

## 기류 건조기의 설계(II)\*

權 英 秀 · 朴 明 治

한국과학기술연구소 공업화시험실

### 9. 기류건조기의 구체적 해석방법

기류건조기의 건조관내에서 일어나는 현상은 앞의 (제 I 보)<sup>10)</sup> 식 ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮의 5원 1제 비선형 연립 미분방정식을 식 ⑬, ⑭와 더불어 주어진 피건조물의 여러 성질과 운전조건 하에서 해석함으로써 파악된다.

여기서 피건조물의 성질들이란 밀도, 결정열, 비열, 물질전달계수, 열전달계수, 증기압, 입도분포, 형태보정계수등의 물리적성질과 열안정성 즉 허용최고온도이며, 운전조건이란 처리량, 피건조물의 초기 및 최종 수분함량, 투입온도, 열풍의 공급온도 및 습도이다. 열풍의 공급온도는 열풍발생 방법과 제품의 열안정성을 고려하여 정하며, 열풍발생방법은 제품의 오염문제, 경제성 및 제어문제 (소규모일 때는 직화법의 경우 제어가 곤란하므로 증기 가열법을 택하는 경우가 많다) 등을 고려하여 정한다.

주어진 운전조건과 각 식의 초기조건과의 관계는 아래와 같다.

식 ⑪의 초기조건 : 피건조물의 초기 수분함량

식 ⑫의 초기조건 : 열풍의 공급온도

식 ⑬의 초기조건 : 피건조물의 투입온도

식 ⑭의 초기조건 : 피건조물의 초기속도 = 0

식 ⑮의 초기조건 : 통과높이 = 0 (투입지점기준)

식 ⑬의 초기조건 : 열풍의 초기습도 (식 ⑫참조)

이와같이 초기조건이 주어지더라도 열풍량과 건조관경이 정하여지지 않으면 한 단계의 계산도 불가능할 것이다. 이 두 값은 운전조건에는 직접 주어지지 않으나 피건조물의 온도가 허용 최고온도 이상이 되지 않아야 된다는 운전조건과 최종수분함량까지 안정된 운전상태 하에서 경제적으로 건조되도록 하여야 한다는 건조기

설계의 기본원칙에 의하여 간접적으로 정하여지는 것이다.

이 두 값만 정하여지면 앞의 연립방정식을 주어진 초기 조건하에서 피건조물의 수분함량이 요구되는 값 이하가 될 때까지 수치적으로 적분 함으로써 출구에서의 피건조물의 온도, 열풍의 온도, 고체의 속도, 건조관의 높이, 체류시간등의 일체의 건조현상이 파악되는 것이므로 기류건조기의 설계문제는 열풍의 공급온도와 이 두 값을 어떻게 앞의 기본원칙에 잘 부합되게 택하느냐 하는 문제로 축소되었다.

열풍량과 건조관경은 아래의 순서에 따라 결정한다.

1) 제품의 출구온도와 열풍의 출구온도를 가정한다. 일반적으로 출구에서의 제품과 열풍의 온도차는 10~30°C 정도가 되게 한다.

2) 건조관 전체에 대하여 열수지를 취하여 열풍의 양을 구한다. 투입된 피건조물이 출구온도까지 가열된 이후 출구온도에서 수분이 증발하여 그 증기가 열풍의 출구온도까지 가열되는 경로를 가정하면 열수지 식은 아래와 같다.

$$G = \frac{W}{(C_s + H_1 C_v)(T_1 - T_2)} [(C_s + M_1 C_w)(T_2' - T_1') + (M_1 - M_2) \{ \lambda v_2 + \lambda_c + C_v(T_2 - T_2') \}] \quad (20)$$

3) 피건조물의 최대 입자경에 대해 식 ⑦에 의하여 출구에서의 종말속도를 구한다. Table. 2에 여러 입자경과 열풍온도에 대한 종말속도의 값을 소개하였다.

4), 앞의 2)에서 구한 열풍량이 건조관 출구에서 종말속도보다 2.5~3m/sec 정도로 더 큰 풍속을 유지할수있게 건조관경을 정한다.

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{G \cdot v_{H_2}}{V_{g_2}}} \quad (21)$$

5) 위에서 구한 열풍량과 건조관경에 대하여 5원 연립 미분방정식을 운전 조건에서 제시된 초기조건에

\* 第 1 報 : 화학공학, 12(1974), 353.

