

## 濕蒸氣 物性値의 電算數式化에 關한 研究

吳 喆 · 金鍾憲 · 金金茂

### A study on the computerized formulation for the thermodynamic properties of wetted steam

*OH C., Kim J.H., Kim K. M.*

#### Abstract

Properties of wetted steam are very important for the design and control of air conditioning system.

IAPS formulation for the thermodynamic properties of steam and water has been developed with the high speed digital computer or super computer from the triple point to critical point.

Present formulation results by the personal computer for the specific volume, enthalpy, and entropy of wetted steam are well fitted with the IFC Skeleton Table 1967 data and IAPS Skeleton Table 1985 within the reasonable tolerance.

#### 사용기호

f	: Helmholtz 함수(에너지 식)	kcal
g	: Gibbs 함수(엔탈피 식)	kcal/kg
h	: 엔탈피	kcal/kg
P	: 압력	bar
R	: 기체상수	kgm/°C Kmol

\* 저자소개미착

S	: 엔트로피	kcal/kg ℃
T	: 온도	℃
v	: 비체적	m <sup>3</sup> /kg
γ	: 잠열	kcal/kg
β	: 환산압력 (=P/P <sub>cl</sub> )	
ε	: 환산엔탈피 (=h/P <sub>clvcl</sub> )	
ζ	: 환산자유엔탈피 (=ε - θσ = g/(P <sub>clvcl</sub> ))	
θ	: 환산온도 (=T/T <sub>cl</sub> )	
σ	: 환산엔트로피 (=S/(P <sub>clvcl</sub> /T <sub>cl</sub> ))	
χ	: 환산체적 (=v/v <sub>cl</sub> )	
φ	: 환산자유에너지 (=ζ - βχ = f/P <sub>clvcl</sub> )	

(첨 자)

c	: 임계점
f	: 포화수
g	: 포화증기
s	: 포화상태
t	: 3중점



## 1. 서 론

근래에 개발되고 있는 공기조화용 흡수식 냉동기와 증기분사식 냉동기는 냉매로서 물을 사용하고 있다. 공기조화용 흡수식 냉동기의 경우에는 증발기의 압력 7mmHg, 응축기의 압력 70mmHg와 같이 저진공 상태에서 상태변화가 일어나며, 냉동능력을 계산하려면 포화증기, 포화수 및 습증기의 엔탈피가 각각 필요하다. 또한, 증기 이젝터를 응용한 증기 분사식 냉동기에서는 저압증기 및 물의 물성치는 시스템 설계를 위하여 대단히 중요하다.

일반적으로 과열증기, 포화증기, 습증기 및 물은 압력에 따라 매우 심하게 변하기 때문에, 증기의 각종 물성치를 압력변화에 대하여 상세하게 증기표를 이용하는 데에는 많은 제약이 있다. 그리고 실제의 각종 공기조화장치 및 교환기 등의 반복계산과정에 의한 열설계나 성능예측을 위하여서는 정확하고 상세한 증기 물성치를 필요로 하는데, 이러한 경우 증기 물성치의 전산화는 절실하게 필요로 한다.

한편 최근에는 용량과 계산속도면에서 PC는 괄목할만한 발전을 함으로써 어느 정도의 열기기들은 이를 이용하여 열설계를 할 수 있게 되었다.

과거의 증기 물성치의 계산식에 관한 연구로는 R. B. McClintock 등의 연구와 1967년 미국기계학

회(ASME : American Society of Mechanical Engineers)의 IFC 계산식<sup>1)</sup>, J. H. Keenan 등의 연구<sup>2)</sup>, 1984년 IAPS(Internation Association for the Properties of Steam)의 계산식 및 임계점 근처의 열물 성치를 정확히 나타낸 Torquato 등의 연구<sup>4)</sup>가 있다. 그외 Harr에 의한 1984 IAPS의 증기 물성치 계 산식을 기초로한 전산프로그램은 계산시간이 긴 단점을 남겼으며<sup>5)</sup>, Irvine 등은 1985년 IAPS의 Skeleton증기표에 아주 접근하는 연구결과를 발표하였다<sup>6)</sup>. 그 후 M. C. Aggawal은 1984년 IAPS계 산식의 단점을 보완하여 압력수와 과열증기 영역을 제외한 포화상태의 물성치 계산식을 발표하였 다.

본 연구에서는 상태에 따라 복잡한 변화를 나타내는 비체적, 엔트로피, 엔탈피 등의 증기 물성치 를, 특히 포화영역에 대하여 전산수식화 함으로써, 공기조화용 열기기 및 증기 응축기와 같이 포화 증기 또는 습증기를 사용하는 열기기의 열설계에 기초가 되도록 하였다. 또한 이와 같은 전산수식 화로 원하는 단위계 및 온도간격으로 증기 물성치의 출력이 가능하게 됨으로써 보다 효과적인 열설 계에 응용될 수 있는 것이다.

## 2. 열물성치의 계산

### 2.1 열역학 일반관계식과 기초함수

본 연구에서는 온도와 압력의 함수인 Gibbs식과 체적과 온도의 함수인 Helmholtz식과 같은 열역 학 일반관계식을 이용하여, 필요한 증기 물성치를 구하였다.

먼저 Gibbs의 자유에너지  $f$ 는,

$$f = U - TS \quad (1)$$

Helmholtz의 자유엔탈피  $g$ 는,

$$g = h - TS \quad (2)$$

포화압력, 비체적, 엔트로피 그리고 엔탈피를 나타내면 각각 다음과 같다.

$$P = -\frac{1}{A} \left( \frac{\partial g}{\partial v} \right)_T \quad (3)$$

비체적은,

$$v = -\frac{1}{A} \left( \frac{\partial g}{\partial p} \right)_T \quad (4)$$

엔트로피는, 정적변화( $dv=0$ )일 경우와, 정압변화( $dP=0$ )인 경우에, 엔트로피(S)에 대하여 정리

하면,

$$S = -\left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_v = -\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p \quad (5)$$

다음으로 엔탈피는 다음식과 같이 표현된다.

$$h = g + TS = f + APv + TS \quad (6)$$

식(1)에 상응하는 증기에 관한 Gibbs의 자유엔탈피 및 식(2)에 상응하는 Helmholtz의 자유에너지는 각각 다음식과 같다.

Gibbs의 자유엔탈피식 :

$$\begin{aligned} \zeta_A(\theta, \beta) = & A_0\theta(1 - \ln\theta) + \sum_{v=1}^{10} A_v\theta^{v-1} + A_{11}\left(\frac{17}{29}Z - \frac{17}{12}Y\right)Z^{12/17} \\ & + \{A_{12} + A_{13}\theta + A_{14}\theta^2 + A_{15}(a_6 - \theta)^{10} + A_{16}(a_1 + \theta^{19})^{-1}\}\beta \\ & - (a_5 + \theta^{11})^{-1}\{A_{17}\beta + A_{18}\beta^2 + A_{19}\beta^3\} - A_{20}\theta^{10}(a_9 + \theta^2)(a_{10} + \beta)^{-3} \\ & + a_{11}\beta + A_{21}(a_{12} - \theta)\beta^3 + A_{22}\theta^{-20}\beta^4 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z &= Y + (a_3Y^2 - 2a_4\theta + 2a_5\beta)^{1/2} \\ Y &= 1 - a\theta^2 - a_2\theta^{-5} \end{aligned}$$

Helmholtz의 자유에너지식 :

$$\begin{aligned} \psi_c(\theta, \chi) = & C_{00} + C_{01}\chi + \sum_{v=2}^{11} C_{0v}\chi^{1-v} + C_{012}\ln\chi + \left\{C_{11}\chi + \sum_{v=2}^6 C_{1v}\chi^{1-v} + C_{17}\ln\chi\right\}(\theta - 1) \\ & + \left\{C_{21}\chi + \sum_{v=2}^7 C_{2v}\chi^{1-v} + C_{26}\ln\chi\right\}(\theta - 1)^2 \\ & + \left\{C_{31}\chi + \sum_{v=2}^9 C_{3v}\chi^{1-v} + C_{310}\ln\chi\right\}(\theta - 1)^3 + (C_{40} + C_{41}\chi^{-5})\theta^{-23}(\theta - 1) \\ & + C_{50}\theta\ln\theta + \chi^6 \sum_{v=0}^4 C_{6v}\theta^{-2-v} + \sum_{v=0}^8 C_{7v}(\theta - 1)^{v+1} \end{aligned} \quad (8)$$

Table 1. Values of the critical point

임계압력	$P_{c1} = 221.2 \text{ bar}$
임계온도	$T_{c1} = 374.15 \text{ }^\circ\text{C}$
임계비용적	$v_{c1} = 0.00317 \text{ cm}^3/\text{g}$
임계엔탈피	$i_{c1} = 70.1204 \text{ kJ/kg}$
임계엔트로피	$S_{c1} = 0.1083275143 \text{ kJ/kg K}$

식(7) 및 식(8)에 있어서의 상수들은 참고문헌<sup>1)</sup>에 상세히 수록되어 있다.

