

## 電算機에 依한 濕空氣의 過程解析

### Computer-Aided Psychrometric Process Analysis

金 斗 千\*  
Doo Chun Kim

#### 1. 序 言

空氣調和를 정확히 이해하려면 濕空氣에 대해서 잘 알아야 한다.

오늘날 포화수와 습공기의 열역학적 성질을 구하는 대표적인 공식으로는 Keenan 등의 공식<sup>1)</sup>과 1967 미국 기계 학회와 1968 일본기계 학회 증기표의 작성에 사용된 1967 ASME 공식<sup>2)</sup> 그리고 ASHRAE, Smithsonian 연구소 및 세계기상기구(WMO) 등에서 사용하고 있는 Goff-Gratch 공식<sup>3,4)</sup> 등이 있다.

ASHRAE는 1977 편람 기초편까지는 1940 년대에 개발된 Goff-Gratch 공식과 이에 관련된 실용적 문헌<sup>5,6)</sup>을 사용하여 왔다. 그러나 측정기술이 진보됨에 따라 기본물리정수가 약간 달라지고 온도눈금도 당시의 국제온도 눈금 ITS-27(International Temperature Scale, 1927)에서 국제실용온도 눈금 IPTS-68(International Practical Temperature Scale, 1968)으로 변경되었을 뿐만 아니라 영국 단위계에서 SI 단위계로의 전환에 대한 법안이 의회를 통과함에 따라 새로운 계산방법이 요망되기에 이르렀다.

따라서 ASHRAE는 미 표준국 NBS(National Bureau of Standards)에 위탁하여 Wexler-Hyland 보고서<sup>7,8)</sup>와 이 계산방법에

의한 새로운 ASHRAE SI 습공기 선도<sup>9)</sup>를 작성하고 그 결과 1981 ASHRAE 편람 기초 편에<sup>10)</sup> 발표함과 동시에 이용자를 위한 안내서<sup>11)</sup>를 별도로 발간하였다.

실제기체로서의 습공기의 열역학적 성질을 구하는 계산식과 전산 프로그램은 참고문헌(II)에 상술되어 있으나 그 계산이 매우 복잡하기 때문에 ASHRAE는 2-3자리의 유효 숫자로 만족할 수 있는 공조계산에서는 습공기를 이상기체로 간주한 근사계산법을 권장하고 있다.<sup>10)</sup>

여기서는 참고문헌(10~12)을 참고하여 이상기체로서의 습공기를 해석하기로 한다.

#### 2. 습공기의 성질

공기의 상태변화와 공기에 의한 열량수송을 검토하는 공조에 있어서 중요한 대기중의 수증기량을 나타내는 것에 절대치로서는 절대습도가, 상대적 즉 포화정도를 나타내는 것에는 상대습도가 사용되고 있다. 공기의 상태치를 1 kg의 건조한 공기와 x kg의 수증기가 혼합된 (1+x)kg의 혼합기체로서 나타내면, 공기의 온도가 변화해도 x와 (1+x)의 값은 변화하지 않는 편리한 장점이 이용될 수 있다.

절대습도(Humidity ratio)는 습공기 혼합

\* 정회원, 육군사관학교 기계공학과

물에서 건공기의 질량  $m_a$ 에 대한 수증기 질량  $m_w$ 의 비이다.

$$x = m_w/m_a \dots\dots\dots (1)$$

그런데 혼합물중의 성분  $i$ 의 몰비  $y_i$ 는 전체 몰수  $n$ 에 대한 그 성분의 몰수  $n_i$ 의 비로 정의되며, 또 건공기의 몰비  $y_a$ 와 수증기의 몰비  $y_w$  간에는  $y_a + y_w = 1$ 의 관계가 성립된다. 그리고 분자량  $M$ , 몰비  $n$  및 질량  $m$  간의 관계식  $m = n M$  과 공기의 분자량  $M_a = 28.9645$ , 수증기의 분자량  $M_w = 18.01528$  이므로 절대습도는 다음 식으로 표시된다.

$$x = 0.62198 y_w / y_a \dots\dots\dots (2)$$

비습도 (Specific humidity)는 습공기의 전체 질량에 대한 수증기의 질량비이다.

$$q = m_w / (m_w + m_a) = x / (1 + x) \dots (3)$$

습공기의 포화상태에 관한 것으로는 포화습도비, 포화도, 상대습도 및 노점온도가 있다.

포화습도비  $x_s(t, p)$ 는 동일한 온도  $t$ 와 압력  $p$  하에서 수증기나 어름으로 포화된 상태에서의 습공기의 절대습도이고, 포화도  $\psi$ 는 동일한 온도, 압력하에서의 포화상태에 대한 임의 상태에서의 습도비의 비이다.

$$\psi = \frac{x}{x_s} \Big|_{t,p} \dots\dots\dots (4)$$

상대습도 (Relative humidity)는 동일한 온도와 압력하에서 포화습공기에 대한 임의상태에서의 수증기의 몰비의 비이다.

$$\psi = \frac{y_w}{y_{ws}} \Big|_{t,p} = \frac{\psi}{1 - (1 - \psi) y_{ws}} \dots\dots (5)$$

노점온도  $t''$ 는 동일한 압력하에서 절대습도가 주어진 습공기와 같은 상태로 포화되었을 때의 습공기의 온도이며, 다음 식으로 표시된다.

$$x_s(p, t'') = x \dots\dots\dots (6)$$

열역학적 습구온도  $t'$ 는 공기 ( $t, x, h$ )가 일정 압력하에서 다량의 수분과 접하여 긴 단열유로를 통과하면서 온도  $t'$ 의 물로부터 수분을 공급 받아서 물과 같은 온도의 포화공기 ( $t', x_s, h_s$ )가 되어 나오는 과정을 생각했을