Table 2. Terminal Velocities of Spheres<sup>4)</sup>

DIAMETER [mm]	AIR TEMP. [°C]					
	15	90	205	305	425	540
0.05	0.074	0.062	0.052	0.045	0.041	0.037
0.1	0.25	0.22	0.19	0.17	0.16	0.14
0.25	0.91	0.87	0.83	0.81	0.78	0.74
0.5	1.98	2.01	1.99	2.00	1.99	1.95
0.6	2.39	2.43	2.46	2.45	2.46	2.44
0.7	2.79	2.87	2.91	2.93	2.92	2.93
0.8	3.14	3.23	3.35	3.42	3.42	3.42
0.9	3.48	3.66	3.79	3.81	3.90	3.90
1.0	3.84	4.00	4.21	4.27	4.33	4.42
1.25	4.73	4.91	5.12	5.27	5.44	5.56
1.5	5.37	5.76	5.98	6.25	6.50	6.68
2.0	6.71	7.18	7.71	8.09	8.45	8.65
2.5	7.71	8.45	9.20	9.73	10.32	10.55
3.0	8.75	9.56	10.5	11.3	12.0	12.3
5.0	11.6	13.1	14.6	15.9	17.1	18.0

Density difference ( $\rho_p - \rho_g$ ) of 1 g/cm<sup>3</sup>

대하여 해석한 후 다음 사항에 대하여 검토한다.

- (가) 피건조물 출구온도 : 허용최고온도와 비교
- (나) 출구에서의 열풍과 피건조물의 온도차
- (다) 출구에서의 열풍중의 수증기의 분압과 피건조물의 수증기압과의 차
- (라) 열풍의 속도와 고체의 속도
- (마) 요구되는 건조시간 및 건조관의 높이

만일 건조시간이 무리하게 길면 그 원인이 열전달에 있는지 물질전달에 있는지를 파악하여 대책을 강구한다. (다)의 증기압차는 충분하나 (나)의 온도차가 적으면 열전달이 윌속이므로 열풍공급온도를 올리거나 열풍량을 증가시킨다. (나)의 온도차는 충분하나 (다)의 증기압차가 적을 경우는 (초기 수분함량이 매우 크거나 열풍공급온도가 높을 경우에만 발생함) 물질전달이 윌속이므로 열풍공급온도는 낮추고 열풍량을 증가시킨다(일반적으로 열풍의 분압이 고체의 증기압의 1/2이하가 되게 한다). (나) 및 (다)의 온도와 증기압차가 충분한데도 건조시간이 무리하게 길 경우는 건조가 잘 안되는 물질이므로 기류건조기외의 다른 건조방식을 택하여야 할 것이다.

건조시간이 매우 짧은 경우 (다)의 증기압차가 클 경우는 열풍량을 줄이고 적을때는 열풍공급 온도를 낮춤으로서 열에너지의 소비를 줄일 수 있다. 이렇게 하면 건조시간은 다소 길어질 것이다.

이와같이 열풍공급온도, 열풍량, 건조관경을 운전경

DIAMETER [mm]	AIR TEMP. [°C]					
	15	90	205	305	425	540
0.05	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08	0.74
0.1	0.46	0.41	0.37	0.33	0.30	0.30
0.25	1.51	1.48	1.43	1.40	1.36	1.34
0.5	3.17	3.20	3.26	3.26	3.26	3.30
0.6	3.78	3.84	3.94	4.02	4.02	4.05
0.7	4.33	4.51	4.70	4.73	4.82	4.85
0.8	4.85	5.07	5.27	5.43	5.49	5.61
0.9	5.42	5.64	5.91	6.10	6.25	6.25
1.0	5.97	6.19	6.50	6.80	6.89	7.05
1.25	7.10	7.53	7.86	8.24	8.62	8.79
1.5	7.78	8.65	9.40	9.62	10.0	10.4
2.0	9.72	10.6	11.7	12.3	13.0	13.4
2.5	11.3	12.5	13.7	14.7	15.5	16.0
3.0	14.8	14.0	15.5	16.6	17.7	18.6
5.0	16.7	18.6	21.2	23.0	25.0	26.4

Density difference ( $\rho_p - \rho_g$ ) of 2 g/cm<sup>3</sup>

비, 시설투자, 운전조건, 제어성등을 고려하여 만족할 만한 건조조건을 얻을 때까지 수정 반복하여 해석하여야 한다. 이 계산에서 피건조물의 입자경은 대표경(평균치) 뿐만 아니라 최대입자와 최소입자에 대하여도 해석하여 풍속은 최대입자에 준하되 건조관 높이는 최소입자에 대한 값을 택하는 것이 안전하다.

## 10. Computer Program

어떤 문제를 전자계산기로 처리하기 위하여는 우선 그 계산에 필요한 도표 혹은 수표형의 물성치및 계수들을 program 에 이용할 수 있는 형태로 바꾸어야 한다. 그 방법으로는 첫째 함수꼴로 바꾸는 것과, 둘째 수표화하여 기억시키고 내삽하여 사용케하는 것이 있다. 후자는 많은 input data 와 기억량을 필요로 하고 내삽 program 이 첨부되어야 함으로 번거로우나 직접 이용할 수 있는 장점이 있다. 전자는 오차가 적게 함수화하는 수치해석의 지식과 예비 절차를 거쳐야 하나 program 작성과 그의 이용에 편리하다. 여기서는 함수화방법을 택하였다.

