = -2a_1 \theta + 6a_2 \theta^{-7}$$

$A_0 = 6.824\ 687\ 741 \times 10^3$	$a_1 = 8.438\ 375\ 405 \times 10^{-1}$
$A_1 = -5.422\ 063\ 673 \times 10^2$	$a_2 = 5.362\ 162\ 162 \times 10^{-4}$
$A_2 = -2.096\ 666\ 205 \times 10^4$	$a_3 = 1.720\ 000\ 000 \times 10^0$
$A_3 = 3.942\ 286\ 787 \times 10^4$	$a_4 = 7.342\ 278\ 489 \times 10^{-2}$
$A_4 = -6.733\ 277\ 739 \times 10^4$	$a_5 = 4.975\ 858\ 870 \times 10^{-2}$
$A_5 = 9.902\ 381\ 028 \times 10^4$	$a_6 = 6.537\ 154\ 300 \times 10^{-1}$
$A_6 = -1.093\ 911\ 744 \times 10^5$	$a_7 = 1.150\ 000\ 000 \times 10^{-6}$
$A_7 = 8.590\ 841\ 667 \times 10^4$	$a_8 = 1.510\ 800\ 000 \times 10^{-5}$
$A_8 = -4.511\ 168\ 742 \times 10^4$	$a_9 = 1.418\ 800\ 000 \times 10^{-1}$
$A_9 = 1.418\ 138\ 926 \times 10^4$	$a_{10} = 7.002\ 735\ 165 \times 10^{-1}$
$A_{10} = -2.017\ 271\ 113 \times 10^3$	$a_{11} = 2.995\ 284\ 926 \times 10^{-4}$
$A_{11} = 7.982\ 692\ 717 \times 10^0$	$a_{12} = 2.040\ 000\ 000 \times 10^{-1}$
$A_{12} = -2.616\ 571\ 843 \times 10^{-2}$	

$A_{13} = 1.522\ 411\ 790 \times 10^{-3}$	$\alpha_0 = 0$
$A_{14} = 2.284\ 279\ 054 \times 10^{-2}$	$\alpha_1 = 0$
$A_{15} = 2.421\ 647\ 003 \times 10^2$	
$A_{16} = 1.269\ 716\ 088 \times 10^{-10}$	
$A_{17} = 2.074\ 838\ 328 \times 10^{-7}$	$v_{c1} = 0.00317\ m^3/kg$
$A_{18} = 2.174\ 020\ 350 \times 10^{-8}$	$P_{c1}v_{c1} = 70\ 120.4\ J/kg$
$A_{19} = 1.105\ 710\ 498 \times 10^{-9}$	$P_{c1}v_{c1}/T_{c1} = 108.327\ 5143\ J/kg\ K$
$A_{20} = 1.293\ 441\ 934 \times 10^1$	
$A_{21} = 1.308\ 119\ 072 \times 10^{-5}$	
$A_{22} = 6.047\ 626\ 338 \times 10^{-14}$	

3.3. 영역-2

영역-2는 임계점 근처를 제외한 삼중점의 온도 0.01 °C로 부터 800 °C까지의 과열증기 영역을 나타낸다. 이 영역은 특히 증기 터빈

을 설계하거나 보일러, 과열기(Super heater) 증기노즐 등을 설계하는 경우에 가장 중요하게 쓰이는 영역이다. 각 물성치는 식(19) ~ 식(21)과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_2 &= v/v_{c1} = (\partial \xi_B / \partial \beta)_\theta \\
 &= I_1 \theta / \beta - \sum_{\mu=1}^5 \mu \beta^{\mu-1} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{2(\mu, \nu)} - \sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2)\beta^{1-\mu} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{2(\mu, \nu)}}{\left\{ \beta^{2-\mu} \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\lambda} x^{x(\mu, \lambda)} \right\}^2} \\
 &\quad + 11 \left(\frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 B_{9\nu} X^\nu
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_2 &= h/(P_{c1} v_{c1}) = \xi_B + \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \theta \sigma_2 \\
 &= \alpha_0 + B_0 \theta - \sum_{\nu=1}^5 B_{0\nu} (\nu-2) \theta^{\nu-1} - \sum_{\mu=1}^5 \beta^\mu \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} \beta_{\mu\nu} (1+z(\mu, \nu) b \theta) X^{2(\mu, \nu)} \\
 &\quad - \sum_{\mu=0}^8 \left[\frac{\sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{2(\mu, \nu)} \left[1+z(\mu, \nu) b \theta - \frac{b \theta \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} x(\mu, \lambda) b_{\mu\nu} X^{x(\mu, \lambda)}}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\nu} X^{x(\mu, \lambda)}} \right]}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\nu} X^{x(\mu, \lambda)}} \right] \\
 &\quad + \beta \left(\frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 \left[\left\{ 1 + \theta \left(\frac{10\beta_L'}{\beta_L} + \nu b \right) \right\} B_{9\nu} X^\nu \right]
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_2 &= S/(P_{c1}v_{c1}/T_{c1}) = -(\sigma \xi_B / \sigma \theta)_\beta - \alpha_1 \\
 &= -\alpha_1 - I_1 \ln \beta + B_0 \ln \theta - \sum_{\nu=1}^5 (\nu-1) B_{0\nu} \theta^{\nu-2} - b \sum_{\mu=1}^5 \beta^\mu \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} z(\mu, \nu) B_{\mu\nu} x^{2(\mu, \nu)} \\
 &\quad - b \sum_{\mu=6}^8 \left[\frac{\sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{2(\mu, \nu)} \left[z(\mu, \nu) - \frac{\sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} x(\mu, \lambda) b_{\mu\lambda} X^{2(\mu, \lambda)}}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu, \lambda)}} \right]}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu, \lambda)}} \right] \\
 &\quad + \beta \left(\frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 \left[\left\{ \frac{10\beta_L'}{\beta_L} + \nu b \right\} B_{9\nu} x^\nu \right]
 \end{aligned} \tag{21}$$