때의 온도이다. 이 과정에서의 에너지방정식은

$$h - h_s = (x - x_s) h_w [kJ/kg] \dots\dots (7)$$

여기서,  $h_w$ 는 온도  $t'$ 에서의 물의 비엔탈피이며 다음의 근사식으로 구한다.

$$h_w = 4.186 t' \quad , t' > 0 \dots\dots (8)$$

$$h_w = -333.43 + 2.031 t' , t' < 0 \dots\dots (9)$$

### 3. 이상기체로서의 습공기의 성질

#### 3.1 성질의 관계식

습공기의 열역학적 성질(상태치)은, 습공기를 건공기와 수증기의 혼합기체로 생각하고, 그것들을 모두 이상기체로서 취급하면 간단하게 그 근사치를 구할 수 있다.

##### (1) 상태방정식

이상기체로서의 습공기의 상태식은 다음과 같다.

$$PV = n RT \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $P$ 는 전압력,  $V$ 는 체적,  $n$ 는 몰수,  $R$ 은 일반기체상수,  $T$ 는 절대온도이다.

이상기체의 혼합에 관한 달튼의 법칙으로부터

$$y_a = P_a / P = (P - P_w) / P \dots\dots\dots (11)$$

$$y_w = P_w / P \dots\dots\dots (12)$$

여기서  $y_a$ 는 건조한 공기의 몰비,  $y_w$ 는 수증기의 몰비,  $P_a$ 는 건조한 공기의 분압,  $P_w$ 는 수증기의 분압이다.

##### (2) 절대습도

식(2)에 식(11), (12)을 대입하면 다음과 같다.

$$x = 0.62198 P_w / (P - P_w) = 0.62198 (P - P_a) / P_a \dots\dots\dots (13)$$

##### (3) 비체적

비체적은 건공기 1kg에 대한 습증기의 체적이므로 상태방정식  $v = R_a T / P_a$ 에 식(13)의 건공기 분압  $P_a$ 를 대입하면 다음과 같다.

$$v = \frac{R_a T}{P} (1 + 1.60777 x) \dots\dots\dots (14)$$

전압력  $P$ 의 단위를 atm으로 하고,  $R_a = 0.287 kJ/kg.K$ 를 대입하여 정리하면 다음과

같다.

$$v = 0.4554 \times 10^{-3} (0.62198 + x) \quad T/P [m^3/kg] \quad (15)$$

(4) 비엔탈피

이상기체혼합물의 엔탈피는 각 성분의 엔탈피의 합과 같다.

$$h = h_a + x h_g \quad (16)$$

여기서  $h_a$ 는 건공기의 비엔탈피이며,  $h_g$ 는 포화수증기의 비엔탈피이다. 이들에 대한 건구온도  $t^\circ\text{C}$ 에서의 값을 대입하면

$$h = t + x (2501 + 1.805 t) [kJ/kg] \quad (17)$$

(5) 포화수증기압

습공기의 성질을 계산하기 위해서는 먼저 포화수증기압  $P_{ws}$ 을 알아야 하는데, 그 계산식으로 Keenan의 식(1), Goff-Gratch의 식(4, 13)이 사용되어 왔으나 ASHRAE에서 사용하고 있는 Wexler-Hyland의 식(11,12)은 다음과 같다.

-100 $^\circ\text{C}$  ~ 0 $^\circ\text{C}$ 의 얼음에 접하고 있는 경우에는

$$\ln P_{ws} = \sum_{i=0}^5 m_i T^{i-1} + m_6 \ln T [P_a] \quad (18)$$

여기서,  $m_0 = -0.56745359 \times 10^4$   
 $m_1 = 0.63925247 \times 10^1$   
 $m_2 = -0.96778430 \times 10^{-2}$   
 $m_3 = 0.62215701 \times 10^{-6}$   
 $m_4 = 0.20747825 \times 10^{-8}$   
 $m_5 = -0.94840240 \times 10^{-12}$   
 $m_6 = 0.41635019 \times 10^1$

0 $^\circ\text{C}$  ~ 200 $^\circ\text{C}$ 의 물과 접하고 있는 경우에는

$$\ln P_{ws} = \sum_{i=0}^4 g_i T^{i-1} + g_5 \ln T [P_a] \quad (19)$$

여기서,  $g_0 = -0.58002206 \times 10^4$   
 $g_1 = 0.13914993 \times 10^1$   
 $g_2 = -0.48640239 \times 10^{-1}$   
 $g_3 = 0.41764768 \times 10^{-4}$   
 $g_4 = -0.14452093 \times 10^{-7}$   
 $g_5 = 0.65459673 \times 10^1$

3.2 전산기에 의한 성질의 계산

습공기의 성질을 구하는 FORTRAN의 부프로그램은 표 A1과 같으며, Subroutine(SUBROUTINE PSY)은, 전압력  $P$ 와 건구온도  $DB$ 외에 습구온도  $WB$ , 노점온도  $DP$ , 상대습도  $R$ , 비엔탈피  $H$ , 절대습도  $X$ 중의 어느 하나를 주어지거나, 혹은 전압력, 비엔탈피, 절대습도를 주어서, 비체적  $V$ 를 포함하는 나머지 모든 상태치를 구하는 프로그램이다. 그 선택은 변수  $M$ 에 의해서 이루어진다. 또 변수  $L$ 에 의해서 전압력의 단위 선택이 가능하도록 되어 있어서 비엔탈피의 단위는 전압력이 kPa와 atm일 때, kJ/kg 이고, 그외의 경우에는 kcal/kg 이다.

이 Subroutine은 다음의 네가지의 외부함수를 사용한다.