실제의 열물성치들을 전산화하는 경우에는 임계점에서의 값은 Table. 1과 같다.

각 임계점의 값에 대한 비로서 다음과 같은 환산압력(Reduced Pressure), 환산온도(Reduced

Temperature) 및 환산물성치(Reduced Property)를 이용한다. 이와 같이 하는 이유는 어떤 물질에 대한 열물성치들을 임계치에 대한 값들을 이용하여 무차원화 하여두면, 다른 물질에도 그대로 작용되는 장점을 갖는데, 이를 대응상태의 원리(Principle of Corresponding States)라고 한다<sup>8)</sup>.

Table. 1의 값들을 환산치로서 정리하면,

$$\text{환산압력} : \beta = P/P_{cl} = -(\partial\phi / \partial\chi) \quad (9)$$

$$\text{환산온도} : \theta = T/T_{cl} \quad (10)$$

$$\text{환산비체적} : \chi = v/v_{cl} = -(\partial\zeta / \partial\beta) \quad (11)$$

$$\text{환산엔탈피} : \varepsilon = i(P_{cl} v_{cl}) = \zeta + \theta\sigma = \phi + \beta\chi + \theta\sigma \quad (12)$$

$$\text{환산엔트리피} : \sigma = S/(P_{cl}v_{cl}/T_{cl}) = -(\partial\zeta / \partial\theta) = (\partial\phi / \partial\theta) \quad (13)$$

단 위식에서,

$$\zeta = H/P_{cl}v_{cl} = \varepsilon - \theta\sigma \quad (14)$$

$$\phi = B/P_{cl}v_{cl} = \zeta - \beta\chi$$

## 2. 2 전산수식

본 연구에서는 포화온도와 포화압력의 관계, 습증기에 비체적, 엔트리피, 엔탈피를 전산수식화 하는데 연구의 목적이 있다. 그러므로 이를 위하여서는 포화수와 포화증기의 값들을 구하여야 하는데, 전산수식화에 관한 Fig. 1을 참조하면, 습증기의 열물성치를 구하기 위해서는 결국에는 모든 영

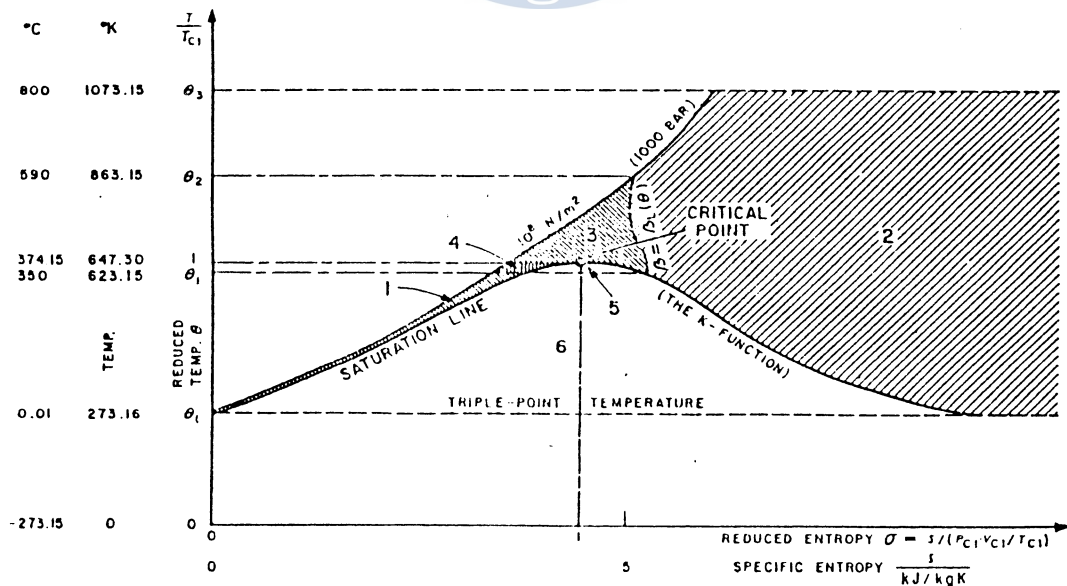


Fig. 1. Illustration of subregions on the temperature entropy diagram.

역에 관한 전산수식들을 알 필요가 있다. Fig. 1과 같이 6개의 영역으로 나누는 근본적 이유는 복잡한 물성치들을 전영역에 걸쳐 한개의 식으로 표현이 불가능하기 때문이다.

본 연구에서는 특히 영역 - 1과 영역 - 4의 전산수식화의 결과로부터 포화액선상의 값들을 구하고, 영역 - 2와 영역 - 3의 결과로부터 포화증기 상태의 값들을 구하여, 궁극적으로 습증기의 값들을 구하는데 연구의 목적이 있다.

각 영역을 기술하면 다음과 같다.

### 2.2.1 영역 - 1의 전산수식화

영역 - 1은 삼중점 (0.01℃, 0.0061 bar)을 포함한 영역으로서, 압력 0.0061 - 1000bar까지와 포화선으로 둘러싸인 영역이다.

#### ① 비체적 :

$$\begin{aligned} \chi_1 &= v / v_d = (\partial \zeta_A / \partial \beta)_\theta \\ &= A_{11} a_5 Z^{5/17} + \{A_{12} + A_{13} \theta + A_{14} \theta^2 + A_{15} (a_6 - \theta)^{10} + A_{16} (a_7 + \theta^{19})^{-1}\} \\ &\quad - (a_8 + \theta^{11})^{-1} (A_{17} + 2A_{18} \beta + 3A_{19} \beta^2) \\ &\quad - A_{20} \theta^{18} (a_9 + \theta^2) \{-3(a_{10} + \beta)^{-4} + a_{11}\} + 3A_{21} (a_{12} - \theta) \beta^2 + 4A_{22} \theta^{-20} \beta^3 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$Z = Y + (aY^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{1/2}$$

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

#### ② 엔트로피 :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= s / (p_d v_d / T_d) = -(\partial \zeta_A / \partial \theta)_\beta - \alpha_1 \\ &= \alpha_1 + A_{01} \ln \theta - \sum_{v=2}^{10} (v-1) A_{0v} \theta^{v-2} + A_{11} \left[ \left\{ \frac{5}{12} Z - (a_3 - 1) Y \right\} Y' + a_4 \right] Z^{5/17} \\ &\quad + \{-A_{13} - 2A_{14} \theta + 10A_{15} (a_6 - \theta)^9 + 19A_{16} (a_1 + \theta^{19})^{-2} \theta^{18}\} \beta \\ &\quad - 11(a_8 + \theta^{11})^{-2} \theta^{10} (A_{17} \beta + A_{18} \beta^2 + A_{19} \beta^3) \\ &\quad + A_{20} \theta^{17} (18a_9 + 20\theta^2) \{(a_{10} + \beta)^{-3} + a_{11}\} + A_{21} \beta^3 + 20A_{22} \theta^{-21} \beta^4 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$Y' = -20a_1 \theta - 6a_2 \theta^{-7}$$

#### ③ 엔탈피 :

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

### 2.2.2 영역 -2의 전산수식화

영역 -2는 0.01 - 800°C, 압력 0 - 1000bar까지와 포화증기선 우측의 과열증기 영역이다.

① 비체적 :

$$\begin{aligned}
 \chi_z &= v / v_{cl} = (\partial \zeta / \partial \beta)_\theta \\
 &= I_1 \theta / \beta - \sum_{\mu=1}^5 \mu \beta^{\mu-1} \sum_{v=1}^{n(\mu)} B_{\mu v} X^{z(\mu, v)} - \sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2) \beta^{-\mu} \sum_{v=1}^{n(\mu)} B_{\mu v} X^{z(\mu, v)}}{\left\{ \beta^{2-\mu} \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)} \right\}^2} \\
 &\quad + 11 \left( \frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{v=0}^6 B_{9v} X^v
 \end{aligned} \tag{18}$$

여기서,

$$X = \exp\{b(1 - \theta)\}$$

$$\beta_L = \beta_L(\theta)$$

② 엔트로피 :

$$\begin{aligned}
 \sigma_2 &= s / (p_d v_d / T_d) = -(\partial \zeta_B / \partial \theta)_\beta - \alpha_1 \\
 &= -\alpha_1 - l_1 l_n \beta + B_0 l_n \theta - \sum_{v=1}^5 (v-1) B_{0v} \theta^{v-2} - b \sum_{\mu=1}^5 \beta^\mu \sum_{v=1}^{n(\mu)} z(\mu, v) B_{\mu v} X^{z(\mu, v)} \\
 &\quad - b \sum_{\mu=6}^8 \frac{\left[ \sum_{v=1}^{n(\mu)} B_{\mu v} X^{z(\mu, v)} \left( z(\mu, v) - \frac{\sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} x(\mu, \lambda) b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)}}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)}} \right) \right]}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)}} \\
 &\quad + \beta \left( \frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{v=0}^6 \left[ \left\{ \frac{10'v}{\beta_L} + vb \right\} B_{9v} X^v \right]
 \end{aligned} \tag{19}$$

