

3단 회전식 건조성형장치 설계 프로그램 개발 A Development of Design System Program for the 3-pass rotary dryer

김태식 · 최윤환 · 이연원 · 도덕희

T. S. Kim, Y. H. Choi, Y. W. Lee and D. H. Doh

Key Words : 3 pass rotary dryer(3단 회전식 건조기), Design system(설계프로그램), Heat & mass balance(열, 물질평형)

Abstract : In order to prevent the environmental pollution, the dryers are commonly used to treat sludge that one of sewages is polluting the quality of water. Generally, the drying method is various as to the property of material and use. Rotary dryer is a good apparatus to treat them. It is the way that is to make substance transmission and heat using hot air between sludge particle and heated gas. In this paper, we developed a 3-pass rotary dryer for a design program for the 3-pass rotary dryer with various conditions. The working conditions of dryer are a raw sludge feed rate, input & output water content and operation time etc.

기호설명

- A : 건조기 단면적 [m^2]
- C_{Z1}, C_{Z2} : 건가스 입구, 출구에서의 비열 [$kcal/kg^{\circ}C$]
- C_{ww1}, C_{ww2} : 400, 100 $^{\circ}C$ 수증기비열 [$kcal/kg^{\circ}C$]
- c, c_w : 무수재료, 물의 비열 [$kcal/kg^{\circ}C$]
- D : 건조기 직경 [m]
- G_o : 열풍 공급량 [kg/hr]
- G : 열풍 질량속도 [$kg/hr m^2$]
- H_1, H_2 : 초기, 최종열풍의 습도 [kg/kg]
- h_o : 열용량계수 [$kcal/hr m^3^{\circ}C$]
- i_1, i_2 : 입, 출구에서의 가스 엔탈피 [$kcal/kg$]
- q_1, q_2 : 예열기간, 표면증발기간에서의 소요열량 [$kcal/hr$]
- r_o, r_w : 증발 잠열, t_w 에서의 증발 잠열 [$kcal/kg$]
- t_1, t_2, t'_1, t_c : 초기, 최종, 예열기간 열풍 온도, 한계 함수율 온도 [$^{\circ}C$]
- $t_{m1}, t_{m2}, t_{mc}, t_w$: 재료 입구, 출구 온도, 표면증발기간 재료 온도, 열풍 습구온도 [$^{\circ}C$]

- U_a : 체적 열전달 계수
- V_1, V_2 : 예열기간, 표면증발기간에서의 소요용적 [m^3]
- V_{total} : 전체건조기 용적 [m^3]
- W_o : 무수재료중량 [kg/hr]
- w_1, w_2, w_c : 초기, 최종, 한계함수율 [kg/kg]
- ρ_g : 배출 공기 밀도

1. 서 론

건조성형장치는 수분을 포함하고 있는 하수슬러지에 제철부산물이나 유기성 슬러지를 첨가하고 열풍을 가하여 슬러지 내부에 포함된 수분을 일정량 제거하여 퇴비나 시멘트 원료로 사용할 수 있는 물질로 처리하는 장치이다(Fig. 1).⁴⁾

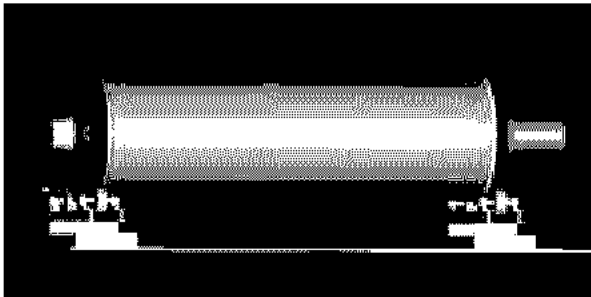
건조성형기 설계 및 제작시 요구되는 계산은 크게 수분증발량, 열풍공급량, 습량기준 수분량 및 구동장치 선정, 건조기 용량 결정 등이다. 계산에 필요한 많은 식을 수계산으로 수행함에 있어서 많은 시간과 노력이 소모된다. 따라서 시간 절약과 용이한 설계를 위하여 기본 데이터만으로 설계가 가능한 설계 프로그램 개발이 필요하다.