- 1) PWSF ; 건구온도에서 포화수증기압을 구한다. 식(18), (19)을 사용하며, 단위는 편의상 [atm]으로 하고 있다.
- 2) PWF ; 전압력, 건구온도, 습구온도에서 수증기분압을 구한다. 식(7), (8), (9) 및 (13)에 의하며, PWSF를 사용한다.
- 3) WBF ; 전압력, 건구온도, 절대습도에서 습구온도를 구한다. PWF를 사용하여 반복 계산하며, PWSF도 사용한다.
- 4) DPF ; 전압력, 건구온도, 절대습도에서 노점온도를 구한다.

노점온도의 정의 식(6)이 만족되도록 반복계산하며, PWSF를 사용한다.

이 부프로그램은 습공기선도와 공기표의 작성, 공기조화 과정의 상태변화의 계산등에 광범위하게 이용할 수 있는데, 여기서는 가장 간

표 E1. 예제 1의 주 프로그램

```
C** *****
C   EXAMPLE - 1
C   CALCULATION OF PROPERTIES
C   -----
C
C   P=760.
C   DB=20.
C   R=50.
C   CALL PSY(3,3,P,DB,WB,DP,R,X,H,V)
C   WRITE(6,66) WB,DP,X,H,V
66  FORMAT(1H ,G15.4)
C   STOP
C   END
C** *****
```

단한 예를 들겠다.

[例題 1]

전압력  $P = 760 \text{ mm}$ , 건구온도  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 상대습도  $\phi = 50 \%$ 인 공기의 성질을 구하라.  
(解) 표 E1의 프로그램에 의해서 다음의 값이 구해진다.

- 습구온도  $t' = 13.77 \text{ }^\circ\text{C}$
- 노점온도  $t'' = 9.267 \text{ }^\circ\text{C}$
- 절대습도  $x = 0.007262 \text{ kg/kg}$
- 비엔탈피  $h = 9.178 \text{ kcal/kg}$
- 비체적  $v = 0.8400 \text{ m}^3/\text{kg}$

4. 濕空氣線圖上的 狀態變化

4.1 濕空氣線圖

습공기의 상태는 전압력을 일정하게 하면, 건구온도, 습구온도, 노점온도, 절대습도, 상대습도, 비체적 및 비엔탈피 등의 성질 중에서 어느 두개가 결정되면 다른 것도 구할 수가 있다. 따라서 두개의 성질을 기준좌표축으로 하여 각종의 습공기선도를 만들 수 있다. 그 중에서  $h$ 와  $x$ 를 사교축으로 취한 그림 1의  $h-x$  선도가 공기조화의 부하계산과 공기의 상태변화의 해석에 사용되며,  $t-h$  선도는 물과 공기가 직접적으로 접촉하면서 열을 교환하는 냉각탑등의 해석에 자주 사용된다.

그림 1에서 열수분비  $u = \Delta h / \Delta x$ 와 전열량에 대한 현열량의 비인 현열비 SHF는 실내로 취출되는 공기의 상태를 결정하는데 사용

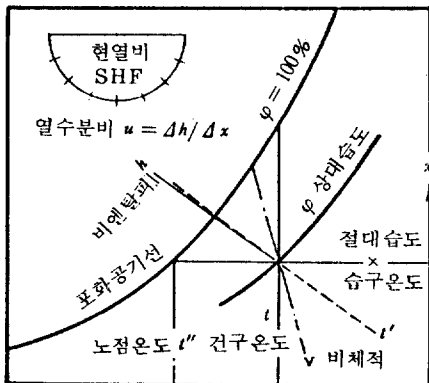


그림 1. 습공기  $h-x$  선도

된다.

4.2 濕空氣의 狀態變化

(1) 基本的 過程

공조기내에서의 실제 상태변화는 매우 복잡하여 취급하기가 곤란하지만 그 기본이 되는 것은 공기의 加熱, 冷却, 加濕, 減濕으로서 표 1 및 그림 2와 같다.

[例題 2] 冷却減濕

전압력  $P = 1 \text{ atm}$ , 공기유량  $V_a = 2000 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 공기 I ( $t_1 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t'_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ )을 표면온도  $t_f = 11 \text{ }^\circ\text{C}$ , 냉각능력  $q_c = 4 \text{ USRT}$ 의 냉각 코일에서 냉각습한 후의 출구공기의 상태 II ( $t_2, t'_2$ )와 감습량  $G_L$  ( $\text{kg/h}$ )을 구하라.

(解 1) 線圖에 의한 方法

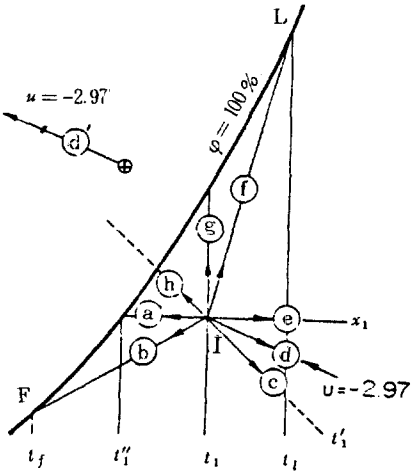
① 그림 E 2-2에서 I점의 성질을 구한다.

$$x_1 = 0.0193, \quad v_1 = 0.9$$

表 1. 濕空氣線圖上的 基本過程

現象	使用 機器	$h-x$ 線圖上的 變化	
加熱	電氣加熱器, 蒸氣·溫水加熱器	$x_1$ 一定	(e)線
加熱 加濕	溫度 $t_f$ 의 多量의 溫水	IL 方向 (L點은 $t_f$ 의 飽和空氣)	(f)線
冷却	Room Cooler 등의 空氣冷却器 ( $t_f > t'_1$ 일때)	$x_1$ 一定	(a)線
冷却 減濕	Room Cooler 등의 空氣冷却器와 $t_f$ 의 多量의 冷却水 ( $t_f < t'_1$ 일때)	IF 方向 (F點은 $t_f$ 의 飽和空氣)	(b)線
加濕	水噴霧加濕器	$t'_1$ 一定	(h)線
	蒸氣加濕器	$t_1$ 一定	(g)線
減濕	鹽化리튬 등의 液體吸收	$t'_1$ 一定	(c)線
	실리카겔 등의 固體吸收	I 點에 $u = -2.97$ 에 平行한 方向*	(d)線

注\* MKS 단위제도에 의한 습공기선도에서는  $u = -710$ 이다.