### 10-1 공기와 물의 물리적성질의 함수화

공기와 물의 물리적 성질은 건조 계산에서 피건조물 종류에 무관하게 항상 사용되는 것이므로 Table 3 와 같이 건조 계산에 이용되는 범위에 대하여 이들을 함수

Table 3. Physical properties of air and water

성질	단위	함수	적용범위	최대오차
물의 증발 잠열	Kcal/kg	$\lambda_w = 595. - 0.55T'$	20~100°C	±0.35%
물의 비열	Kcal/kg°C	$C_w = 1.0$	20~100°C	±0.6%
증기의 비열	"	$C_v = 0.45$	0~400°C	±4.0%
공기의 비열	"	$C_g = 0.241 + 0.00003T$	0~400°C	±0.2%
증기의 점도	cp	$\mu = 0.01754 + 0.0000417T$	0~400°C	±4.0%
공기의 흡습 비율	m³/kg B. D. A	$v_H = (0.773 + 1.244H) \frac{273-T}{273}$	이상 기체 법칙	
공기의 밀도	kg/m³	$\rho_g = \frac{1+H}{v_H}$	"	

수화하여 input 에 의하지 않고 이 값들이 program 내에서 직접 발생되도록 하였다. Table 3의 물의 증발잠열 및 비열과 증기의 비열에 의해 계산된 증기의 enthalpy는 증발온도(경로)에 무관하다는 열역학적 성질에 부합됨을 쉽게 알 수 있다.

### 10-2 항력계수(Drag coefficient)의 함수화

Reynolds No.의 값이 200~4,000인 범위에서 단일 입자에 대한 항력계수는 아래식으로 표시된다.

$$C_{Ds} = \frac{80}{Re} + 0.38 \quad (22)$$

입자군에 대하여는 ⑨식의  $\kappa$ 가 근사하게 아래식과 같이 영향을 준다<sup>(11)</sup>.

$$C_D = C_{Ds}(1 - \kappa)^{-4.7} \quad (23)$$

식 ②, ③으로써 Fig. 8(제 I 보)의  $C_D$ 의  $Re$ 와  $\kappa$ 와의 관계를 대신하여 program에 이용하였다.

### 10-3 피건조물의 물리적성질의 함수화

이 값들은 피건조물 종류에 따라 각각 다르나 유사한 곡선형일 것이므로 각 성질에 적당한 함수형을 정하여 program에 반영하고 이 함수들중의 상수들은 input data로써 읽도록하여 어떠한 피건조물에 대하여도 이 상수들의 값만 알면 본 program을 그대로 사용할 수 있게 하였다.

#### 1) 증기압

Fig. 5에서 보는 바와 같이 일반적인 흡습고체의 수증기 증기압은 수분함량과 온도의 함수이며 수분함량이 일정할때는 Clausius-Clapeyron 식에 준하여

$$\ln P_s = A_p(M) - \frac{B_p}{T' + 273.}$$

와 같이 표시되며 다른 수분함량에 대한 직선과 평행이므로 절편  $A_p(M)$ 만이 수분함량( $M$ )의 함수임을 알 수 있다. 절편  $A_p(M)$ 을  $\ln M$ 의 2차 함수로 가정하여 아래의 함수형으로 정하였다.

$$\ln P_s = A_{p1} + A_{p2} \cdot \ln M + A_{p3} \cdot (\ln M)^2 - \frac{B_p}{T' + 273} \quad (24)$$

Fig. 5의 경우에 대하여 계산된 이 상수들의 값은 아래와 같다.

$$A_{p1} = 18.4971$$

$$A_{p2} = 0.114478$$

$$A_{p3} = -0.045449$$

$$B_p = 4777.9$$

#### 2) 물질전달계수(KAu)

Fig. 7에서와 같이 물질전달계수는 수분함량( $M$ )의 함수이며 log-log 도표에서 곡선임으로 아래와 같은 4개의 상수를 갖는 함수형으로 정하였다.

$$KAu = \frac{M^P K}{A_K + B_K M^{QK}} \quad (25)$$

이 식의 상수들의 값은  $M$ 의 값이 등비수열이 되는 4점을 식 ②에 대입하여 쉽게 구할 수 있다. Fig. 7의 경우 등비를 4.0으로 취하여 다음의 4점을 대입하면 각 상수는 아래와 같이 계산된다.

대입한점		계산된 상수
M	KAu	$A_K = 267.185$
0.05	$0.155 \times 10^{-4}$	$B_K = 1270.828$
0.20	$1.266 \times 10^{-4}$	$P_K = 1.92051$
0.80	$5.665 \times 10^{-4}$	$Q_K = 1.63261$
3.20	$10.66 \times 10^{-4}$	

#### 3) 열전달계수(hAu)와 비열

열전달계수와 비열은 온도의 1차 함수로 보아 아래의 함수형으로 정하였다.