③ 엔탈피 :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_2 &= h / (p_d v_d) = \zeta_B + \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \theta \sigma_2 \\
 &= \alpha_0 + B_0 \theta - \sum_{v=1}^5 B_{0v} (v-2) \theta^{v-1} - \sum_{\mu=1}^5 \beta^\mu \sum_{v=1}^{n(\mu)} B_{\mu v} (1+z(\mu, v) b \theta) X^{z(\mu, v)} \\
 &\quad - \sum_{\mu=6}^8 \left[ \frac{\sum_{v=1}^{n(\mu)} B_{\mu v} X^{z(\mu, v)} \left( [1+z(\mu, v) b \theta] - \frac{b \theta \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} x(\mu, \lambda) b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)}}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)}} \right)}{\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu \lambda} X^{x(\mu, \lambda)}} \right] \\
 &\quad + \beta \left( \frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{v=0}^6 \left[ 1 + \theta \left( \frac{10' \beta'_L}{\beta_L} + vb \right) \right] B_{0v} X^v \quad (20)
 \end{aligned}$$

### 2. 2. 3 영역-3의 전산수식화

영역-3은 증기와 고압수의 구분이 거의 안되고, 온도 374.15 - 590 ℃, 압력 221.2 - 1000bar까지의 초임계압 영역이다.

① 압력 :

$$\begin{aligned}
 \beta_3 &= p / p_{cl} = -(\partial \varphi_c / \partial \chi)_\theta \\
 &= -\left\{ C_{01} + \sum_{v=2}^{11} (1-v) C_{0v} \chi^{-v} \right\} - \left\{ C_{11} + \sum_{v=2}^6 (1-v) C_{1v} \chi^{-v} + C_{17} \chi^{-1} \right\} (\theta - 1) \\
 &\quad - \left\{ C_{21} + \sum_{v=2}^7 (1-v) C_{2v} \chi^{-v} + C_{28} \chi^{-1} \right\} (\theta - 1)^2 \\
 &\quad - \left\{ C_{31} + \sum_{v=2}^9 (1-v) C_{3v} \chi^{-v} + C_{310} \chi^{-1} \right\} (\theta - 1)^3 + 5 C_{41} \chi^{-5} (\theta - 1) - 6 \chi^5 \sum_{v=0}^4 C_{6v} \theta^{-2-v} \quad (21)
 \end{aligned}$$

② 엔트로피 :

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



③ 엔탈피 :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_3 &= h / (p_d v_d) = \varphi_c + \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \theta \sigma_2 + \chi \beta_3 \\
 &= \alpha_0 + \left\{ (C_{00} - C_{012} - C_{50}) - C_{11} \chi + \sum_{v=2}^{11} v C_{0v} \chi^{1-v} - \sum_{v=2}^6 C_{1v} \chi^{1-v} + (C_{012} - C_{17}) \ln \chi \right\} \\
 &\quad + \left\{ (-C_{17} - C_{50}) - (C_{11} + 2C_{21}) \chi + \sum_{v=2}^6 (v-1) C_{1v} \chi^{1-v} - 2 \sum_{v=2}^7 C_{2v} \chi^{1-v} - 2C_{28} \ln \chi \right\} (\theta - 1) \\
 &\quad + \left\{ -C_{28} - (2C_{21} + 3C_{31}) \chi + \sum_{v=2}^7 (v-2) C_{2v} \chi^{1-v} - 3 \sum_{v=2}^9 C_{3v} \chi^{1-v} - (C_{28} + 3C_{310} \ln \chi) \right\} (\theta - 1)^2 \\
 &\quad + \left\{ -C_{310} - 3C_{31} \chi + \sum_{v=2}^9 (v-3) C_{3v} \chi^{1-v} - 2C_{310} \ln \chi \right\} (\theta - 1)^3 + (23C_{40} + 28C_{41} \chi^{-5}) \theta^{-22} \\
 &\quad - (24C_{40} + 29C_{11} \chi^{-5}) \theta^{-23} + \chi^6 \sum_{v=0}^4 \left\{ (v-3) C_{6v} \theta^{-2-v} \right\} - \sum_{v=0}^6 \left\{ C_{7v} (1+v\theta) (\theta - 1)^v \right\}
 \end{aligned} \tag{23}$$

#### 2.2.4 영역 - 4의 전산수식화

영역 - 4는 온도 350 - 374.15℃, 압력 165.4 - 1000bar와 포화액선으로 좌측의 임계점 초압의 고압수 영역이다.

① 압력 :

$$\begin{aligned}
 \beta_4 &= p / p_d = \beta_3 - (\partial \varphi_D / \partial \chi)_\theta \\
 &= \beta_3 + \sum_{\lambda=3}^4 \sum_{v=0}^4 v D_{\lambda v} \gamma^\mu \chi^{-v-1} - \gamma^{32} \sum_{v=0}^2 D_{5v} \chi^{v-1}
 \end{aligned} \tag{24}$$

② 엔트로피 :

$$\begin{aligned}
 \sigma_4 &= s / (p_d v_d / T_d) = \sigma_3 - (\partial \varphi_D / \partial \theta)_\chi \\
 &= \sigma_3 + \frac{\sum_{\mu=3}^4 \sum_{v=0}^4 \mu D_{\mu v} \gamma^{\mu-1} \chi^{-v} + 32 \gamma^{31} \sum_{v=0}^2 D_{5v} \chi^v}{1 - \theta_1}
 \end{aligned} \tag{25}$$

③ 엔탈피 :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_4 &= h / (p_d v_d) = \varepsilon_3 - \varphi_D + (\sigma_4 - \sigma_3) \theta + (\beta_4 - \beta_3)_\chi \\
 &= \varepsilon_3 + \mu \sum_{\lambda=3}^4 \sum_{v=0}^4 D_{\lambda v} \left\{ (1 - \mu + v) \gamma + \mu / (1 - \theta_1) \right\} \gamma^{\mu-1} \chi^{-v} \\
 &\quad - \gamma^{31} \sum_{v=0}^2 D_{5v} \left\{ (31 + v) (\gamma - 32 / (1 - \theta_1)) \right\} \chi^v
 \end{aligned} \tag{26}$$

#### 2.2.5 영역 - 5와 영역 - 6의 전산수식화

영역 - 5는 온도 350 - 374.15℃, 압력 165.4 - 221.2bar까지와 포화선으로 둘러싸인 아임계압의 습

증기 영역이며, 영역 -6은 온도 0.01 - 350℃, 압력 0.0061 - 165.4bar까지와 포화선으로 둘러싸인 습 증기 영역이다. 전술한 바와 같이 본 연구에서 특히 영역 -1과 영역 -4의 전산수식화의 결과로부터 특히 포화액선상의 값들을 구하고, 영역 -2와 영역 -3의 전산수식화 결과로부터 포화증기 상태의 값들을 구하여, 궁극적으로 습증기 상태의 값들을 구하는데 연구의 목적이 있다.

이들은 건도  $\chi$ 를 이용하면 다음과 같이 간단히 표현된다.

① 비체적 :

$$\begin{aligned} v &= (1 - \chi)v' + \chi v'' \\ &= v' + \chi(v'' - v') \end{aligned} \quad (27)$$

② 엔탈피

$$\begin{aligned} i &= (1 - \chi)i' + \chi i'' \\ &= i' + \chi(i'' - i') \\ &= i' + \chi\gamma \end{aligned} \quad (28)$$

③ 엔트로피 :

$$\begin{aligned} S &= (1 - \chi)S' + \chi S'' \\ &= S' + \chi(S'' - S') \\ &= S' + \chi\gamma/T_s \end{aligned} \quad (29)$$

④ 건도 :

$$\begin{aligned} \chi &= (i - i')/\gamma \\ &= (v - v')/(v'' - v') \end{aligned} \quad (30)$$

#### 4. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 앞장에서 기술한 바와 같은 각 영역별 열물성치의 전산수식들을 정리한 프로그램을 부프로그램으로 하여, 출력용 주프로그램과 연결하였다. 이렇게 함으로써 열물성치들을 어떤 지정하는 범위에 대하여 원하는 임의의 간격으로, 또는 원하는 단위계로 출력할 수 있도록 하였다.