$t_1$	건구온도	$t_l$	수온
$t_1'$	습구온도	$x_1$	절대습도
$t_1''$	노점온도	$u$	열수분비
$t_f$	전열면온도	$\varphi$	상대습도

그림 2. 선도상의 공기의 기본적인 상태변화

표면온도  $t_f = 11$ , 냉각능력 4 USRT의 냉각 Coil에서 냉각

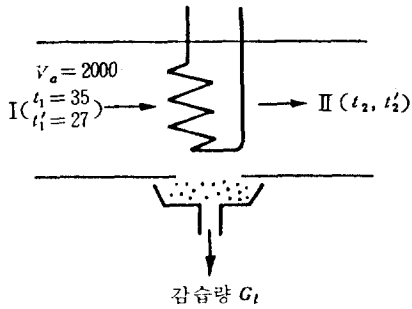


그림 E2-1. 공기의 냉각 감습

$h_1 = 84.5, \quad t_1'' = 24.2$

②  $t_f = 11 < t_1'' = 24.2$  이므로,  $t_f = 11$  의 포화공기 F와 I점을 연결하고 다음 식에서 구한  $h_2 = 61.7$  와  $\overline{FI}$ 와의 교점으로부터 출구 상태 II를 구한다.

$$h_2 = h_1 - q_c / (V_a / v_1) = 84.5 - 4 \times 3024 \times 4.1868 / (2000 / 0.9) = 61.7 \text{ (kJ/kg)}$$

③ 출구상태 II에서의 값을 읽는다.

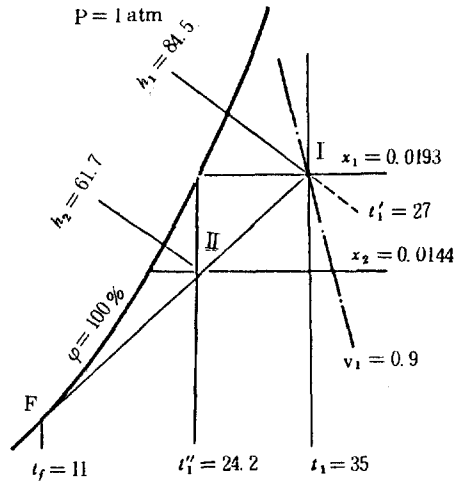


그림 E 2-2. 공기의 냉각 감습

표 E 2. 예제 2의 주 프로그램

```

C** *****
C   EXAMPLE - 2
C   COOLING AND DEHUMIDIFICATION
C   -----
C   P=1.
C   VA=2000.
C   DB1=35.
C   WB1=27.
C   TF=11.
C   1 USRT=3024kcal/h = 3024*4.1868 kJ/h
C   QC=4.*3024.*4.1868
C   CALL PSY(2.1.P,DB1,WB1,DP1,E,X1,H1,V1)
C   R=100.
C   CALL PSY(2.3.P,TF,E,E,R,XF,HF,E)
C   G=VA/V1
C   H2=H1-QC/G
C   X2=X1-(X1-XF)*(H1-H2)/(H1-HF)
C   GL=G*(X1-X2)
C   CALL PSY(2.6.P,DB2,WB2,E,R2,X2,H2,E)
C   WRITE(G,GG) DB2,WB2,GL
C   66 FORMAT(1H ,G15.4)
C   STOP
C   END
C** *****
    
```

$t_2 = 24.4, \quad t_2' = 21.1, \quad x_2 = 0.0144$

④ 감습량을 계산한다.

$$G_l = G(x_1 - x_2) = \frac{2000}{0.9}(0.0193 - 0.0144) = 10.9 \text{ (kg/h)}$$

(解 2) 電算機에 의한 방법

표 E 2의 프로그램에 의해 다음 값을 얻는다.

$t_2 = 24.78 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad t_2' = 21.30 \text{ } ^\circ\text{C},$

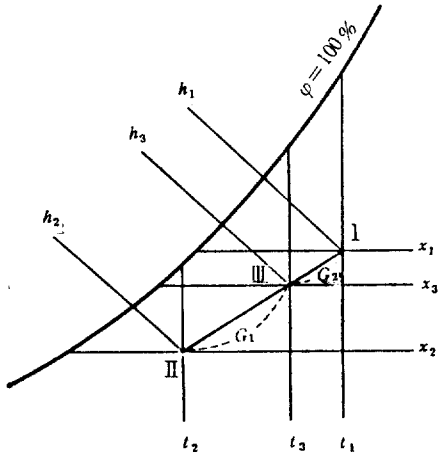


그림 3. 공기의 혼합

$$G_1 = 10.66 \text{ kg/h}$$

단열적으로  $G_1 \text{ kg}$ 의 공기 I ( $t_1, x_1$ )과  $G_2 \text{ kg}$ 의 공기 II ( $t_2, x_2$ )의 혼합은 그림 3에서와 같이 I 점과 II 점을 직선으로 연결하고 공기량의 역비인  $I\text{III} : \text{III}\text{II} = G_2 : G_1$  되게 내분하면 공기량 ( $G_1 + G_2$ )의 혼합점 III이 되며, 이 혼합점 III의 상태량은 다음 식으로 구한다.