식 19) ~ 식(21)의 ξ_B 및 관련 상수들은 다음과 같다.

$$\xi_B(\theta, \beta) = I_1 \theta \ln \beta + B_0 \theta (1 - \ln \theta) + \sum_{\nu=1}^3 B_{0\nu} \theta^{\nu-1}$$

$$- \sum_{\mu=1}^5 \left\{ \beta^\mu \sum_{\nu=1}^{n,\mu} B_{\mu\nu} X^{2\mu,\nu} \right\} - \sum_{\mu=6}^8 \frac{\sum_{\nu=1}^{n,\mu} B_{\mu\nu} X^{2\mu,\nu}}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l,\mu} b_{\mu\lambda} X^{1,\mu,\lambda}}$$

$$+ \beta \left(\frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 B_{9\nu} X^\nu$$

$I_0 = 1,574\,373\,327 \times 10^1$
 $L_1 = -3,417\,061\,978 \times 10^1$
 $L_2 = 1,931\,380\,707 \times 10^1$

$X = \exp\{b(1 - \theta)\}$
 $\beta_L = \beta_L(\theta) = L_0 + L_1\theta + L_2\theta^2$
 $\beta_{L'} = \beta_{L'}(\theta) = L_1 + 2L_2\theta$
 $I_1 = 4,260\,321\,148 \times 10^0$

μ	n, μ	$\xi(\mu, \nu)$			l, μ	$\chi(\mu, \lambda)$		μ
		$\nu=1$	$\nu=2$	$\nu=3$		$\lambda=1$	$\lambda=2$	
1	2	13	3					1
2	3	18	2	1				2
3	2	18	10					3
4	2	25	14					4
5	3	32	28	24				5
6	2	12	11		1	14		6
7	2	24	18		1	19		7
8	2	24	14		2	54	27	8

$B_0 = 1,683\,599\,274 \times 10^1$
 $B_{01} = 2,856\,067\,796 \times 10^1$
 $B_{02} = -5,438\,923$
 $B_{03} = 4,330\,662\,834 \times 10^{-1}$
 $B_{04} = -6,547\,711\,697 \times 10^{-1}$
 $B_{05} = 8,565\,182\,058 \times 10^{-2}$
 $B_{11} = 6,670\,375\,918 \times 10^{-2}$
 $B_{12} = 1,388\,983\,801 \times 10^0$
 $B_{21} = 8,390\,104\,328 \times 10^{-2}$
 $B_{22} = 2,614\,670\,893 \times 10^{-2}$
 $B_{23} = -3,373\,439\,453 \times 10^{-2}$
 $B_{31} = 4,520\,918\,904 \times 10^{-1}$
 $B_{32} = 1,069\,036\,614 \times 10^{-1}$
 $B_{41} = -5,975\,336\,707 \times 10^{-1}$
 $B_{42} = -8,847\,535\,804 \times 10^{-2}$
 $B_{51} = 5,958\,051\,609 \times 10^{-1}$
 $B_{52} = -5,159\,303\,373 \times 10^{-1}$
 $B_{53} = 2,075\,021\,122 \times 10^{-1}$

$B_{61} = 1,190\,610\,271 \times 10^{-1}$
 $B_{62} = -9,867\,174\,132 \times 10^{-2}$
 $B_{71} = 1,683\,998\,803 \times 10^{-1}$
 $B_{72} = -5,809\,438\,001 \times 10^{-2}$
 $B_{81} = 6,552\,390\,126 \times 10^{-3}$
 $B_{82} = 5,710\,218\,649 \times 10^{-4}$
 $B_{90} = 1,936\,587\,558 \times 10^2$
 $B_{91} = -1,388\,522\,425 \times 10^3$
 $B_{92} = 4,126\,607\,219 \times 10^3$
 $B_{93} = -6,508\,211\,677 \times 10^3$
 $B_{94} = 5,745\,984\,054 \times 10^3$
 $B_{95} = 2,693\,088\,365 \times 10^3$
 $b = 7,633\,333\,333 \times 10^{-1}$
 $b_{61} = 4,006\,073\,948 \times 10^{-1}$
 $b_{71} = 8,636\,081\,627 \times 10^{-2}$
 $b_{72} = -8,636\,081\,627 \times 10^{-2}$
 $b_{81} = -8,532\,322\,921 \times 10^{-1}$
 $b_{82} = 3,460\,208\,861 \times 10^{-1}$