Table. 1에는 진공압력범위에 대하여 10mmHg간격으로 포화온도, 비용적, 엔트로피 및 엔탈피를 출력한 결과를 나타내며, Table. 2에는 상압범위에서 포화수 및 포화증기의 물성치들을, Table. 3은 진공영역에서 건도에 따른 물성치들의 전산출력 결과를 나타낸다. 이들 표에서 보는 바와 같이 전산수식화 결과를 이용하면 원하는 간격으로, 원하는 단위계로 손쉽게 물성치들을 출력할 수 있으며, 실제의 열기기들을 미소요소에 대한 운동방정식, 에너지 방정식 등을 전계산구간에 대하여 반

Table 1. Thermal Properties of Saturated Steam and Water

Absolute Pressure (mm Hg)	Saturation Temperature (°C)	Specific Volume (m <sup>3</sup> /kg)		Enthalpy (kcal/kg)		Entropy (Kcal/kg K)		Latent Heat (kcal/kg)	Remarks
		Liquid	gas	Liquid	Gas	Liquid	Gas		
10.00	10.75	0.00100	101.46708	10.7818	602.1985	0.039	2.122	591.4167	
20.00	21.61	0.00100	52.64898	21.6388	606.9375	0.076	2.062	585.2987	
20.00	28.42	0.00100	35.89469	28.4299	609.8897	0.099	2.028	518.4598	
40.00	33.46	0.00101	27.36162	33.4672	612.0697	0.116	2.003	578.6025	
50.00	37.51	0.00101	22.17097	37.5086	613.8112	0.129	1.984	576.3026	
60.00	40.91	0.00101	18.67220	40.9024	615.2676	0.140	1.969	574.3652	
70.00	43.86	0.00101	16.14991	43.8390	616.5230	0.149	1.956	572.6840	
80.00	46.46	0.00101	14.24307	46.4346	617.6284	0.157	1.945	571.1939	
90.00	48.79	0.00101	12.74954	48.7648	618.6174	0.164	1.935	569.8526	
100.00	50.91	0.00101	11.54721	50.8829	619.5133	0.171	1.926	568.6304	
110,000	52.86	0.00101	10.55789	52.8269	620.3329	0.177	1.918	567.5059	
120,000	54.66	0.00101	9.72918	54.6254	621.0887	0.182	1.911	566.4633	
130,000	56.33	0.00102	9.02461	56.3003	621.7905	0.187	1.904	565.4901	
140,000	57.90	0.00102	8.41801	57.8688	622.4457	0.192	1.898	564.5769	
150,000	59.38	0.00102	7.89012	59.3418	623.0605	0.197	1.892	563.7157	
160,000	60.77	0.00102	7.42642	60.7393	623.6398	0.201	1.887	562.9005	
170,000	62.10	0.00102	7.01578	62.0618	624.1876	0.205	1.882	562.1259	
180,000	63.36	0.00102	6.64952	63.3198	624.7074	0.208	1.877	561.3876	
190,000	64.56	0.00102	6.32074	64.5200	625.2020	0.212	1.873	560.6820	
200,000	65.70	0.00102	6.02392	65.6679	625.6738	0.215	1.868	560.0050	
210,000	66.80	0.00102	5.75457	66.7682	626.1250	0.219	1.864	559.3568	
220,000	67.86	0.00102	5.50902	67.8251	626.5573	0.222	1.860	558.7322	
230,000	68.68	0.00102	5.28421	68.8423	626.9723	0.225	1.857	558.1301	
240,000	69.86	0.00102	5.07761	69.8228	627.3715	0.228	1.853	557.5487	
250,000	70.80	0.00102	4.88706	70.7694	627.7560	0.230	1.850	556.9865	
260,000	71.72	0.00102	4.71074	71.6847	628.1269	0.233	1.847	556.4421	
270,000	72.60	0.00102	4.54711	72.5709	628.4852	0.236	1.844	555.9143	
280,000	73.46	0.00102	4.39483	73.4299	628.8317	0.238	1.841	555.4018	
290,000	74.29	0.00103	4.25275	74.2635	629.1673	0.240	1.838	554.9038	
300,000	75.10	0.00103	4.11986	75.07323	629.4926	0.243	1.835	554.4193	
310,000	75.89	0.00103	3.99529	75.8608	629.8083	0.245	1.832	553.9475	
320,000	76.65	0.00103	3.87828	76.6273	630.1149	0.247	1.830	553.4876	
330,000	77.40	0.00103	3.76816	77.3739	630.4129	0.249	1.827	553.0390	
340,000	78.12	0.00103	3.66432	78.1019	630.7029	0.251	1.825	552.6011	
350,000	78.83	0.00103	3.56662	78.8121	630.9853	0.253	1.822	552.1732	
360,000	79.52	0.00103	3.47344	79.5056	631.2605	0.255	1.820	551.7549	
370,000	80.20	0.00103	3.38551	80.1832	631.5289	0.257	1.818	551.3457	
380,000	80.86	0.00103	3.30207	80.8457	631.7907	0.259	1.816	550.9451	
390,000	81.51	0.00103	3.22278	81.4937	632.0464	0.261	1.814	550.5527	
400,000	82.14	0.00103	3.14734	82.1281	632.2962	0.263	1.812	550.1681	
410,000	82.76	0.00103	3.07547	82.7493	632.5404	0.265	1.809	549.7910	
420,000	83.36	0.00103	3.00691	83.3581	632.7792	0.266	1.808	549.4211	
430,000	83.96	0.00103	2.94145	83.9549	633.0129	0.268	1.806	549.0580	
440,000	84.54	0.00103	2.87888	84.5403	633.2417	0.270	1.804	548.7014	
450,000	85.12	0.00103	2.81900	85.1147	633.4658	0.271	1.802	548.3511	
460,000	85.68	0.00103	2.76164	85.6786	633.6855	0.273	1.800	548.0069	
470,000	86.23	0.00103	2.70666	86.2324	633.9008	0.274	1.798	547.6684	
480,000	86.77	0.00103	2.65389	86.7765	634.1120	0.276	1.797	547.3355	
490,000	87.30	0.00103	2.60321	87.3113	634.3191	0.277	1.795	547.0079	
500,000	87.83	0.00103	2.55450	87.8370	634.5225	0.279	1.793	546.6855	
510,000	88.34	0.00103	2.50763	88.3542	634.7222	0.280	1.792	546.3680	
520,000	88.85	0.00103	2.46252	88.8630	634.9183	0.282	1.790	546.0553	
530,000	89.35	0.00104	2.41905	89.3637	635.1110	0.283	1.789	545.7473	
540,000	89.84	0.00104	2.33672	90.3422	635.4866	0.286	1.786	545.1444	
550,000	90.32	0.00104	2.29769	90.8205	635.6697	0.287	1.784	544.8493	
560,000	90.80	0.00104	2.25999	91.2917	635.8499	0.288	1.783	544.5582	
570,000	91.27	0.00104	2.22355	91.7561	636.0272	0.290	1.781	544.2710	
580,000	91.73	0.00104	2.18831	92.2140	636.2016	0.291	1.780	543.9876	
590,000	92.18	0.00104	2.15420	92.6655	636.3734	0.292	1.779	543.7079	
600,000	92.63	0.00104	2.12118	93.1109	636.5426	0.293	1.777	543.4317	
610,000	93.08	0.00104	2.08919	93.5502	636.7092	0.294	1.776	543.1590	
620,000	93.51	0.00104	2.05818	93.9838	636.8734	0.296	1.775	542.8896	
630,000	93.94	0.00104	2.02811	94.4117	637.0352	0.297	1.773	542.6235	
640,000	94.37	0.00104	1.99894	94.8341	637.1946	0.298	1.772	542.3605	
650,000	94.79	0.00104	1.97062	95.2512	637.3518	0.299	1.771	542.1006	
660,000	95.20	0.00104	1.94313	95.6631	637.5069	0.300	1.770	541.8437	
670,000	95.61	0.00104	1.91641	96.0700	637.6598	0.301	1.768	541.5897	
680,000	96.02	0.00104	1.89045	96.4720	637.8106	0.302	1.767	541.3386	
690,000	96.42	0.00104	1.86520	96.8693	637.9594	0.303	1.766	541.0901	
700,000	96.81	0.00104	1.84065	97.2619	638.1063	0.305	1.765	540.8444	
710,000	97.20	0.00104	1.81675	97.6500	638.2513	0.306	1.764	540.6013	
720,000	97.59	0.00104	1.79349	98.0337	638.3944	0.307	1.763	540.3607	
730,000	97.97	0.00104	1.77084	98.4131	638.5357	0.308	1.762	540.1226	
740,000	98.35	0.00104	1.74877	98.7883	638.6752	0.309	1.761	539.8870	
750,000	98.72	0.00104	1.72726	99.1594	638.8130	0.310	1.759	539.6537	
760,000	99.09	0.00104							