HOLLERCHECK RC.0001,CO.0020		PROGRAM PNEUDRY 72/74 CPT=1	FTN 4.1#FSR367	02/14/75 10.49.42.	PAGE 1
		PROGRAM PNEUDRY (INPUT, OUTPUT)			
		C ANALYSIS OF PNEUMATIC CONVEYING DRYER			
5		C TG=AIR IEMPIDEG-C 1, CAS =AIR RATE(KG/SEC), G=DRY-TIME(SEC.)			
		C TS=SOL IEMPIDEG-C 1, SOLIC=SOL RATE(KG/SEC), EC=TIME INACT(SEC.)			
		C US=AIR VELCM/SEC 1, ROUG = AIR CONS(KG/CM) * BF*TIME LIME(SEC.)			
		C US=COL VELCM/SEC 1, FOLS =SOL CONS(KG/CM) * PLM*TIME LIME/NO 1			
		C PG=PAR PRES(MPG) 1, PAF =AFOR F(KCAL/KG), RE =RE. NO. 1 ----			
10		C PS=VAP PRES(MPG) 1, PCRY =CRYST F(KCAL/KG), CC =ERAG COF1 ----			
		C CS=AIR CP(KCAL/KG), CHAL =HEAT Y-CONE(---), SP =FACTOR 1 ----			
		C CS=SOL CP(KCAL/KG), CHAU =HEAT Y-CONE(---), EEE=VOID FRO1 ----			
		C EM=MOISTURE(X-DRY) 1, WSC =AIR WSC(KG/CM-S), EL =TUBE HT(METER)			
		C CP=PART DIAMETER 1, VHUP =MUPIC VOL(KG/KG), CIA=TUBE DIAMETER 1			
15		C DIMENSION F(35),Y(5),CY(5),ANAME(3)			
		C EQUIVALENCE			
		1 (Y(1), EM), (Y(2), TG), (Y(3), TS), (Y(4), US), (Y(5), EL)			
		2 (CY(1), CHAL), (CY(2), CHAU), (CY(3), CS), (CY(4), CC), (CY(5), EEE)			
20		C READ PROPERTIES OF MATERIAL TO BE DRIED			
		READ 1,ANAME, RCUS,PCRY,SP,CS1,CS2			
		READ 2,PK,CK,AK,BK,AF,AP1,AP2,AP3,EP			
25		C READ OPERATION CONDITION			
		50 READ 2,TG,TS,CAS,SOLIC,MUPC,ENG,CIA,CC,CF,CF			
		IF (TG) 55,59,15			
30		C PRINT MATERIAL PROPERTIES AND OPERATION CONDITION			
		15 PRINT 3,ANAME			
		PRINT 4,PK,FK,BK,CK,RCUS,AK,BK,PCRY,AP1,AP2,AP3,BK,SP,CS1,CS2			
35		PRINT 5,6,7,8,9,SOLIC,TS,CIA,ENG,CF,MUPC			
		C INITIAL SETTING AND INITIAL CONDITIONS			
		50C =SOLID/GAS			
40		AREA=.785375*CIA**2			
		LND =NO			
		LINE=0			
		G =0.			
		US =0.			
45		EL =0.			
		HUM =MUPC			
		EP =ENG			
		C PRINT HEAD AND CALL RANGE-MUTIA SUBROUTINE			
50		C			
		PRINT 1 5			
		21 L =3			
		M =0			
55		23 CALL RANGE (F,C,D,5,Y,2),F,L,M,w)			
		IF (L-1) 24,23,24			
		24 GO TO (25,26,27),L			
		C			
HOLLERCHECK RC.0001,CO.0020		PROGRAM PNEUDRY 72/74 CPT=1	FTN 4.1#FSR367	02/14/75 10.49.42.	PAGE 2
		C CALCULATION FOR AIR AND VAPOR PROPERTIES			
60		25 HUM =MUPC*506*(ENG-EM)*.31			
		PG =768.*HUM/(1.62+HUM)			
		VHUP=(1.773+1.244*HUM)* (273.+TG)/273.			
		ROUG=(1.+VHUP)/VHUM			
65		CG =.241+.0002*TG			
		WSC=(1.1754+.000412*TG)*0.101			
		HVAP =555. .55 *TS			
		UG =635*VHUP /AREA			
		C CALCULATION FOR SOLID PROPERTIES			
70		C CHAU =EM**FK/(AY+BK*EM**CK)			
		CHAU = AK + BK*TS			
		ALM =#LOG(EM)			
		PC =EXP (AF1+(AP2+AP3*ALM)*ALM -EP/(TS+273.))			
75		CS =CS1+CS2*TS			

Fig. 9. FORTRAN program for analysis of pneumatic conveying dryer or cooler (continus)

PROGRAM PNEUDRY	73/74	OPJ=1	PTH 5.1-100357	02/19/75	10-10-93	PAGE	3
-----------------	-------	-------	----------------	----------	----------	------	---

Fig. 9. FORTRAN program for analysis of pneumatic conveying dryer or cooler

$$hAu = A_h B_h \cdot T' \quad (26)$$

$$C_s = C_{s1} + C_{s2} \cdot T' \quad (27)$$

이 외의 피건조물의 물리적성질인 밀도 ( $\rho_p$ ), 결정열 ( $\lambda_c$ ), 입자의 형태 보정계수 ( $F$ ), 입자경 ( $d$ )은 상수로 직접 input data로 읽도록 하였다.