3.4 영역-3

영역-3은 임계온도 이상의 기상과 액상이 구분되지 않는 영역으로, 전산수식화 및 실제의 계산수행에 있어서 가장 오차가 크게 발생하는 위치이다. 특히 이 영역은 임계압 이상의

보일러 열설계에서는 매우 중요하다고 생각된다. 여기서 비윤리적인 환산압력을 나타내는 환산비용적으로 된 수식을 반복계산에 의하여 가정값과의 편차를 10^{-14} 까지 수렴시켜 구하였다. 각 환산물성치는 식(22)~식(24)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \beta_3 &= P/P_1 = -(\partial \varphi_c / \partial \chi)_\theta \\
 &= - \left\{ C_{01} + \sum_{\nu=2}^{11} (1-\nu) C_{0\nu} \chi^{-\nu} + C_{012} \chi^{-1} \right\} \\
 &\quad - \left\{ C_{11} + \sum_{\nu=2}^6 (1-\nu) C_{1\nu} \chi^{-\nu} + C_{17} \chi^{-1} \right\} (\theta - 1) - \left\{ C_{21} + \sum_{\nu=2}^7 (1-\nu) C_{2\nu} \chi^{-\nu} + C_{28} \chi^{-1} \right\} \\
 &\quad (\theta - 1)^2 - \left\{ C_{31} + \sum_{\nu=1}^9 (1-\nu) C_{3\nu} \chi^{-\nu} + C_{310} \chi^{-1} \right\} (\theta - 1)^3 + 5C_{41} \chi^{-6}, \theta^{-23} (\theta - 1) \\
 &\quad - 6\chi^5 \sum_{\nu=0}^4 C_{6\nu} \theta^{-2-\nu}
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_3 &= h/(P_{c1} v_{c1}) = \varphi_c + \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \theta \sigma_3 + \chi \beta_3 \\
 &= \alpha_0 - \left\{ (C_{00} - C_{012} - C_{50}) - C_{11} \chi + \sum_{\nu=2}^{11} \nu C_{0\nu} \chi^{1-\nu} - \sum_{\nu=1}^6 C_{1\nu} \chi^{1-\nu} + (C_{012} - C_{17}) \ln \chi \right\} \\
 &\quad + \left\{ (-C_{17} - C_{50}) - (C_{11} + 2C_{21}) \chi + \sum_{\nu=1}^6 (\nu - 1) C_{1\nu} \chi^{1-\nu} - 2 \sum_{\nu=2}^7 C_{2\nu} \chi^{1+\nu} \right. \\
 &\quad \left. - 2C_{28} \ln \chi \right\} (\theta - 1) + \left\{ -C_{28} - (2C_{21} + 3C_{31}) \chi + \sum_{\nu=2}^7 (\nu - 2) C_{2\nu} \chi^{1-\nu} - 3 \sum_{\nu=2}^9 C_{3\nu} \chi^{1-\nu} \right. \\
 &\quad \left. - (C_{28} + 3C_{310}) \ln \chi \right\} (\theta - 1)^2 + \left\{ -C_{310} - 3C_{31} \chi + \sum_{\nu=2}^9 (\nu - 3) C_{3\nu} \chi^{1-\nu} \right. \\
 &\quad \left. - 2C_{310} \ln \chi \right\} (\theta - 1)^3 + (23C_{40} + 28C_{41} \chi^{-5}) \theta^{-22} - (24C_{40} + 29C_{41} \chi^{-5}) \theta^{-23} \\
 &\quad + \chi^6 \sum_{\nu=0}^4 \{ (\nu - 3) C_{6\nu} \theta^{-2-\nu} \} - \sum_{\nu=0}^8 \{ C_{7\nu} (1 + \nu \theta) (\theta - 1)^\nu \}
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_3 &= S/(P_{c1} v_{c1}/T_{c1}) = -(\partial \varphi_c / \partial \theta)_\chi - \alpha_1 \\
 &= -\alpha_1 - \left\{ C_{11} \chi + \sum_{\nu=2}^6 C_{1\nu} \chi^{1-\nu} + C_{17} \ln \chi + C_{50} \right\} - 2 \left\{ C_{21} \chi + \sum_{\nu=2}^7 C_{2\nu} \chi^{1-\nu} + C_{28} \ln \chi \right\} \\
 &\quad (\theta - 1) - 3 \left\{ C_{31} \chi + \sum_{\nu=2}^9 C_{3\nu} \chi^{1-\nu} + C_{310} \ln \chi \right\} (\theta - 1)^2 \\
 &\quad + (C_{40} + C_{41} \chi^{-5}) (22\theta^{-23} - 23\theta^{-24}) - C_{50} \ln \theta + \chi^6 \sum_{\nu=0}^4 \{ (\nu + 2) C_{6\nu} \theta^{-3-\nu} \} \\
 &\quad - \sum_{\nu=0}^8 \{ (\nu + 1) C_{7\nu} (\theta - 1)^\nu \}
 \end{aligned} \tag{24}$$