Table 2. Thermal Properties of Saturated Steam and Water

Absolute Pressure (mm Hg)	Saturation Temperature (°C)	Specific Volume (m <sup>3</sup> /kg)		Enthalpy (kcal/kg)		Entropy (Kcal/kg K)		Latent Heat (kcal/kg)	Remarks
		Liquid	gas	Liquid	Gas	Liquid	Gas		
1.10	101.76	0.00105	1.58013	101.8561	639.8085	0.317	1.752	537.9524	
1.20	104.25	0.00105	1.45679	104.3591	640.7227	0.323	1.745	536.3636	
1.30	106.56	0.00105	1.35186	106.6972	641.5680	0.330	1.738	534.8708	
1.40	108.74	0.00105	1.26147	108.8931	642.3541	0.335	1.732	533.4610	
1.50	110.79	0.00105	1.18276	110.9650	643.0887	0.341	1.727	532.1238	
1.60	112.73	0.00105	1.11359	112.9277	643.7781	0.346	1.722	530.8505	
1.70	114.57	0.00106	1.05230	114.7934	644.4276	0.351	1.717	529.6341	
1.80	116.33	0.00106	0.99760	116.5726	645.0413	0.355	1.712	528.4687	
1.90	118.01	0.00106	0.94849	118.2736	645.6230	0.360	1.708	527.3494	
2.00	119.61	0.00106	0.90412	119.9041	646.1758	0.364	1.704	526.2717	
2.10	121.16	0.00106	0.86385	121.4703	646.7023	0.368	1.700	525.2320	
2.20	122.64	0.00106	0.82712	122.9778	647.2049	0.372	1.696	524.2271	
2.30	124.07	0.00106	0.79348	124.4313	647.6856	0.375	1.693	523.2543	
2.40	125.45	0.00107	0.76256	125.8351	648.1461	0.379	1.689	522.3110	
2.50	126.79	0.00107	0.73403	127.1929	648.5880	0.382	1.686	521.3951	
2.60	128.08	0.00107	0.70762	128.5081	649.0127	0.385	1.683	520.5046	
2.70	129.33	0.00107	0.68310	129.7836	649.4214	0.389	1.680	519.6378	
2.80	130.55	0.00107	0.66027	131.0220	649.8152	0.392	1.677	518.7931	
2.90	131.73	0.00107	0.63897	132.2258	650.1951	0.395	1.674	517.9692	
3.00	132.88	0.00107	0.61904	133.3971	650.5616	0.398	1.671	517.1648	
3.10	133.99	0.00107	0.60036	134.5379	650.9166	0.400	1.669	516.3787	
3.20	135.08	0.00108	0.58280	135.6499	651.2598	0.403	1.666	515.6099	
3.30	136.14	0.00108	0.56627	136.7347	651.5922	0.406	1.664	514.8575	
3.40	137.18	0.00108	0.55068	137.7939	651.9144	0.408	1.661	514.1205	
3.50	138.19	0.00108	0.53595	138.8288	652.2270	0.411	1.659	513.3981	
3.60	139.18	0.00108	0.52201	139.8407	652.5304	0.413	1.657	512.6897	
3.70	140.14	0.00108	0.50880	140.8307	652.8252	0.416	1.654	511.9945	
3.80	141.09	0.00108	0.49626	141.7999	653.1118	0.418	1.652	511.3119	
3.90	142.01	0.00108	0.48434	142.7493	653.3909	0.420	1.650	510.6413	
4.00	142.92	0.00108	0.47300	143.6797	653.6619	0.422	1.648	509.9822	
4.10	143.81	0.00108	0.46219	144.5921	653.9262	0.425	1.646	509.3340	
4.20	144.68	0.00109	0.45188	145.4873	654.1836	0.427	1.644	508.6964	
4.30	145.54	0.00109	0.44204	146.3658	654.4347	0.429	1.642	508.0688	
4.40	146.37	0.00109	0.43262	147.2287	654.6769	0.431	1.641	507.4508	
4.50	147.20	0.00109	0.42361	148.0764	654.9184	0.433	1.639	506.8421	
4.60	148.01	0.00109	0.41497	148.9094	655.1517	0.435	1.637	506.2422	
4.70	148.80	0.00109	0.40670	149.7285	655.3795	0.437	1.635	505.6509	
4.80	149.58	0.00109	0.39875	150.5342	655.6021	0.439	1.633	505.0679	
4.90	150.35	0.00109	0.39112	151.3269	655.8196	0.441	1.632	504.4927	
5.00	151.11	0.00109	0.38378	152.1071	656.0323	0.442	1.630	503.9252	
5.10	151.85	0.00109	0.37672	152.8753	656.2404	0.444	1.629	503.3651	
5.20	152.59	0.00109	0.36992	153.6319	656.4440	0.446	1.627	502.8121	
5.30	153.31	0.00109	0.36337	154.3773	656.6433	0.448	1.625	502.2660	
5.40	154.02	0.00110	0.35705	155.1120	656.8384	0.450	1.624	501.7265	
5.50	154.72	0.00110	0.35096	155.8361	657.0295	0.451	1.622	501.1934	
5.60	155.41	0.00110	0.34507	156.5502	657.2167	0.453	1.621	500.6666	
5.70	156.09	0.00110	0.33939	157.2545	657.4002	0.455	1.620	500.1458	
5.80	156.76	0.00110	0.33389	157.9493	657.5801	0.456	1.618	499.6308	
5.90	157.42	0.00110	0.32857	158.6349	657.7564	0.458	1.617	499.1215	
6.00	158.08	0.00110	0.32343	159.3117	657.9293	0.459	1.615	498.6177	
6.10	158.72	0.00110	0.31844	159.9798	658.0990	0.461	1.614	498.1192	
6.20	159.36	0.00110	0.31362	160.6395	658.2654	0.462	1.613	497.6259	
6.30	159.98	0.00110	0.30894	161.2911	658.4287	0.464	1.611	497.1376	
6.40	160.60	0.00110	0.30440	161.9349	658.5891	0.465	1.610	496.6542	
6.50	161.22	0.00110	0.29999	162.5709	658.7465	0.467	1.609	496.1756	
6.60	161.82	0.00110	0.29572	163.1995	658.9011	0.468	1.608	495.7016	
6.70	162.42	0.00111	0.29156	163.8208	659.0530	0.470	1.606	495.2322	
6.80	163.01	0.00111	0.28753	164.4351	659.2022	0.471	1.605	494.7671	
6.90	163.59	0.00111	0.28361	165.0425	659.3488	0.472	1.604	494.3062	
7.00	164.17	0.00111	0.27979	165.6432	659.4928	0.474	1.603	493.8496	
7.10	164.74	0.00111	0.27608	166.2374	659.6344	0.475	1.602	493.3970	
7.20	165.30	0.00111	0.27247	166.8254	659.7736	0.476	1.600	492.9484	
7.30	165.86	0.00111	0.26895	167.4085	659.9105	0.478	1.599	492.5036	
7.40	166.41	0.00111	0.26553	167.9866	660.0451	0.479	1.598	492.0626	
7.50	166.96	0.00111	0.26219	168.5592	660.1775	0.480	1.597	491.6253	
7.60	167.50	0.00111	0.25894	169.1162	660.3077	0.482	1.596	491.1916	
7.70	168.04	0.00111	0.25577	169.6745	660.4369	0.483	1.595	490.7614	
7.80	168.56	0.00111	0.25268	170.2273	660.5619	0.484	1.594	490.3346	
7.90	169.09	0.00111	0.24966	170.7748	660.6860	0.485	1.593	489.9112	
8.00	169.61	0.00111	0.24672	171.3171	660.8081	0.487	1.592	489.4910	
8.10	170.12	0.00111	0.24384	171.8542	660.9283	0.488	1.591	489.0741	