#### 10-4 FORTRAN Program

기류건조기를 해석하도록 작성한 FORTRAN Program은 Fig. 9와 같다. 이 program은 건조시간( $\theta$ )을 독립변수로 취한 수분함량( $M$ ), 열풍온도( $T$ ), 고체온도( $T'$ ), 고체속도( $V_s$ ), 고체의 통과높이( $L$ )에 관한 5원 1계 비선형 연립미분방정식(식 ⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮)의 초기치 문제를 수치적분 하도록<sup>12)</sup> 짜여진 것이다. 여기서 사용한 "RUNGE" Subroutine은 Kuo<sup>13)</sup>의 것을 사용하였다. Table. 4에 이 program에 사용된 변수와 본문에 사용한 것들을 대비하였으며 program 내에 comment문을 삽입하여 쉽게 이해할 수 있도록 하였다.

Table 4. Variables in FORTRAN Program

FORTRAN form	Equation form	FORTRAN form	Equation form
TG	$T$	GAS	$G$
TS	$T'$	SOLID	$W$
UG	$V_g$	ROUG	$\rho_g$
US	$V_s$	ROUS	$\rho_p$
UT	$V_t$	HVAP	$\lambda_v$
EM	$M$	HCRY	$\lambda_c$
EL	$L$	CKAU	$KA_u$
HUM	$H$	HAU	$hAu$
EMO	$M_1$	VISC	$\mu$
HUMO	$H_1$	VHUM	$v_H$
DTG	$dT/d\theta$	Q	$\theta$
DTS	$dT'/d\theta$	DQ	$\Delta\theta$
DEM	$dM/d\theta$	QF	$\theta_f$
DUS	$dV_s/d\theta$	RE	$R_e$
DEL	$dL/d\theta$	CD	$C_D$
PG	$P_g$	SF	$F$
PS	$P_s$	EEE	$\epsilon = 1 - \kappa$
CG	$C_g$	ALM	$\ell n M$
CS	$C_s$	AREA	$\frac{\pi}{4} D^2$
DP	$d$	SOG	$W/G$
DIA	$D$	ANAME	물질명

Input data로는 피건조물의 성질(card 2장)과 운전 조건(각 case마다 1장씩)에 관한 2종류로 여타가지의 case의 운전조건의 data card를 피건조물성질의 data card뒤에 첨부함으로써 1회의 running으로 각 case의 운전조건에 대하여 한꺼번에 해석할 수 있게 하였다. input data card의 맨 마지막(end of file card, EOF의 바로앞)에는 blank card 1장을 첨부하여야 한다(stopper 역할을 함). input data의 작성 요령과 reading format은 Table 5.에서 설명하였다.

계산의 결과로는 건조시간(건조관내에서의 체류시간) 진행에 따라 각 시작에서의 열풍온도( $T$ ), 고체온도

Table 5. Input data FORMAT

피건조물의 성질 data

DATA	Card No.	Column No.	FOR MAT	Description
ANAME	1	1~30	A30	물질명
ROUS	1	31~40	F10.0	$\rho_p$ : 밀도(kg/m <sup>3</sup> )
HCRY	1	41~50	F10.0	$\lambda_c$ : 결정열(kcal/kg)
SF	1	51~60	F10.0	$F$ : 형태보정계수(-)
CS1	1	61~70	F10.0	$C_{s1}$ 비열
CS2	1	71~80	F10.0	$C_{s2}$ 식 ⑫의 상수
PK	2	1~8	F8.0	$P_k$
QK	2	9~16	F8.0	$Q_k$ 물질 전달 계수
AK	2	17~24	F8.0	$A_k$ 식 ⑮의 상수
BK	2	25~32	F8.0	$B_k$
AH	2	33~40	F8.0	$A_h$ 열전달 계수
BH	2	41~48	F8.0	$B_h$ 식 ⑮의 상수
AP1	2	49~56	F8.0	$A_{p1}$
AP2	2	57~64	F8.0	$A_{p2}$ 증기압
AP3	2	65~72	F8.0	$A_{p3}$ 식 ⑮의 상수
BP	2	73~80	F8.0	$B_p$