P건설이 개발한 "슬러지 건조, 고형화 기술"을 실현한 건조성형장치는 현재 3톤/일 규모로 K제철에서 발생하는 슬러지에 대하여 적용, 가동중이다. 그러나

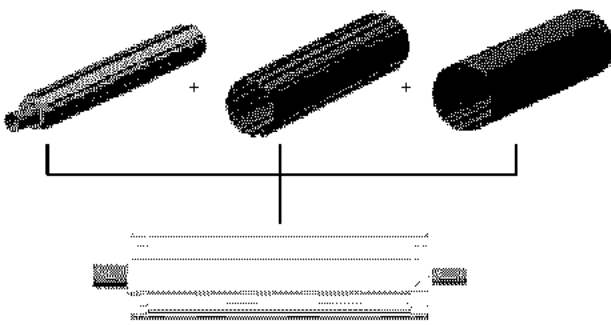
접수일 : 2005년 12월 15일
 이연원(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
 E-mail : ywlee@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1417
 김태식 : 부경대학교 대학원 기계공학부
 최윤환 : 부경대학교 기계공학부
 도덕희 : 한국해양대학교 기계·정보공학부

현재의 처리 규모로는 하루에 발생되는 제철부산물이나 유기성 슬러지에 대한 처리가 매우 부족한 실정이며, 현재 설비의 대형화를 위해서는 규모가 커지는 것에 따른 건조기 내부 용적을 새롭게 결정해야 한다. 그리고 내부용적 계산시 요구되는 많은 양의 계산식들은 현재 수계산을 통하여 결과가 구해지는 실정이다.

이러한 설계과정은 약간의 설계 변경시에도 동일한 계산을 반복적으로 수행하기 때문에 비능률적이며, 단순계산에 숙련된 엔지니어의 시간과 노력이 소비된다. 또한 건조성형기가 사용되는 환경은 일반적으로 조급식 다르기 때문에 건조기의 처리용적이 다양하게 요구되는 실정이다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 A type의 3단 회전식 건조성형장치(Fig. 1 (b)) 설계시 필요한 용적계산과 재료의 조건 그리고 하중조건을 계산하기 위하여 기본데이터(건조물 용량, 온도, 요구함수율 등)의 입력만으로 필요한 데이터를 얻을 수 있는 프로그램을 개발하고자 한다.



(a) 3-pass rotary dryer



(b) Component of A-type rotary dryer

Fig. 1 Schematic diagram of 3-pass rotary dryer

2. 건조 성형장치의 설계 이론

2.1 설계조건

건조기 내부에 투입되는 초기의 슬러지량과 함수율을 계산하고 첨가되는 고화재의 투입량을 계산한

다. 건조용량이 결정되면, 건조에 필요한 열풍량을 계산하고, 계산된 열풍량을 사용하여 건조기의 용적이 산정된다. 아래의 계산조건은 76톤/일 규모의 건조성형장치의 설계조건에 예이다.

1) 1일 슬러지(sludge) 처리량

$$W = 76,000 \text{ kg}/24 \text{ hr} = 3,125 \text{ kg/hr} \quad (1)$$

2) 단위 시간당 고화재 투입량

$$3,125 \text{ kg/hr} \times 15\% = 469 \text{ kg/hr} \quad (2)$$

3) 단위 시간당 건조기 내 슬러지 투입량

$$3,125 + 469 = 3,594 \text{ kg/hr} \quad (3)$$

4) 소화슬러지 내 수분 함량

$$3,125 \times 0.8 = 2,500 \text{ kg/hr} \quad (4)$$

5) 소화슬러지 내 무수(無水)슬러지 함량

$$3,125 \times 0.2 = 625 \text{ kg/hr} \quad (5)$$

6) 단위시간당 처리해야 할 총 무수재료

$$469 + 625 = 1,094 \text{ kg/hr} \quad (6)$$

7) 건조기로 투입하는 총 슬러지량에 대하여 초기 함수율 47.3% (습량 기준) 계산

2.2 열풍량계산

2.1과 같은 설계조건에서 건조에 소요되는 열량과 공급되는 열량의 균형을 이용하여, 공급할 열풍량은 다음과 같은 순서로 계산할 수 있다^{(1),(2),(3)}.