$$x_3 = \frac{G_1 x_1 + G_2 x_2}{G_1 + G_2} \dots\dots\dots (20)$$

$$h_3 = \frac{G_1 h_1 + G_2 h_2}{G_1 + G_2}$$

[例題 3] 混合과 加熱

전압력  $P = 1.03323 \text{ kgf/cm}^2$ 의 공기 I ( $t_1 = 5^\circ\text{C}$ ,  $x_1 = 0.003$ )과 공기유량  $V_{a2} = 2000 \text{ m}^3/\text{h}$ 의 공기 II ( $t_2 = 19^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_2 = 60\%$ )를 혼합하여 공기 III ( $t_3, x_3$ )을 만든 후,  $1 \text{ kW}$ 의 전기가 열기와 성능계수  $\epsilon_h = 4.0$ , 가열능력  $q_h$  (kcal/h)의 열펌프로 가열하여, 공기 IV ( $t_4 = 28^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_4 = 30\%$ )의 상태가 되었다.

$t_3, x_3, q_h$  및 열펌프의 소요동력  $N$  (kw)을 구하라.

[解 1] 線圖에 의한 방법

① 그림 E 3-2와 같이 선도상에 공기상태 I, II ( $x_2 = 0.0083$ ,  $v_2 = 0.839$ ) 및 IV ( $x_4 = 0.007$ ,  $h_4 = 11.00$ ) 점을 구한다.

② 점 I 과 점 II를 연결하는 선과  $x_3 = x_4$

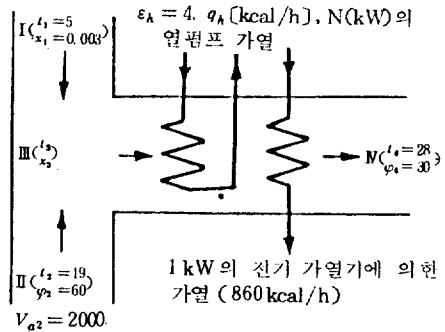


그림 E 3-1. 공기의 혼합과 가열

$$P = 1.03323 \text{ kgf/cm}^2$$

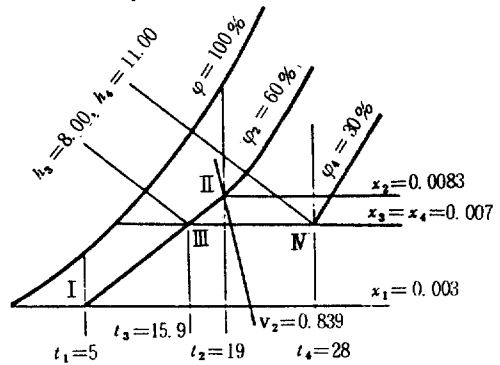


그림 E 3-2. 공기의 혼합과 가열

되는 수평선과의 교점 III을 작도하여 혼합공기 III의 성질을 구한다.

$$h_3 = 8.00, t_3 = 15.9, x_3 = x_4$$

③ 혼합공기량  $G_3$ 을 계산한다.

$$G_1 = \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} G_2$$

$$G_3 = G_1 + G_2 = G_2 \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}$$

$$= \frac{V_{a2}}{v_2} \times \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1}$$

$$= \frac{2,000}{0.839} \times \frac{0.0083 - 0.003}{0.007 - 0.003}$$

$$= 3,158.5 \text{ kg/h}$$

④  $G_3$ 을 이용하여 열펌프의 가열능력  $q_h$ 와 소요동력  $N$ 을 구한다.

표 E 3. 예제 3의 주 프로그램

```

C** *****
C   EXAMPLE - 3
C   MIXING AND HEATING
C   -----
P=1.03323
DB1=5.
X1=0.003
VA2=2000.
DB2=19.
R2=60.
C   1 kW= 860 kcal/h
QE=860.
EH=4.
DB4=28.
R4=30.
CALL PSY(4.5.P.DB1.E.E.X1.H1.E)
CALL PSY(4.3.P.DB2.E.E.R2.X2.H2.V2)
CALL PSY(4.3.P.DB4.E.E.R4.X4.H4.E)
X3=X4
G2=VA2/V2
G3=G2*(X2-X1)/(X3-X1)
G1=G3-G2
G4=G3
H3=(G1*H1+G2*H2)/G3
QH=G4*H4-G3*H3-QE
W=QH/860./EH
CALL PSY(4.6.P.DB3.E.E.E.X3.H3.E)
WRITE(6.66) DB3.X3.QH.W
66 FORMAT(1H .G15.4)
STOP
END
C** *****
    
```

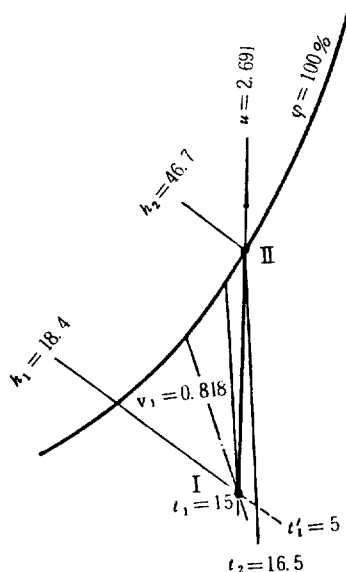


그림 E4-2. 공기의 가습

= 8.615 kcal/h

$$N = \frac{q_h}{860 \epsilon_h} = \frac{8.615}{860 \times 4} = 2.50 \text{ kw}$$