운전조건 data

TG	3 이하	1~8	F8.0	$T$ : 입구풍기온도(°C)
TS	3 "	9~16	F8.0	$T'$ : 입구고체온도(°C)
GAS	3 "	17~24	F8.0	$G$ : 열풍량(kg/sec)
SOLID	3 "	25~32	F8.0	$W$ : 고체량(kg/sec)
HUMO	3 "	33~40	F8.0	$H_1$ : 입구풍기습도(kg/kg)
EMO	3 "	41~48	F8.0	$M_1$ : 입구고체수분함량(%)
DIA	3 "	49~56	F8.0	$D$ : 건조관경(m)
DQ	3 "	57~64	F8.0	$\Delta\theta$ : 수치적분시간간격(sec)
QF	3 "	65~72	F8.0	$\theta_f$ : 계산종료 건조시간(sec)
DP	3 "	73~80	F8.0	$d$ : 입자경(m)

( $T'$ ), 열풍의 습도( $H$ ), 고체의 수분함량( $M$ ), 열풍속도( $V_g$ ), 고체속도( $V_s$ ), 상대속도( $V_r$ ), 통과높이( $L$ ), 공기중의 수증기분압( $P_g$ ), 고체의 수증기 증기압( $P_s$ ), 물질전달계수( $KAu$ )을 print 하도록하여 충분히 검토할 수 있게 하였다. Print 되는 건조시간 간격( $\Delta t$ )은 input data에서  $DQ$  값으로 정한다. 이값이 너무 크면 적분계산이 부정확하여지며 특히 작은 입자경에 대하여는 수치적으로 불안정할 수가 있으므로 적절한 값을 취하여야 한다.

Input data에서의  $QF$ 는 계산종료 건조시간으로 이 시작까지만 적분계산을 수행하라는 시간이므로 건조가 충분히 이루어질 것이라고 추정되는 건조시간으로 정하던 된다.

## 11. 계산 실예

아래와 같은 물리적 성질을 갖는 어떤 무기 결정염을 수분 함량이 0.5%이하가 되게 건조할 수 있는 기류건조기를 설계하려고 한다.

### 1) 물리적 성질

물질명 : some inorganic salt crystal

밀 도 :  $\rho_p = 2670. \text{ kg/m}^3$

결정열 :  $\Delta H_c = 4.0 \text{ kcal/kg}$

결정의용해도 :  $S = 30 \text{ wt}\%$

형태보정계수 :  $F = 0.4$

비 열 :  $C_s = 0.231 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

물질전달계수 :  $KAu$  (Fig. 7 참조)

열전달계수 :  $hAu = 0.461 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

증기압 :  $P_g$  (Fig. 5 참조)

입자경 :  $d = 1\text{mm max.}, 0.5\text{mm avg.}, 0.2\text{mm min.}$

위의 결정열  $\Delta H_c$  값은 염 1kg이 결정화 할 때의 흡열량이다. 용해도가 30 wt. %이므로 1kg의 물이 증발할 때  $\frac{0.3}{0.7}$ kg의 결정이 생성되므로 물 1kg의 증발에 수반되는 결정열  $\lambda_c$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\lambda_c = \Delta H_c \frac{s}{100-s} = 4.0 \times \frac{0.3}{0.7} = 1.7 \text{ kcal/kg of water}$$

### 2) 운전 조건

열풍발생방법 : 증기가열

최고열풍온도 :  $T = 150^\circ\text{C}$

고체공급온도 :  $T' = 40^\circ\text{C}$

건조고체처리용량 :  $W = 755. \text{ Kg/Hr} = 0.215 \text{ kg/sec}$

공급열풍의습도 :  $H_1 = 0.01 \text{ kg water/kg BDA}$

고체의 초기수분함량 :  $M_1 = 5.0 \text{ wt}\%$  (Dry basis)

고체의 최종수분함량 :  $M_2 = 0.5 \text{ wt}\%$  ( " )

### 3) 열풍량과 건조환경의 가정

열풍공급온도는 높을수록 열효율이 좋으므로  $150^\circ\text{C}$ 로 취하고 출구에서의 열풍과 고체의 온도를 각각  $90^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$ 로 가정하고 열풍량을 식 ②에 의하여 계산하면

$$\begin{aligned} G &= 0.215 \times \frac{(0.231 + 0.05 \times 1)(70 - 40) + (0.05 - 0.2446 + 0.45 \times 0.01) \times 0.005(545.5 + 1.7 + 0.45)(90 - 70)}{(150 - 90)} \\ &= 0.478 \text{ kg/sec} \end{aligned}$$

단  $\lambda_{t2} = 595 - 0.55 \times 90 = 545.5 \text{ kcal/kg}$

$$\begin{aligned} C_g &= 0.241 + 0.00003 \times \left( \frac{150 + 90}{2} \right) \\ &= 0.2446 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

출구에서의 열풍의 습도와 함습비열은 식 ⑫과 Table 3에서

$$\begin{aligned} H_2 &= H_1 + (M_1 - M_2) \times \frac{W}{G} = 0.01 + (0.05 - 0.005) \times \frac{0.215}{0.478} = 0.03 \text{ kg/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{H2} &= (0.773 + 1.244 \times 0.03) \times \left( \frac{273 + 90}{273} \right) \\ &= 1.08 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\rho_g = \frac{1 + H}{v_{H2}} = 0.954 \text{ kg/m}^3$$

최대입자의 종말속도  $V_t$ 는 Table 2에서 약  $7 \text{ m/sec}$  정도로 추정되므로 출구에서의 열풍속도는  $10 \text{ m/sec}$ 로 택한다. 그러면 건조환경은 식 ②에 따라

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times \frac{0.478 \times 1.08}{10}} = 0.2564 \text{ m}$$

호경 10.inch의 SGP의 내경이 0.2542 m이므로 이것을 사용하기로 한다.