식(22)~식(24)의 φ_c 및 관련상수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varphi_c(\theta, \chi) = & C_{00} + C_{01}\chi + \sum_{\nu=2}^{11} C_{0\nu}\chi^{1-\nu} + C_{012}\ln\chi + \left\{ C_{11}\chi + \sum_{\nu=2}^6 C_{1\nu}\chi^{1-\nu} + C_{17}\ln\chi \right\} (\theta - 1) \\ & + \left\{ C_{21}\chi + \sum_{\nu=2}^7 C_{2\nu}\chi^{1-\nu} + C_{28}\ln\chi \right\} (\theta - 1)^2 + \left\{ C_{31}\chi + \sum_{\nu=2}^9 C_{3\nu}\chi^{1-\nu} + C_{310}\ln\chi \right\} \\ & (\theta - 1)^3 + (C_{40} + C_{41}\chi^{-5})\theta^{-23}(\theta - 1) - C_{50}\theta \ln\theta + \chi^6 \sum_{\nu=0}^4 C_{6\nu}\theta^{-2-\nu} + \sum_{\nu=0}^8 C_{7\nu}(\theta - 1)^{\nu+1} \end{aligned}$$

$C_{00} = -6.839\ 900\ 000 \times 10^0$	$C_{31} = 7.948\ 418\ 420 \times 10^{-6}$
$C_{01} = -1.722\ 604\ 200 \times 10^{-2}$	$C_{32} = 8.088\ 597\ 470 \times 10^1$
$C_{02} = -7.771\ 750\ 390 \times 10^0$	$C_{33} = -8.361\ 533\ 800 \times 10^1$
$C_{03} = 4.204\ 607\ 520 \times 10^0$	$C_{34} = 3.586\ 365\ 170 \times 10^1$
$C_{04} = -2.768\ 070\ 380 \times 10^0$	$C_{35} = 7.518\ 959\ 540 \times 10^0$
$C_{05} = 2.104\ 197\ 070 \times 10^0$	$C_{36} = -1.261\ 606\ 400 \times 10^1$
$C_{06} = -1.146\ 495\ 880 \times 10^0$	$C_{37} = 1.097\ 174\ 620 \times 10^0$
$C_{07} = 2.231\ 380\ 850 \times 10^{-1}$	$C_{38} = 2.121\ 454\ 920 \times 10^{-1}$
$C_{08} = 1.162\ 503\ 630 \times 10^{-1}$	$C_{39} = -5.465\ 295\ 660 \times 10^{-1}$
$C_{09} = -8.209\ 005\ 440 \times 10^{-2}$	$C_{310} = 8.328\ 754\ 130 \times 10^0$
$C_{010} = 1.941\ 292\ 390 \times 10^{-2}$	$C_{40} = 2.759\ 717\ 760 \times 10^{-6}$
$C_{011} = -1.694\ 705\ 760 \times 10^{-3}$	$C_{41} = -5.090\ 739\ 850 \times 10^{-4}$
$C_{012} = -4.311\ 577\ 033 \times 10^0$	$C_{50} = 2.106\ 363\ 320 \times 10^2$
$C_{11} = 7.086\ 360\ 850 \times 10^{-1}$	$C_{60} = 5.528\ 935\ 335 \times 10^{-2}$
$C_{12} = 1.236\ 794\ 550 \times 10^1$	$C_{61} = -2.336\ 365\ 955 \times 10^{-1}$
$C_{13} = -1.203\ 890\ 040 \times 10^1$	$C_{62} = 3.697\ 071\ 420 \times 10^{-1}$
$C_{14} = 5.404\ 374\ 220 \times 10^0$	$C_{63} = -2.596\ 415\ 470 \times 10^{-1}$
$C_{15} = -9.938\ 650\ 430 \times 10^{-1}$	$C_{64} = 6.828\ 087\ 013 \times 10^{-2}$
$C_{16} = 6.275\ 231\ 820 \times 10^{-2}$	$C_{70} = -2.571\ 600\ 553 \times 10^2$
$C_{17} = -7.747\ 430\ 160 \times 10^0$	$C_{71} = -1.518\ 783\ 715 \times 10^2$
$C_{21} = -4.298\ 850\ 920 \times 10^0$	$C_{72} = 2.220\ 723\ 208 \times 10^1$
$C_{22} = 4.314\ 305\ 380 \times 10^1$	$C_{73} = -1.802\ 039\ 570 \times 10^2$
$C_{23} = -1.416\ 193\ 130 \times 10^1$	$C_{74} = 2.357\ 096\ 220 \times 10^3$
$C_{24} = 4.041\ 724\ 590 \times 10^0$	$C_{75} = -1.462\ 335\ 698 \times 10^4$
$C_{25} = 1.555\ 463\ 260 \times 10^0$	$C_{76} = 4.542\ 916\ 630 \times 10^4$
$C_{26} = -1.665\ 689\ 350 \times 10^0$	$C_{77} = -7.053\ 556\ 432 \times 10^4$
$C_{27} = 3.248\ 811\ 580 \times 10^{-1}$	$C_{78} = 4.381\ 571\ 428 \times 10^4$
$C_{28} = 2.936\ 553\ 250 \times 10^1$	