[ 解 2 ] 電算機에 의한 방법

표 E 3의 프로그램에 의해 다음 값을 얻는다.

$$t_3 = 15.91 \text{ }^\circ\text{C}, x_3 = 0.007044 \text{ kg/kg,}$$

$$q_h = 8.115 \text{ kcal/h, } N = 2.359 \text{ kW}$$

(3) 空氣의 狀態變化와 u의 값

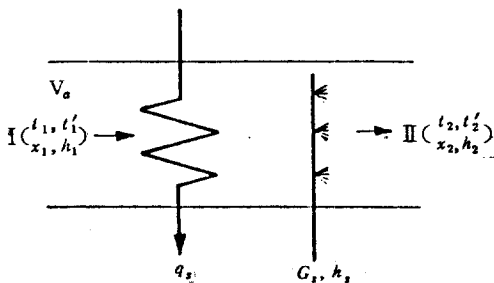
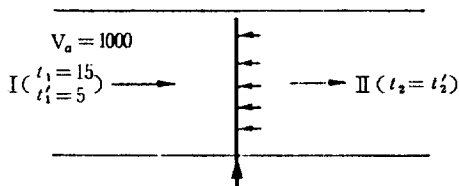


그림 4. 가열과 가습



$t_2 = 11.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 포화증기  
( $h_2 = 2691$ )에 의한 가습

그림 E 4-1. 공기의 가습

$$q_h = G_3 (h_4 - h_3) - 860$$

$$= 3.158.5 (11.0 - 8.0) - 860$$

표 E 4. 예제 4의 주 프로그램

```

C** *****
C   EXAMPLE - 4
C   HUMIDIFICATION
C   -----
P=1.
VA=1000.
DB1=15.
WB1=5.
HS=2691.
CALL PSY(2.1.P.DB1.WB1.E.E.X1.H1.V1)
DB2=DB1
I RS=100.
CALL PSY(2.3.P.DB2.E.E.RS.X2.E.E)
H2=H1+HS*(X2-X1)
CALL PSY(2.6.P.DB2.E.E.R2.X2.H2.E)
IF(R2.LT.99.9) GO TO 1
G=VA/V1
GS=G*(X2-X1)
WRITE(6.66) GS.DB2
66 FORMAT(1H .G15.4)
STOP
END
C** *****
    
```

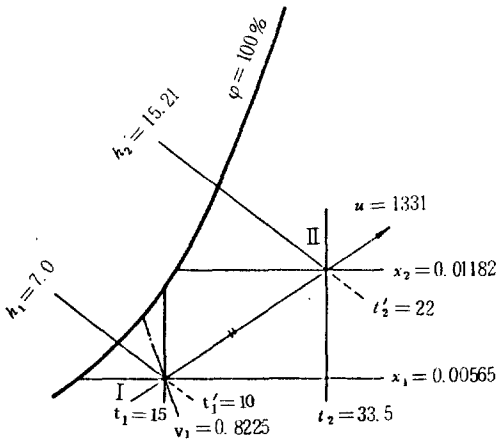


그림 E 5. 공기의 가열과 가습

그림 4는 유량  $V_a$  ( $m^3/h$ )의 공기 I에 외부로부터  $q_s$ 의 현열량과  $G_s$  ( $kg/h$ )의 증기를 가하여 공기 II의 상태로 가열, 가습한 경우이며, 공기의 질량유량을  $G = V_a / v_1$ 라 하면 열수분비  $u$ 는 다음과 같다.

$$G(h_2 - h_1) = G \Delta h = q_s + G_s h_s$$

$$G(x_2 - x_1) = G \Delta x = G_s$$

$$u = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{q_s}{G_s} + h_s \dots\dots\dots (21)$$

증기 대신에 분무수로 가습할때는 식(21)의  $h_s$ 와  $G_s$ 는 물의 엔탈피와 분무수량(증발수량)  $G_l$ 을 사용한다.

[例題 4]

전압력  $P = \text{latm}$ , 공기유량  $V_a = 1,000 m^3/h$ 의 공기 I ( $t_1 = 15^\circ C$ ,  $t'_1 = 5^\circ C$ )에  $110^\circ C$ 의 포화증기 ( $h_s = 2,691 \text{ kJ/kg}$ )를 분무가습하여 포화공기 II ( $t_2 = t'_2$ )로 하는데 필요한 증기량  $G_s$  ( $kg/h$ ) 및  $t_2$ 를 구하라.

[解 1] 線圖에 의한 방법

①  $h-x$  선도상에 상태점 I을 표시하고, 식(21)로부터 상태변화의 방향인  $u = 2,691 \text{ (kJ/g)}$ 을 구한다.

② 상태점 I을  $u = 2,691$ 의 방향으로 연장하여 포화공기선 ( $\phi = 100\%$ )과의 교점 II를 구한다.

③ 상태점 I과 II에서의 성질들을 읽는다.  
 $v_1 = 0.818$ ,  $h_1 = 18.4$

표 E 5. 예제 5의 주 프로그램

```

C** *****
C  EXAMPLE - 5
C  HEATING AND HUMIDIFICATION
C  -----
C  P=760.
C  VA=2000.
C  DB1=15.
C  WB1=10.
C  HS=642.8
C  GS=15
C  QS=10320.
C  CALL PSYC(3.1,P,DB1,WB1,E.E,X1,H1,V1)
C  G=VA/V1
C  X2=X1+GS/G
C  H2=H1+QS/G+HG*GS/G
C  CALL PSYC(3.6,P,DB2,WB2,E.E,X2,H2,E)
C  WRITE(6,66) DB2,WB2
66  FORMAT(1H ,G15.4)
C  STOP
C  END
    
```

C\*\* \*\*\*\*\*

$h_2 = 46.7$ ,  $t_2 = 16.5$

④ 증기량  $G_s$ 를 계산한다.

$$G_s = \frac{G(h_2 - h_1)}{h_s} = \frac{(V_a/v_1)(h_2 - h_1)}{h_s}$$

$$= \frac{(1,000/0.808)(46.7 - 18.4)}{2,691}$$

$$\approx 12.86 \text{ kg/h}$$

[解 2] 電算機에 의한 방법

표 E 4의 프로그램에 의해 다음 값을 얻는다.