Table 3. Thermal Properties of Wetted Steam

Absolute Pressure (mm Hg)	Sat. Temp. (°C)	x=0.2			x=0.4			x=0.6			x=0.8		
		Spe. Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Entalpy (Kcal/kg)	Entalpy (Kcal/kg K)	Spe. Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Entalpy (Kcal/kg)	Entalpy (Kcal/kg K)	Spe. Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Entalpy (Kcal/kg)	Entalpy (Kcal/kg K)	Spe. Volume (m <sup>3</sup> /kg)	Entalpy (Kcal/kg)	Entalpy (Kcal/kg K)
10.00	10.75	20.295	128.65	0.454	40.589	246.57	0.869	60.883	364.48	1.285	81.177	482.39	1.700
20.00	21.61	10.531	138.26	0.472	21.061	254.95	0.868	31.592	371.64	1.264	42.122	488.33	1.660
20.00	28.42	7.180	144.26	0.483	14.360	260.19	0.868	21.539	376.12	1.252	28.719	492.04	1.636
40.00	33.46	5.474	148.71	0.491	10.947	264.07	0.868	16.420	379.43	1.244	21.893	494.78	1.620
50.00	37.51	4.435	152.28	0.498	8.870	267.18	0.868	13.305	382.08	1.238	17.740	496.98	1.608
60.00	40.91	3.736	155.28	0.504	7.471	269.79	0.868	11.206	384.30	1.233	14.941	498.82	1.598
70.00	43.86	3.231	157.87	0.509	6.462	272.05	0.869	9.693	386.23	1.229	12.923	500.40	1.589
80.00	46.46	2.850	160.16	0.513	5.699	274.04	0.869	8.548	387.92	1.225	11.398	501.80	1.582
90.00	48.79	2.551	162.22	0.517	2.102	275.83	0.870	7.652	389.44	1.222	10.203	503.06	1.575
100.00	50.91	2.311	164.09	0.520	4.621	277.46	0.870	6.931	390.82	1.220	9.241	504.19	1.570
110.00	52.86	2.113	165.80	0.523	4.225	278.94	0.870	6.337	392.09	1.217	8.450	505.23	1.564
120.00	54.66	1.947	167.39	0.526	3.894	280.32	0.871	5.840	393.26	1.215	7.787	506.20	1.560
130.00	56.33	1.806	168.86	0.529	3.612	281.60	0.871	5.417	394.35	1.213	7.223	507.09	1.556
140.00	57.90	1.658	170.24	0.532	3.369	282.80	0.872	5.053	395.36	1.212	6.738	507.92	1.552
150.00	59.38	1.579	171.54	0.534	3.158	283.93	0.872	4.737	396.32	1.210	6.315	508.71	1.548
160.00	60.77	1.487	172.77	0.536	2.972	285.00	0.872	4.458	397.22	1.208	5.994	509.45	1.544
170.00	62.10	1.404	173.93	0.538	2.808	285.01	0.873	4.212	398.08	1.207	5.616	510.15	1.541
180.00	63.36	1.331	175.04	0.540	2.662	286.97	0.873	3.992	398.89	1.206	5.323	510.81	1.538
190.00	64.56	1.265	176.10	0.542	2.530	287.88	0.873	3.795	399.66	1.204	5.060	511.45	1.535
200.00	65.70	1.206	177.11	0.544	2.411	288.75	0.874	3.617	400.40	1.203	4.822	512.05	1.533
210.00	66.80	1.152	178.07	0.546	2.304	289.59	0.874	3.455	401.11	1.202	4.607	512.63	1.530
220.00	67.86	1.103	179.00	0.548	2.206	290.40	0.874	3.308	401.79	1.201	4.411	513.19	1.528
230.00	68.68	1.058	179.90	0.549	2.116	291.17	0.875	3.173	402.45	1.200	4.231	513.72	1.525
240.00	69.86	1.017	180.76	0.551	2.033	291.92	0.875	3.049	403.08	1.199	4.065	514.24	1.523
250.00	70.80	0.979	181.59	0.552	1.957	292.64	0.875	2.935	403.68	1.198	3.913	514.73	1.521
260.00	71.72	0.943	182.39	0.554	1.886	293.33	0.876	2.829	404.27	1.197	3.772	515.21	1.519
270.00	72.60	0.911	183.17	0.555	1.821	294.00	0.876	2.731	404.84	1.197	3.641	515.67	1.517
280.00	73.46	0.880	184.93	0.557	1.760	294.66	0.876	2.640	405.39	1.196	3.519	516.21	1.515
290.00	74.29	0.852	184.66	0.558	1.703	295.29	0.877	2.554	405.92	1.195	3.406	516.55	1.513
300.00	75.10	0.825	185.37	0.559	1.650	295.90	0.877	2.475	406.44	1.194	3.299	516.97	1.512
310.00	75.89	0.800	186.06	0.561	1.600	296.50	0.877	2.400	406.94	1.194	3.200	517.38	1.510
320.00	76.65	0.777	186.73	0.562	1.553	297.08	0.877	2.330	407.43	1.193	3.106	517.78	1.508
330.00	77.40	0.755	187.39	0.563	1.509	297.65	0.878	2.264	407.91	1.192	3.018	518.17	1.507
340.00	78.12	0.734	188.02	0.564	1.468	298.20	0.878	2.201	408.37	1.192	2.935	518.54	1.505
350.00	78.83	0.714	188.65	0.565	1.428	298.73	0.878	2.142	408.82	1.191	2.856	519.91	1.504
360.00	79.52	0.696	189.25	0.567	1.391	299.26	0.878	2.087	409.26	1.190	2.782	519.27	1.502
370.00	80.20	0.678	189.85	0.568	1.356	299.77	0.879	2.034	409.69	1.190	2.712	519.62	1.501
380.00	80.86	0.662	190.43	0.569	1.323	300.27	0.879	1.984	410.11	1.189	2.645	519.96	1.500
390.00	81.51	0.646	191.00	0.570	1.291	300.76	0.879	1.936	410.53	1.189	2.582	520.29	1.498
400.00	82.14	0.631	191.55	0.571	1.261	301.24	0.879	1.891	410.93	1.188	2.521	520.62	1.497
410.00	82.76	0.616	192.10	0.572	1.232	301.71	0.880	1.848	411.32	1.188	2.464	520.93	1.496
420.00	83.36	0.603	192.63	0.573	1.205	302.17	0.880	1.807	411.71	1.187	2.409	521.25	1.494
430.00	83.96	0.590	193.15	0.574	1.179	302.62	0.880	1.767	412.09	1.187	2.356	521.55	1.493
440.00	84.54	0.577	193.67	0.575	1.153	303.06	0.880	1.730	412.46	1.186	2.306	521.85	1.492
450.00	85.12	0.565	194.17	0.576	1.130	303.49	0.881	1.694	412.82	1.186	2.259	522.14	1.491
460.00	85.68	0.554	194.66	0.576	1.107	303.92	0.881	1.660	413.18	1.185	2.213	522.43	1.490
470.00	86.23	0.543	195.15	0.577	1.085	304.34	0.881	1.627	413.52	1.185	2.169	522.71	1.489
480.00	86.77	0.532	195.62	0.578	1.063	304.74	0.881	1.595	413.87	1.185	2.126	522.99	1.488
490.00	87.30	0.522	196.09	0.579	1.043	305.15	0.882	1.565	414.21	1.184	2.086	523.26	1.487
500.00	87.83	0.512	196.55	0.580	1.024	305.54	0.882	1.535	414.54	1.184	2.047	523.53	1.486
510.00	88.34	0.503	197.00	0.581	1.005	305.93	0.882	1.507	414.86	1.183	2.009	523.79	1.485
520.00	88.85	0.494	197.45	0.581	0.987	306.31	0.882	1.480	415.18	1.183	1.973	524.05	1.484
530.00	89.35	0.485	197.88	0.582	0.970	306.69	0.882	1.454	415.50	1.183	1.939	524.30	1.483
540.00	89.84	0.477	198.32	0.583	0.953	307.06	0.883	1.429	415.81	1.182	1.905	524.55	1.482
550.00	90.32	0.469	198.74	0.584	0.937	307.43	0.883	1.405	416.11	1.182	1.873	524.80	1.481
560.00	90.80	0.461	199.16	0.585	0.921	307.78	0.883	1.381	416.41	1.182	1.841	525.04	1.480
570.00	91.27	0.453	199.57	0.585	0.906	308.14	0.883	1.359	416.71	1.181	1.811	525.28	1.479
580.00	91.73	0.446	199.97	0.586	0.891	308.49	0.883	1.337	417.00	1.181	1.782	525.51	1.478
590.00	92.18	0.439	200.37	0.587	0.877	308.83	0.884	1.316	417.29	1.181	1.754	525.74	1.477
600.00	92.63	0.432	200.77	0.587	0.864	309.17	0.884	1.295	417.57	1.180	1.727	525.97	1.477
610.00	93.08	0.425	201.16	0.588	0.850	309.50	0.884	1.275	417.85	1.180	1.700	526.19	1.476
620.00	93.51	0.419	201.54	0.589	0.838	309.83	0.884	1.256	418.12	1.180	1.675	526.41	1.475
630.00	93.94	0.413	201.92	0.590	0.825	310.16	0.884	1.238	418.39	1.179	1.650	526.63	1.474
640.00	94.37	0.407	202.29	0.590	0.813	310.48	0.885	1.219	418.66	1.179	1.626	526.84	1.473
650.00	94.79	0.401	202.66	0.591	0.802	310.79	0.885	1.202	418.92	1.179	1.602	527.06	1.473
660.00	95.20	0.395	203.03	0.592	0.790	311.11	0.885	1.185	419.19	1.178	1.580	527.26	1.472
670.00	95.61	0.390	203.39	0.592	0.779	311.41	0.885	1.168	419.44	1.178	1.550	527.47	1.471
680.00	96.02	0.385	203.74	0.593	0.768	311.72	0.885	1.152	419.70	1.178	1.536	527.67	1.470
690.00	96.42	0.379	204.09	0.593	0.758	312.02	0.886	1.137	419.95	1.178	1.516	527.87	1.470
700.00	96.81	0.374	204.44	0.594	0.748	312.32	0.886	1.122	420.19	1.177	1.495	528.07	1.469
710.00	97.20	0.369	204.78	0.595	0.738	312.62	0.886	1.107	420.44	1.177	1.476	528.27	1.468
720.00	97.59	0.365	205.12	0.595	0.729	312.90	0.886	1.093	420.68	1.177	1.457	528.46	1.467
730.00	97.97	0.360	205.45	0.596	0.719	313.19	0.886	1.079	420.92	1.177	1.430	528.65	1.467
740.00	98.35	0.355	205.78	0.597	0.710	313.47	0.886	1.065	421.15	1.176	1.420	528.84	1.466
750.00	98.72	0.351	206.11	0.597	0.701	313.75	0.887	1.052	421.39	1.176	1.402	529.02	1.465
760.00	99.09	0.347	206.43	0.598	0.693	314.03	0.887	1.039	421.62	1.176	1.385	529.21	1.465