3.5 영역-4

영역-4는 임계상태 근방의 압력수로서 온도 374.15~350 °C 범위이다. 환산비용적은 영역-

3과 같은 방법으로 구했으며, 각 물성치는 식 (25)~식(27)과 같다.

$$\begin{aligned}\beta_4 &= P/P_{c1} = \beta_3 - (\partial \varphi_D / \partial \chi)_\theta \\ &= \beta_3 + \sum_{\mu=3}^4 \sum_{\nu=0}^4 \nu D_{\mu\nu} Y^\mu \chi^{-\nu-1} - \gamma^{32} \sum_{\nu=0}^2 \nu D_{5\nu} \chi^{\nu-1}\end{aligned}\quad (25)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_4 &= h/(P_{c1}v_{c1}) = \varepsilon_3 + \varphi_D + (\sigma_4 - \sigma_3)\theta + (\beta_4 - \beta_3)\chi \\ &= \varepsilon_3 + \sum_{\mu=3}^4 \sum_{\nu=0}^4 D_{\mu\nu} \{(1-\mu+\nu)\gamma + \mu/(1-\theta_1)\} \gamma^{\mu-1} \chi^{-\nu} \\ &\quad - \gamma^{31} \sum_{\nu=0}^2 D_{5\nu} \{(31+\nu)\gamma - 32/(1-\theta_1)\} \chi^\nu\end{aligned}\quad (26)$$

$$\begin{aligned}\sigma_4 &= S/(P_{c1}v_{c1}/T_{c1}) = \sigma_3 - (\partial \varphi / \partial \theta)_\chi \\ &= \sigma_3 + \frac{\sum_{\mu=3}^4 \sum_{\nu=0}^4 \mu D_{\mu\nu} \gamma^{\mu-1} \chi^{-\nu} + 32\gamma^{31} \sum_{\nu=0}^2 D_{5\nu} \chi^\nu}{1-\theta_1}\end{aligned}\quad (27)$$

식(25)~식(27)의 φ_D 및 관련상수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\varphi_D(\theta, \chi) &= \sum_{\mu=3}^4 \sum_{\nu=0}^4 D_{\mu\nu} \gamma^\mu \chi^{-\nu} + \gamma^{32} \sum_{\nu=0}^2 D_{5\nu} \chi^\nu \\ \gamma &= (1-\theta)/(1-\theta_1) \\ \theta_1 &= 9.626\ 911\ 787 \times 10^{-1}\end{aligned}$$

$D_{30} = -1.717\ 616\ 747 \times 10^6$	$D_{42} = 1.996\ 765\ 362 \times 10^0$
$D_{31} = 3.526\ 389\ 875 \times 10^0$	$D_{43} = -6.661\ 557\ 013 \times 10^{-1}$
$D_{32} = -2.690\ 899\ 373 \times 10^0$	$D_{44} = 8.270\ 860\ 589 \times 10^{-2}$
$D_{33} = 9.070\ 982\ 605 \times 10^{-1}$	$D_{50} = 3.426\ 663\ 535 \times 10^{-4}$
$D_{34} = -1.138\ 791\ 156 \times 10^{-1}$	$D_{51} = -1.236\ 521\ 258 \times 10^{-3}$
$D_{40} = 1.301\ 023\ 613 \times 10^0$	$D_{52} = 1.155\ 018\ 309 \times 10^{-3}$
$D_{41} = -2.642\ 777\ 743 \times 10^0$	

3.6 영역-5 및 영역-6

영역-5와 영역-6은 상평형 상태로서 포화액과 포화증기의 Gibbs의 자유에너지가 같다. 단 영역-5는 임계점 근방으로서 계산상 오차가 발생하기 쉬운 영역이며, 영역-6은 그 이하의 압력에서 삼중점까지의 영역이다.

식(16)등과 같이 영역-1에서의 열물성치의 환산식으로부터 포화액선 상태의 열물성치를 구하고, 같은 방법으로 영역-2 및 영역-3에서의 관련식에서 포화증기 상태의 열물성치를 먼저 구하여야 한다. 이렇게 하면 건도

(Dryness fraction) X_{df} 를 이용하면 습증기 영역에서의 값들을 구할 수 있다.

즉 환산비용적, 환산엔탈피 및 환산엔탈피를 나타내는 식들은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\chi_{5,6} &= v/v_{c1} \\ &= X_{df}(\chi_g - \chi_f) + \chi_f\end{aligned}\quad (28)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{5,6} &= S/(P_{c1}v_{c1}/T_{c1}) \\ &= X_{df}(\sigma_g - \sigma_f) + \sigma_f\end{aligned}\quad (29)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{5,6} &= h/(P_{c1}v_{c1}) \\ &= X_{df}(\varepsilon_g - \varepsilon_f) + \varepsilon_f\end{aligned}\quad (30)$$

IV. 계산결과 및 오차평가

본 연구에서는 앞장에서 기술한 바와 같이 각 영역별로 열물성치의 전산수식들을 정리한 프로그램을 부프로그램으로 하여 주프로그램과 연결하였다.