$G_s = 12.83 \text{ (kg/h)}$   
 $t_2 = 16.67 \text{ (}^\circ C)$

[例題 5]

전압력  $P = 760 \text{ mmHg}$ , 공기유량  $V_a = 2,000 m^3/h$ 의 공기 I ( $t_1 = 15^\circ C$ ,  $t'_1 = 10^\circ C$ )에  $t_s = 110^\circ C$ 의 포화증기 ( $h_s = 642.8 \text{ kcal/kg}$ )  $G_s = 15 \text{ kg/h}$ 와 현열부하  $q_s = 10,320 \text{ kcal/h}$  ( $12 \text{ kw}$ 의 전열기)를 가하여 가열가습한 후의 공기의 출구상태 II ( $t_2, t'_2$ )를 구하라.

[解 1] 線圖에 의한 방법

①  $h-x$  선도상에 I점을 표시하고 성질들을 읽는다.

$v_1 = 0.8225$ ,  $x_1 = 0.00565$ ,  $h_1 = 7.0$

②  $x_2, h_2$  및  $u$ 를 계산한다.

$G = V_a / v_1 = 2,000 / 0.8225$

$x_2 = x_1 + G_s / G = 0.01182$

$u = \frac{q_s}{G_s} + h_s = 1,331$



표 A 1. 濕空氣의 性質計算 부 프로그램

```

C** *****
C**
SUBROUTINE PSY(L,M,P,DB,DP,R,X,H,V)
-----
C**
C**
C FOR CALCULATION OF THERMODYNAMIC PROPERTIES
C OF MOIST AIR
C * Reference - ASHRAE Handbook of Fundamentals,
C Chapl.6,1981
C * Developed by D.C.KIM, KMA.
C**
C L INDICATES THE UNIT SYSTEMS
C**
C L=1 : P=KPA H=KJ/KG(DA)
C L=2 : P=ATM H=KJ/KG(DA)
C L=3 : P=MMHG H=KCAL/KG(DA)
C L=4 : P=KGF/CM**2 H=KCAL/KG(DA)
C**
C M INDICATES THE KNOWN INPUTS AND THE OUTPUTS
C**
C M=1 : P,DB,WB DP,R,X,H,V
C M=2 : P,DB,DP WB,R,X,H,V
C M=3 : P,DB,R WB,X,H,DP,V
C M=4 : P,DB,H WB,R,X,DP,V
C M=5 : P,DB,X WB,R,H,DP,V
C M=6 : P,H,X DB,WB,R,DP,V
C**
C ***** EXTERNAL FUNCTION *****
C**
C PWSF : SATURATED VAPOR PRESSURE AT DB
C PWF : VAPOR PRESSURE AT P,DB AND WB
C WBF : WET-BULB TEMPERATURE AT P,DB AND X
C DPF : DEW-POINT TEMPERATURE AT P,DB AND X
C**
C ***** VARIABLES *****
C**
C P : TOTAL PRESSURE OF THE MOIST AIR
C DB : DRY BULB TEMPERATURE (degree Celcius)
C WB : WET-BULB TEMP.
C DP : DEW POINT TEMP.
C R : RELATIVE HUMIDITY (%)
C X : HUMIDITY RATIO (kg/kg-dry air)
C H : SPECIFIC ENTHALPY (kcal/kg or kJ/kg)
C V : SPECIFIC VOLUME (cubic meter/kg)
C**
C**
C**
C**
DIMENSION PB(4)
DATA (PB(K),K=1,4)/101.325, 1.,.760, 1.03323 /
C**
P=P/PB(L)
GO TO (10,20,30,40,50,60),M
10 PW=PWF(P,DB,WB)
R=PW/PWSF(DB)
GO TO 15
20 PW=PWSF(DP)
GO TO 15
30 R=.01*R
PW=R*PWSF(DB)
15 X=.62198*PW/(P-PW)
GO TO (90,70,80),M
40 IF(L,GE,3) H=H*.1868
X=(H-DB)/(2501.0+1.805*DB)
GO TO 50
60 IF(L,GE,3) H=H*.1868
DB=(H-2501.*X)/(1.+1.805*X)
50 PW=P*X/(.62198+X)
70 R=PW/PWSF(DB)
80 WB=WBF(P,DB,X)
90 IF(M,NE,2) DP=DPF(P,DB,X)
IF(M,NE,4) AND (M,NE,6) H=DB+(2501.+1.805*DB)*X
IF(L,GE,3) H=H*.1868
V=4.554E-3*(.62198*X)*(DB+273.15)/P
R=R*100
P=P*PB(L)
RETURN
END