### 4) input data의 정리

피건조물의 초기수분함량과 입자경의 영향을 함께 알기 위하여 아래와 같은 다섯가지 case에 대하여 한꺼번에 계산하도록 하자.

case 1 : 초기 수분함량 5 %, 입자경 0.5mm(평균)  
case 2 : " 4 %, "  
case 3 : " 3 %, "





**HWAKHAK KONGHAK Vol. 13, No. 1, February 1975**

Table 7 Computer output for Case-6(Cooler)

[illegible]

다. 만일 15m의 건조관도 설치하기 곤란하면 열효율을 희생하더라도 열풍공급온도를 더 높이거나 열풍량을 증가시키므로써 건조관 높이를 어느정도 줄일 수 있을 것이다.

## 12. 기류냉각기

일반적으로 제품을 건조하던 저장 혹은 포장하기에 부적당할 정도로 온도가 상승하므로 건조과정 후에는 냉각과정이 따른다. 제품이 분립체인 경우는 기류 건조기에서와 마찬가지로 물체를 관속을 흐르는 찬공기의 기류속으로 분산시켜 냉각시키면서 동시에 저장실 또는 포장실로 운반하는 경우가 많다. 이렇게 냉각하는 장치를 기류냉각기라고 한다. 기류냉각기내에서 일어나는 모든 현상은 기상과 고상사이의 열의 흐르는 방향 반대인것 이외에는 기류 건조기와 완전히 같으

로 모든 원리와 계산방법도 기류건조기와 동일하다. 따라서 앞의 기류건조기에 관한 모든 방법 및 수식뿐만 아니라 Fig. 9의 program도 그대로 사용할 수 있다.

앞의 계산에의 건조기에서 나오는 80°C의 제품을 40°C까지 냉각시키는 냉각기의 설계에 대한 예를 들면 다음과 같다. 공급공기의 온도를 20°C, 건조제품의 수분함량을 0.5%라고 하자. 우선 공기량을 정하기 위하여 출구공기의 온도를 35°C로 가정하고 냉각기내에서 건조가 계속되어 출구에서의 제품의 수분함량이 0.2%로 된다고 가정하여 식(9)에 의하여 공기량을 계산하면

$$G = 0.215 \times \frac{(0.231 + 0.005 \times 1) \times (40 - 80) + (0.005 - 0.002)(573 - 1.7 + 0.45)(35 - 40)}{0.241 \times (20 - 35)}$$

$$= 0.46 \text{ kg/sec}$$

이 값은 건조기에서의 공기량과 비슷하므로 건조기  
에서와 같은 크기의 Cyclone 과 Blower 를 사용하도록  
하기 위하여 공기량을 건조기에서와 같이  $G=0.478\text{kg}$   
/sec 로 택하기로 한다.

기류냉각기는 보통 공기 수송을 겸하기 때문에 관의  
수평부분이 많아서 수평관내에서 제품이 침적할 염려  
가 있으므로 풍속이 13m/sec 정도 되게 냉각관을  
8 inches 관(내경 0.2047m)으로 택한다.

이상의 기류냉각기를 해석하기 위한 피냉각물의 물  
성치에 대한 Input data 는 건조기의 것 (Fig. 10의 첫  
째 및 둘째 card)과 같고 위의 운전조건을 정리한  
Input data 는 Fig. 10의 8번째 card 이다. 즉 건조기  
와 냉각기는 운전조건 data 만 달리하므로써 동일한  
program 으로 한번에 running 할 수 있다. Table 6  
은 냉각기 해석결과이다. 제품을 40°C 까지 냉각하기  
위하여는 0.7초 이상 체류하도록 냉각관을 설치하여야  
하며 출구에서의 공기온도는 33.6°C 이고 제품은 수분  
함량이 0.5%에서 0.154%까지 더 건조됨을 알 수 있  
다.

### 13. 끝맺는 말

본문은 기류건조기에 관한 기본원리와 그의 특성을  
간단히 설명하고 열 및 물질전달계수와 증기압을 측정  
하는 실험방법과 이 결과를 이용하여 전자계산기로 신  
속하고 정확하게 설계하는 방법과 그 program 을 제공  
하여 실제의 설계에 도움이 되도록 한 것이다. 특히  
fortran program 에 관하여 약간의 지식만 있으면 누구  
나 사용할 수 있도록 하였다.