이렇게 함으로써 열물성치 자체를 어떤 지정하는 범위에 대하여 임의의 간격으로 출력하거나, 증기 이젝터(Steam ejector), 증기 응축기, 공기조화사이클 검토 등의 열설계 프로그램에 연계가 가능하였다. 실제로 본 연구에서 개발된 열물성치 프로그램을 참고문헌¹¹에서 보는 바와같이 증기 이젝터 설계용 CAD프로그램에 부프로그램으로 연결함으로써 거의 완벽하고 정밀한 증기 이젝터 설계가 이루어졌다.

실제 현장의 열설계 경우에는, 예를 들어 대개 진공압력에 대하여는 mmHg의 단위로, 대기압 근방에서는 0.1 kg/cm^2 간격으로 열물성치들을 필요로 하는 경우가 많다. 또한 포화온도 또는 포화압력을 기준으로 필요한 물성치들을 출력하거나, 사용하고자 할 때 난위세도 어려가지로 다룰 수 있다. 그러므로 이러한 점들은 주프로그램에서 모두 수용되도록 하여야 한다.

본 연구에서는 전 영역에 대하여 전산수식화한 결과들 중 포화영역은 실제의 1985년 Skeleton Table에 제시된 값들을 기준으로 비교하였으며, 압력수 및 과열증기 영역은 1967년 Skeleton Table에 제시된 값들을 기준으로 비교하여 어느 정도 오차를 갖는가를 다음과 같이 평가하였다.

Fig. 2는 전 영역에 대한 등압선과 등건도선을 1967년 Skeleton table에 따른 T-S선도상에 계산에 의한 결과를 나타낸다. 먼저 포화수 및 포화증기에 대하여 Fig. 3에는 포화압력의 오차를, Fig. 4에는 비용적인 오차를, Fig. 5에는 엔탈피의 오차를, Fig. 6에는 엔트로피의 오차를 각각 나타낸다.

또한 Fig. 7에는 1967년 Skeleton table 값을 기준으로 한 압력수 및 과열증기의 비용적 오차를, Fig. 8에는 엔탈피 오차를, Fig. 9에는

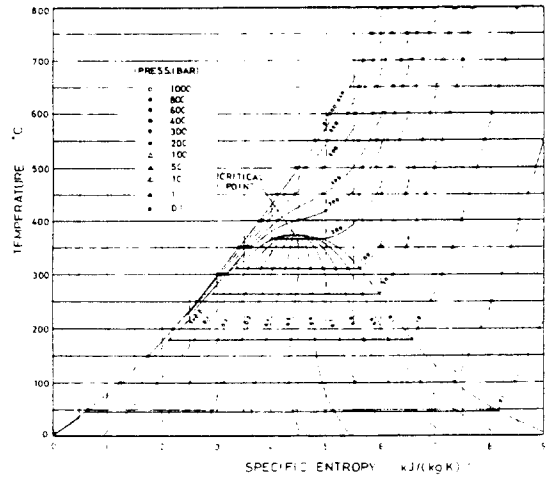


Fig. 2 Plot of iso-pressure and iso-dryness fraction on T-S chart of ASME 1967 Skeleton Table

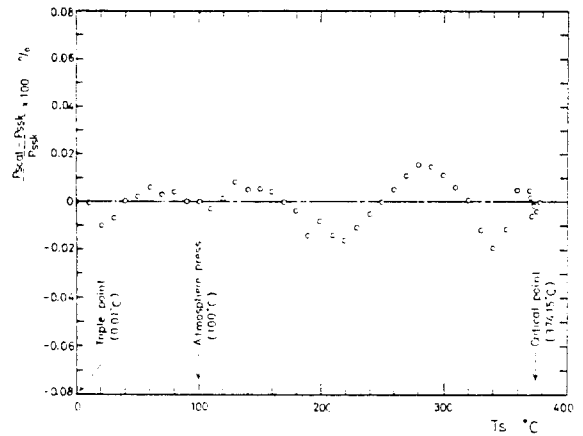


Fig. 3 Relative error of saturation pressure to the given by IAPS 1985 Skeleton Table

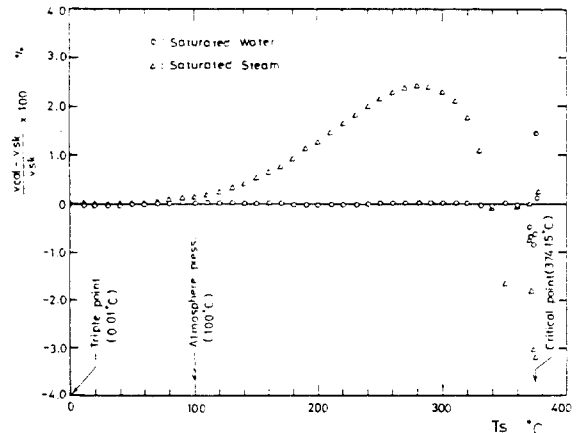


Fig. 4 Relative error of specific volume of saturated steam and water to the given by IAPS 1985 Skeleton Table