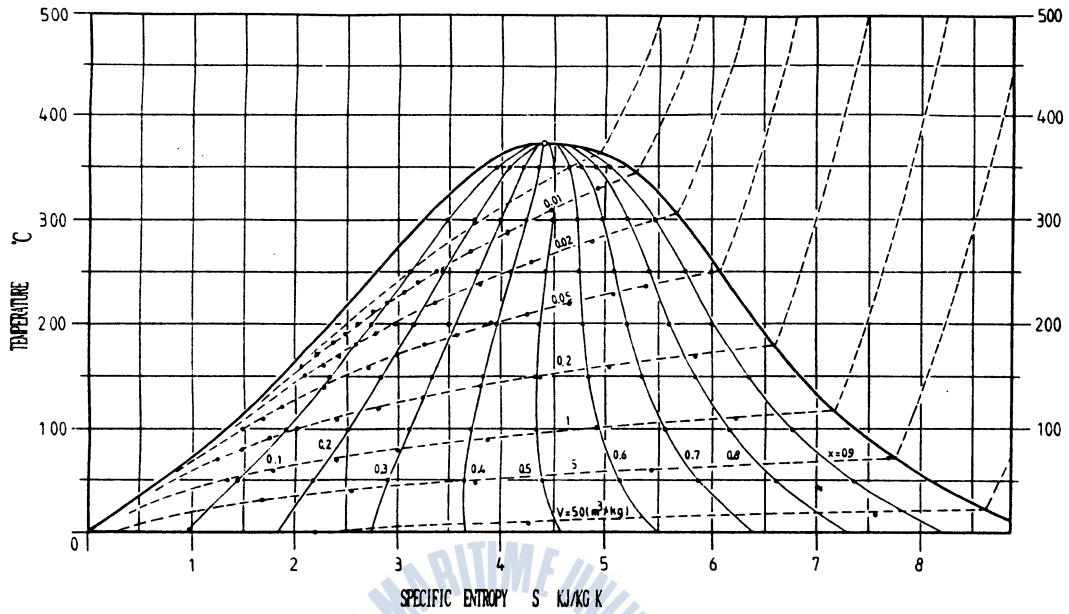


Fig. 2 Plot of iso - specific volume and iso - dryness fraction on T - S chart of ASME 1967 Skeleton Table

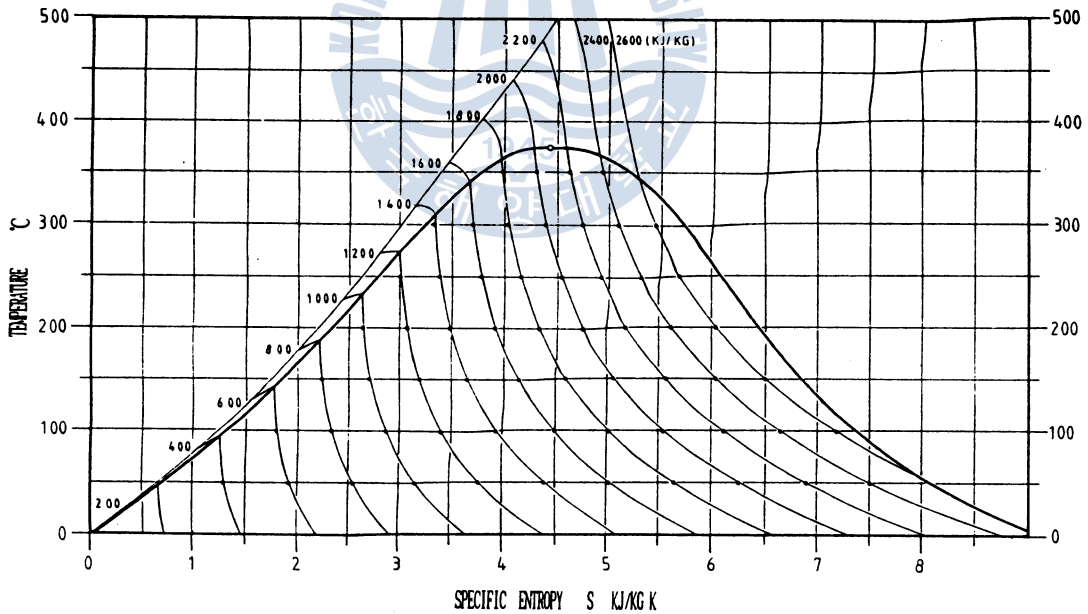


Fig. 3 Plot of iso - specific enthalpy on T - S chart of ASME 1967 Skeleton Table

복계산을 수행할 경우 매우 유용하게 응용될 수도 있다.

Fig. 2는 ASME 1967 Skeleton Table에 의한 T-S 선도상에 점선으로 표시한 등적선과 [○]으로 표시한 비용적의 출력치, 그리고 실선으로 표시한 등건도선과 [●]으로 표시한 전산출력치를 비교한 것이다. 또한 Fig. 3에는 동일한 T-S 선도상에서 Skeleton Table 값에 의한 등엔탈피선과 전산출력

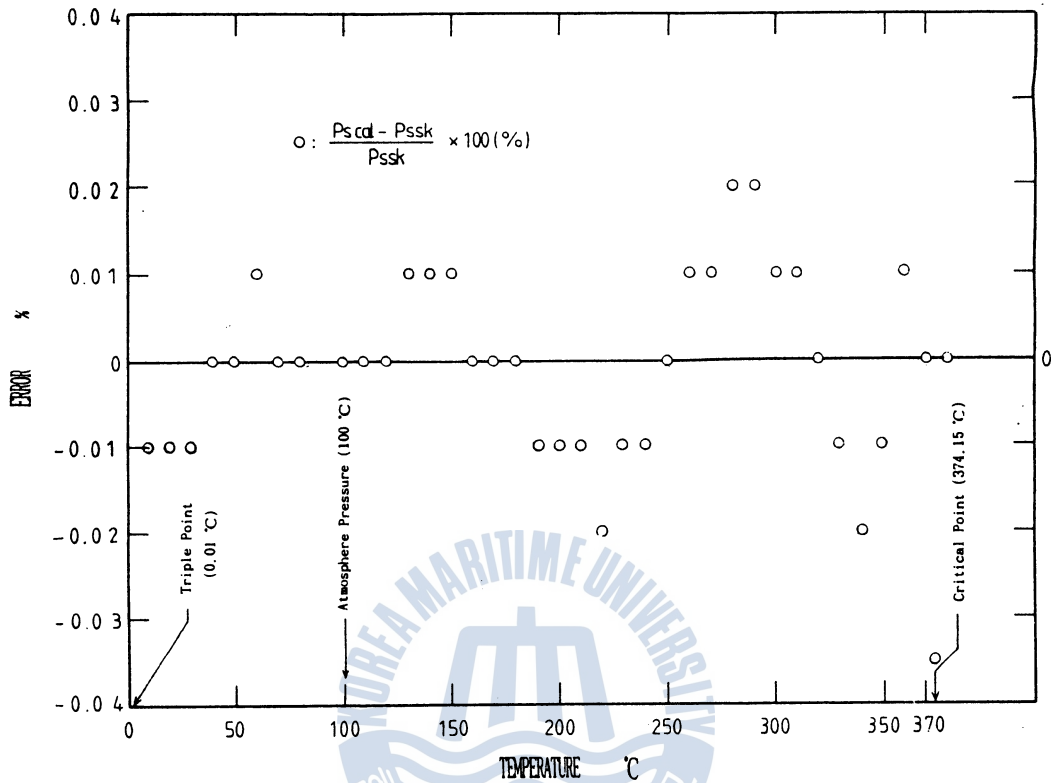


Fig. 4 Relative error of saturation pressure to the given by IAPS 1985 Skeleton Table

치를 비교한 것이다. 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 삼중점에서 임계압력까지의 모든 습증기 범위에 대하여 매우 만족할 만한 결과를 얻고 있다.

Fig. 4에는 Skeleton Table상에 포화압력을 기준으로 한 전산수식에 의한 포화압력의 오차를 평가한 결과들을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 전 온도범위에 대하여 평균적으로는 0.02%이내의 매우 양호한 결과를 얻었다.