```

```

C** *****
C**
FUNCTION PWSF(DB)
*****
C**
C** PWSF AS ATM --- SATURATED VAPOR PRESSURE AT DB
C** ASHRAE METHOD --- WEXLER-HYLAND FORMULA
DATA C1,C2,C3 / 5674.5359,6.3925247, 0.9677813E 2
DATA C4,C5,C6 / 0.62215701E 6,0.20747025E 8, 0.9484021E 12
DATA C7,C8,C9 / 4.1634019, 5800.2296,1.3914993
DATA C10,C11,C12 / 0.048610239,0.41764768E 4, 0.14452093E 7
DATA C13 / 6.5459673
T=DB+273.15
IF(DB,GE,0.) GO TO 1
S=C1/T+(C2+C3*T+C4*T**2+C5*T**3+(C6*T**4+C7)*ALOG(T)
GO TO 2
1 S=C8+T*(C9+C10*T+C11*T**2+C12*T**3+C13)*ALOG(T)
2 PWSF=EXP(S)/101325
RETURN
END
C**
C** *****
C**
FUNCTION PWF(P,DB,WB)
*****
C**
C** VAPOR PRESSURE(atm)-AT DB AND WB
PWS=PWSF(WB)
XSS=.62198*PWS/(P-PWS)
HWS=4.186*WB
IF(WB,LE,0.) HWS=333.43+2.031*WB
HSS=2501.+1.805*WB
H=2501.+1.805*DB
X=(HSS+HWS)*XSS*DB*WB/(H+HWS)
PWF=P*X/(.62198*X)
RETURN
END
C**
C** *****
C**
FUNCTION WBF(P,DB,X)
*****
C**
C** WET BULB TEMPERATURE AT DB AND X
WB=WB
PWH=P*X/(.62198*X)
1 PW=PWF(P,DB,WBF)
IF(PW-PWH) 3,6,2
2 WBF=WBF+1.
GO TO 1
3 WBF=WBF+1.
PWH=PWF(P,DB,WBH)
Y=(PWH-PW)/(PWH-PW)
WBF=WBF*Y+WBF*(1.-Y)
6 RETURN
END
C**
C** *****
C**
FUNCTION DPF(P,DB,X)
*****
C**
C** DEW POINT TEMPERATURE AT DB AND X
DPF=DB
PWD=P*X/(.62198*X)
1 PWS=PWSF(DPF)
IF(PWS-PWD) 3,5,2
2 DPF=DPF+1.
IF(DPF+100.) 4,1,1
3 DPH=DPF+1.
PWH=PWSF(DPH)
Y=(PWD-PWS)/(PWH-PWS)
DPF=DPH*Y+DPF*(1.-Y)
GO TO 5
4 DPF=-100.
5 RETURN
END
C**
C** *****

```

$$h_2 = h_1 + \frac{q_s}{G} + \frac{G_s h_s}{G} = 15.21$$

③ 상태점 I을  $u = 1.331$  의 방향으로 연장하여  $x_2 = 0.01182$  와의 교점 II를 구하고, 구하는 성질을 읽는다.

$$t_2 = 33.5 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t'_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$$

[解 2] 電算機에 의한 解法

표 E 5의 프로그램에 의해 다음 값을 얻는다.

$$t_2 = 33.41 \text{ }^\circ\text{C}, \quad t'_2 = 21.90 \text{ }^\circ\text{C}$$

## 5. 結 言

가장 최근에 개발되어 1981 ASHRAE 편람 기초편에 게재된 이상기체로서의 습공기에 관한 관계식을 이용한 전산프로그램을 작성하여, 습공기의 성질계산과 간단한 과정해석을 소개하였다.

그러나 습공기선도상의 공조과정중에서 재열이나 바이패스에 의한 취출구의 상태 결정, 냉각탑의 해석 및 증발냉각기의 해석에 관한 문제들은 취급하지 못하였으나 가까운 장래에 간 이 에너지 해석법과 함께 다룰 수 있는 기회가 있으리라 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. J.H. Keenan et al, "Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water, Including Vapor, Liquid, and Solid Phases (English Units)," John Wiley and Sons, Inc, New York, 1969.
2. ASME Steam Tables, American Society of Mechanical Engineers, 1967.
3. J.A. Goff and S. Gratch, "Thermodynamic properties of moist air," ASHVE Transactions, Vol.51, 1945.
4. J.A. Goff, "Standardization of thermodynamic properties of moist air," ASHVE Transactions, Vol.55, 1949.
5. "ASHRAE Brochure on Psychrometry," ASHRAE, New York, NY, 1977.
6. T. Kusuda, "Algorithms for Psychrometric Calculations (Skeleton Tables for the Thermodynamic Properties of Moist Air)," National Bureau of Standards, Building Science Series Publication No.21, 1970.
7. A. Wexler and R.W. Hyland, "A formulation for the thermodynamic Properties of the saturated pure ordinary water-substance from 173.15 to 473.15 K." Final Report, ASHRAE Research Project RP 216, 1980, Pt1. Also ASHRAE Transactions, Vol.89, Part 2A, 1983.
8. A. Wexler and R.W. Hyland, "Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 to 473.15 K, and of saturated moist air from 173.15 to 372.15 K, at pressures to 5 MPa," Final Report, ASHRAE Project RP216, 1980, pt.3. ASHRAE Transactions, Vol.89, Part 2A, 1983.
9. R.B. Stewart, R.T. Jacobsen and J.H. Becker, "Formulations for the Thermodynamic Properties of Moist Air at Low Pressure as Used for Construction of New ASHRAE SI Unit Psychrometric Charts," Final Report ASHRAE Research Project RP 257, 1980, pt3. Also ASHRAE Trans., Vol.89, pt2A, 1983.
10. "ASHRAE Handbook, 1981 Fundamentals," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1981.
11. A. Wexler, R.W. Hyland and R.B. Stewart, "Thermodynamic Properties of Dry Air, Moist Air and Water and SI Psychrometric Charts," ASHRAE, 1983.
12. 手塚後一, 藤田稔彦, "濕空氣線圖와 그 應用(1)," 日本 空氣調和・衛生工學 第57卷 第12號, 1983.