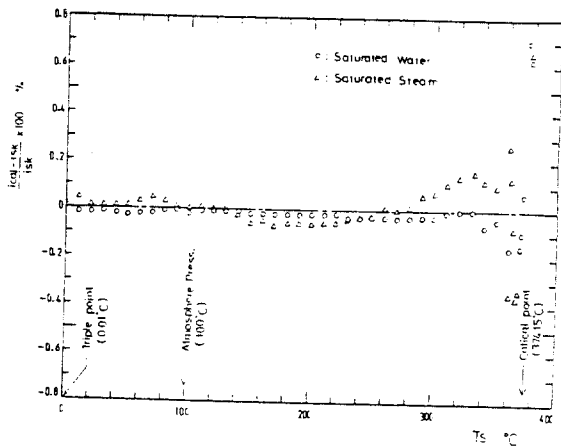


Fig. 5 Relative error of enthalpy of saturated steam and water to the given by IAPS 1985 Skeleton Table

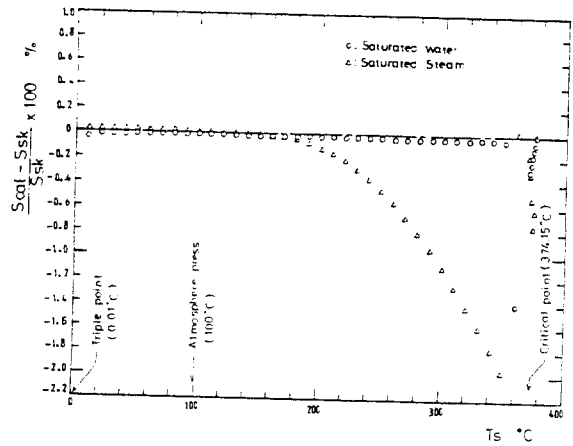


Fig. 6 Relative error of entropy of saturated steam and water to the given by IAPS 1985 Skeleton Table

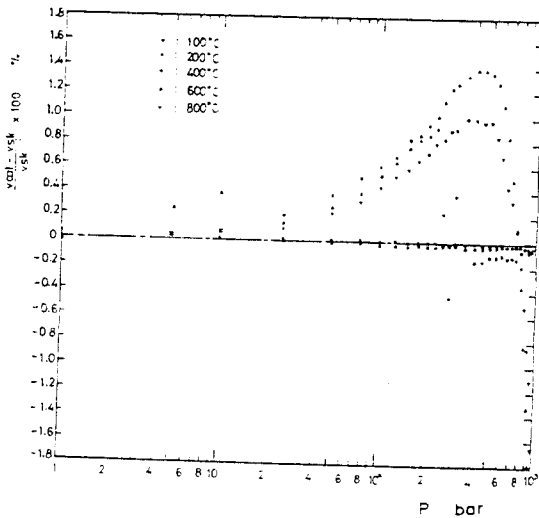


Fig. 7 Relative error of specific volume of pressed water and superheated steam to the given by ASME 1967 Skeleton Table

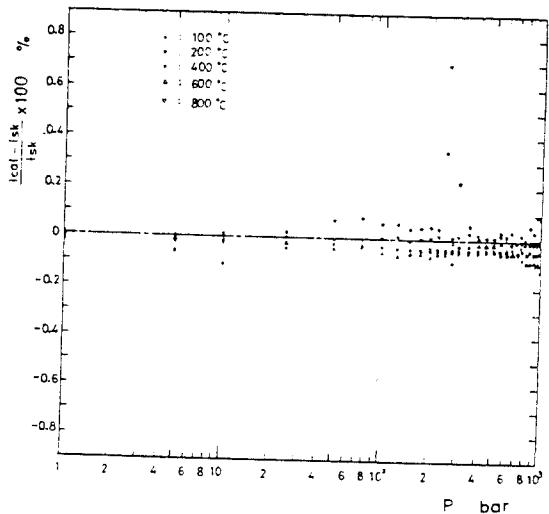


Fig. 8 Relative error of enthalpy of pressed water and superheated steam to the given by ASME 1967 Skeleton Table

엔트러피의 오차를 각각 나타낸다. Table 2. 는 전영역에 대하여 각 물성치별 오차를 나타낸다.

물 및 증기의 열물성치들을 전산수식화 하는데에는 임계점 근방인 영역-3의 초임계압 영역과 영역-5의 아임계압 상태의 습증기 영역에서 대단히 주의 깊은 계산을 요한다. 이러한 점은 임계점의 특성에 기인하는 것으로서 대형 계산을 이용할 경우에도 마찬가지이다. 그리

고 3절의 전산수식들에서 사용된 여러가지의 상수들은 불과 10단위 유효숫자이다. 그러므로 특히 본 연구에서와 같이 P.C상에서 전산수식화를 도모하는 경우에는 이러한 유효숫자의 제한에서 오는 오차가 계산이 진전되면서 증폭되는 경우가 있으므로 더욱더 세심한 주의를 하였다. 이러한 점을 감안하면서 Fig. 3~Fig. 6의 결과를 고찰하면, 저진공 및 임계점 근처에서 약간의 오차가 있지만 평균적으로는 매우