Fig. 5에는 Skeleton Table값들을 기준으로 하여 포화증기와 포화수 비용적의 전산출력의 오차를 나타낸다. 포화증기는 고온고압으로 갈수록 2~3% 정도의 오차를 가지며, 포화수는 임계점 근방을 제외하면 매우 양호한 결과를 얻고 있다. 그러나 포화온도 200°C(포화압력 15.55kg/cm<sup>2</sup> abs.)이내의 범위에서는 1% 이내의 오차를 갖고 있을 뿐이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 1967년 IFC의 전산식에 기초한 압력 0 - 1000bar, 온도 0.01 - 374.15°C의 범위에 대한 포화영역내의 물과 증기의 열물성치의 전산수식화를 도모하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 대형 계산기를 대상으로 하여 개발된 IFC의 전산수식들을 여러 요인에 의하여 발생하는 오차

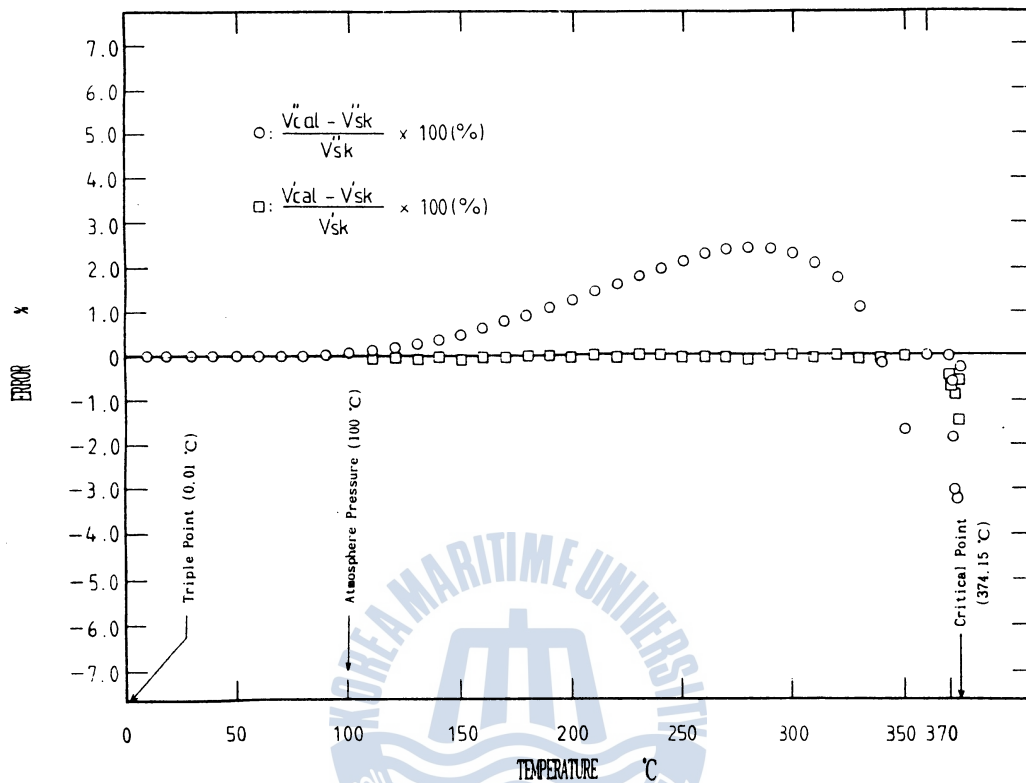


Fig. 5. Relative error of specific volume of saturated steam and water to the given by IAPS 1985 Skeleton Table

들을 최소화 시킴으로써 P.C레벨에서 전산수식화 하였다.

(2) T-S 선도상에서 전 범위에 대하여 등건도선, 등적선, 등엔탈피선은 Skeleton Table의 한 결과와 비교하여 매우 만족한 결과를 얻었다.

(3) 포화온도 - 포화압력의 관계는 전 범위에 관하여 0.02% 이내이며, 평균오차 또는 0.0047% 로 양호한 결과를 얻고 있다.

이상의 습증기 열물성치에 전산수식화 결과는 각종 공기조화기기의 설계, 사이클 성능 예측계산, 증기 응축기의 설계등에 유용하게 응용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- 1) The 1967 IFC Formulation for Industrial Use : Formulation of the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance, International Formulation committee, 1967. 2.
- 2) 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
- 3) The IAPS Formulation 1984 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for Scientific and



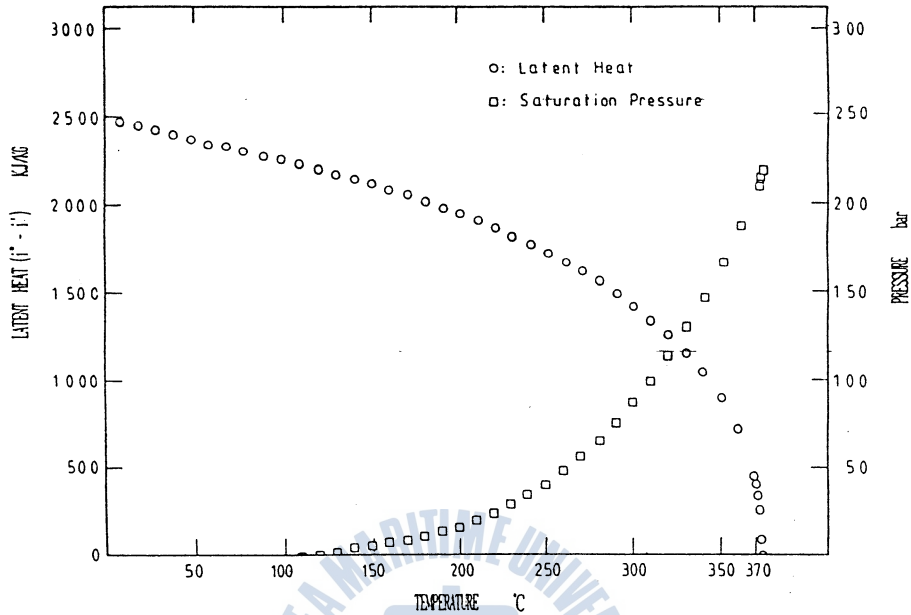


Fig. 6 Calculated results of latent heat and saturation pressure according to saturated temperature

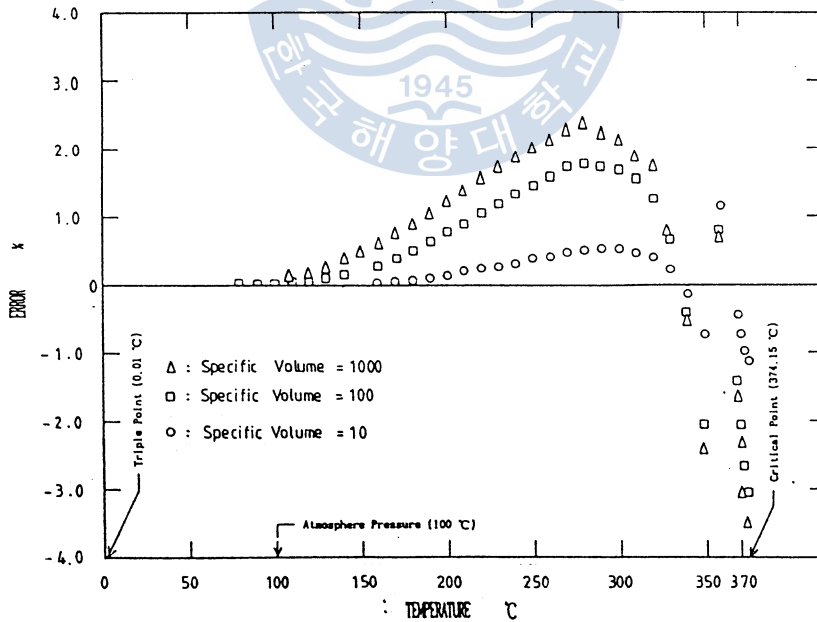


Fig. 7 Relative error of specific volume of saturated steam and water according to constant volume

- General Use, The 10th International Conference of the Properties of Steam, Moscow, USSR, 1984. 9
- 4) S. Torquato and G. Stell, Latent Heat of Vaporization of a Fluid, J. Phys. Chem., 85, 3029, 1984
  - 5) L. Harr, J. S. Gallagher and G. S. Kell, NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D. C., 1984
  - 6) Jr. T. F. Irvine and P. E. Liley, Steam and Gas Tables with Computer Equation Academic Press Inc., Orlando, Florida, 1984
  - 7) The IAPS Skeleton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance, issued by the IAPS, 1985
  - 8) 金京根, 熱力學, 효성문화사, 419~423, 1990. 8
  - 9) 韓國熱流體產業, Steam Ejector CAD Menu., 1992