기류건조기의 설계는 반응기의 설계와 같이 computer  
가 화학공학자에게 혜택을 준 대표적 설계중의 하나로  
이를 computer 없이 해결한다면 그 결과도 부정확할  
뿐 아니라 상당한 시간과 노력이 소요될 것이다. KIST  
CDC CYBER 계산기로 Fig. 10의 DATA 의 여섯  
case 를 처리하는데 약 11sec 의 계산시간이 소요되었  
으므로 한 case 당 150원 정도의 경비로 신속하고 정  
확하게 문제를 해결할 수 있다. 끝으로 이같이 이 방  
면에 관심이 있는 화공설계가와 현장 기술자에게 도움  
이 되기를 바란다.

### Nomenclature

$A_h$	Constant in Eq. 26
$A_k$	Constant in Eq. 25
$A_{p1}, A_{p2}, A_{p3}$	Constants in Eq. 24

$A_p(M)$	Some function of Moisture content
$A_u$	Surface area per unit mass of solid, $\text{m}^2/\text{kg}$
$a_u$	Surface area of one particle, $\text{m}^2$
$B_h$	Constant in Eq. 26
$B_k$	Constant in Eq. 25
$B_p$	Constant in Eq. 24
$C_D$	Drag coefficient
$C_{DS}$	Drag coefficient for single particle
$C_g$	Specific heat of drying gas in dry state, $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_s$	Specific heat of dry solid, $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_{s1}, C_{s2}$	Constants in Eq. 27
$C_v$	Specific heat of water vapor, $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$C_w$	Specific heat of liquid water, $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$
$D$	Inside diameter of drying tube, m
$d$	Diameter of a spherical particle, m
$G$	Drying gas mass flow, $\text{kg}/\text{sec}$ .
$g$	Acceleration due to gravity ( $=9.8$ ), $\text{m}/\text{sec}^2$ .
$H$	Absolute humidity, mass water/dry air, $\text{kg}/\text{kg}$
$h$	Heat transfer coefficient, $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$
$K$	Mass transfer coefficient, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{mmHg}$
$m$	Mass of one particle, kg
$M$	Moisture content, mass water/dry solid, $\text{kg}/\text{kg}$
$M_m$	Moisture content, mean, $\text{kg}/\text{kg}$
$P_g$	Pastial pressure of water vapor in drying gas, mmHg
$P_T$	Total pressure of system, mmHg
$P^*$	Vapor pressure of moisture solid, mmHg
$\Delta P_{im}$	Log mean particle pressure driving force, mmHg
$P_k$	Constant in Eq. 25
$Q$	Total heat transfered per kg dry solid, $\text{kcal}/\text{kg}$ .
$Q_C$	Heat of crystallization of new solid formed pr kg of dry solid, $\text{kcal}/\text{kg}$
$Q_g$	Sensibe heat gained by wet solid per unit mass dry solid, $\text{kcal}/\text{kg}$
$Q_k$	Constant in Eq. 25
$Q_\lambda$	Heat to evaporate water per unit mass of dry solid, $\text{kcal}/\text{kg}$
$R$	Ideal gas constant, $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}$
$Re$	Particle Reynolds number
$s$	Solubility, wt%
$S$	Solubility, $\text{kg}/\text{m}^3$

$T$	Temperature of drying gas, °C
$T'$	Temperature of solid, °C
$T^*$	Temperature of system, °K
$\Delta T_{lm}$	Log mean temperature difference, °C
$V_g$	Velocity of drying gas, m/sec
$V_s$	Velocity of particle, m/sec
$V_t$	Terminal velocity of particle, m/sec
$v_H$	Humid volume, m <sup>3</sup> /kg of BDA
$W$	Weight of dry solid to dryer per unit time, kg/sec
$\epsilon$	Voidage in transporting line
$\theta$	Residence time in drying tube, sec
$\Delta\theta$	Drying time increment for numerical integration, sec.
$\theta_f$	Final limit of drying time, sec.
$\theta_h$	Drying time derived from heat transfer, sec
$\theta_m$	Drying time derived from mass transfer, sec
$\lambda_v$	Latent heat of evaporation at stated temperature, kcal/kg

$\lambda_c$	Heat of crystallization, kcal/kg
$\rho_g$	Density of gas, kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	Density of solid, kg/m <sup>3</sup>

### Subscripts

- 1 Inlet condition
- 2 Outlet condition

### References

- 참고문헌을 제 I 보에 이어서 일련번호로 표시하였음.
10. 朴 明治, 權 英秀, 화학공학, 12(1974), 353(제 1 보)
  11. W.C. Yang, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 12 (1973), 349.
  12. L. Lapidus, "Digital Computation for Chemical Engineers," McGraw-Hill, N. Y., 1962.
  13. S. S. Kuo, "Numerical Methods and Computers," Addison-Wesley, 1965