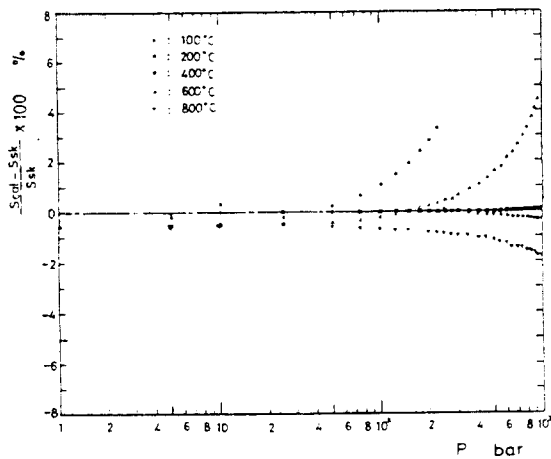


Fig. 9 Relative error of entropy of pressed water and superheated steam to the given by ASME 1967 Skeleton Table

양호한 결과를 얻음을 확인하였다. 전 영역의 오차를 나타낸 Fig. 7~Fig. 9에서는 영역-2와 영역-3의 경계선에서 약간의 불일치가 나타남을 알 수 있으나, Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로는 만족할 결과를 얻을 수 있었다.

V. 결 론

본 연구를 통하여 1967년 IFC의 계산식에 기초한 압력 0~1000 bar, 온도 0.01~800 °C의 범위에 대한 물과 증기의 열물성치의 계산 수직화를 도모하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 대형 컴퓨터용의 물과 증기와 열물성치 프로그램을 P.C를 이용하여 임의의 범위에 대

Table 2 Relative errors of thermodynamic properties of each sub-region to the given by ASME 1967 Skeleton table

	Sub-region	Maximum error(%)	Minimum error(%)	Average error(%)	
Specific Volume	1	0.094	0.000	0.026	
	2	0.435	0.000	0.123	
	3	0.439	0.003	0.110	
	4	0.183	0.004	0.062	
	5	water	1.459	0.002	0.235
		steam	3.223	0.000	1.647
Average 0.469%	6	water	0.035	0.000	0.029
		steam	2.405	0.000	1.006
Specific Enthalpy	1	0.114	0.001	0.032	
	2	0.129	0.000	0.034	
	3	0.210	0.005	0.092	
	4	0.068	0.001	0.026	
	5	water	0.707	0.073	0.035
		steam	0.367	0.077	0.247
Average 0.039%	6	water	0.073	0.002	0.001
		steam	0.156	0.000	0.051
Specific Enthalpy	1	0.033	0.013	0.025	
	2	5.608	0.006	1.044	
	3	1.423	0.019	0.452	
	4	0.496	0.045	0.018	
	5	water	1.414	0.063	0.0962
		steam	0.749	0.019	0.678
Average 0.575%	6	water	0.041	0.013	0.011
		steam	1.971	0.001	0.375

하여 임의의 간격으로 출력할 수 있는 전산수식을 개발하였다.

(2) 임계점 근방과 영역-2와 영역-3의 경계선에서 약간의 불일치가 나타남을 알 수 있으나 전체적으로 만족할만한 결과를 얻었다.

(3) 본 연구에서 개발된 열물성치 프로그램을 증기 이젝터 설계용 CAD프로그램에 부프로그램으로 연결함으로써 거의 완벽하고 정밀한 증기 이젝터 설계 프로그램을 개발하였다.

본 물성치 프로그램은 증기응축기, 공기조화사이클 검토 등의 열설계에 적용되어 질 것이다.

사 사

끝으로 본 연구는 산학협동재단과 한국열유체산업의 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 밝히며, 동재단 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. R.B. McClintock and G.J. Silvestri, Formulations and Iterative Procedures for the Calculation of Properties of Steam, ASME, New York, 1968.
2. The 1967 IFC Formulation for Industrial Use: Formulation of the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance, International Formulation Committee, 1967.2.
3. J.H. Keenan, F.G. Keyes, P.G. Hill J.G. Moore, Steam Tables Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid and Solid Phases, John Wiley Inc., New York, 1978.
4. The IAPS Formulation 1984 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for Scientific and General Use, The 10th International Conference on the Properties of Steam, Moscow, U.S.S.R, 1984.9.
5. S. Torquato and G. Stell, Latent Heat of Vaporization of a Fluid, J. Phys. Chem., 85, 3029, 1984.
6. L. Harr, J.S. Gallagher and G.S. Kell, NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C., 1984.
7. Jr.T.F. Irvine and P.E. Liley, Steam and Gas Tables with Computer Equation, Academic Press Inc., Orlando, Florida, 1984.
8. The IAPS Skeleton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance, issued by the IAPS, 1985.
9. M.C. Aggarwal, Computerized Formulation for the Thermodynamic Properties of Saturated Water based on the IAPS Formulation 1984, Convection Heat Transfer and Transport Processes of the Winter Annual Meeting of ASME, 116, 21, 1989.12.
10. 金京根, 熱力學, 효성문화사, 419, 1990, 8.
11. 韓國熱體産業, Steam Ejector CAD Menu., 1992.