가) 열풍량 계산

1) 재료 예열 기간 소요 열량식에서 예열기간 말단 온도 계산

$$q_1 = G_0 C_{H1} (t_1 - t_1') = W_0 (c + c_w w_1) (t_w - t_{m1}) \quad (7)$$

$$t_1' = (G_0 C_{H1} t_1 - W_0 (c + c_w w_1) (t_w - t_{m1})) / G_0 C_{H1} \quad (8)$$

2) 표면 증발 기간 소요 열량식에서 열풍 공급량 계산

$$q_2 = G_0 C_{H1} (t_1' - t_c) = W_0 (w_1 - w_c) r_w \quad (9)$$

$$G_0 = W_0 (w_1 - w_0) r_w / C_{H1} (t_1' - t_c) \quad (10)$$

식 (7), (8) 그리고 식 (10)을 반복계산하면 예열기간 말단온도 t_1' 와 열풍공급량 G_0 를 구할 수 있으며, 예열기간 말단 온도의 혼합비열 값은 직선보간법을 이

용하여 구한다.

나) 질량 속도, 체적 열전달 계수 U_d 단면적 및 직경 설계

1) 열풍의 질량 속도

$$G = v_1 \times 3600 \times \rho_g = v_1 \times 3600 \times \left(\frac{1}{v_H} + \frac{H_1}{v_H} \right) \quad (11)$$

2) 단면적

$$A = \frac{G_0}{G} \quad (12)$$

3) 드럼 직경

$$D = \sqrt{\frac{A \times 4}{\pi}} \quad (13)$$

4) 체적 열전달 계수

McCormick P.Y.에 의해 제시된 하수 슬러지를 건조시키기 위한 전체 소요열량은 식(14)와 같이 정의된다.¹⁾

$$Q_{total} = q_1 + q_2 = U_a V_{total} (\Delta T) \quad (14)$$

체적 열전달 계수는 식 (15)에 의해 얻어진다.

$$U_a = \frac{KG^n}{D} \quad (15)$$

K = 비례 상수, G = 열풍 질량속도, D = 건조기 직경
 n = 경험 상수, V = 건조기 체적

$$U_a = \frac{0.5 G^{0.67}}{D} \quad (16)$$

다) 재료 예열기간에서의 소요용적 $V_1(m^3)$ 계산

재료 예열 기간에서의 열량은 식 (7)로부터 얻을 수 있다.

$$q_1 = G_0 C_{H1} (t_1 - t'_1) = W_0 (c + c_w w_1) (t_w - t_{m1}) \quad (17)$$

식 (7), (9) 그리고 식 (11)을 식 (14)에 대입하면 예열에 필요한 건조기의 용량을 구할 수 있다.

$$V_1 = q_1 \frac{\ln \left(\frac{t_1 - t_{m1}}{t_1 - t_w} \right)}{U_a ((t_1 - t_{m1}) - (t'_1 - t_w))} \quad (18)$$

라) 표면 증발기간에서의 소요용적 $V_2(m^3)$ 및 건조기 길이 설계

1) 소요 열량 계산

이 기간에서의 재료온도는 $t_{mc} = t_w$ 로 일정한 그대로이고, 유입 열량은 모두 증발에 소비되므로 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_2 = G_0 C_{H1} (t'_1 - t_c) = W_0 (w_1 - w_c) \quad (19)$$

2) 열풍의 예열기간 말단 온도 계산

위 식 (19)에서 t_c (한계 함수율일 때의 온도)를 구할 수 있다.

$$q_2 = G_0 C_{H1} (t'_1 - t_c) = W_0 (w_1 - w_c) r_w \quad (20)$$

3) 한계 지점(=배출 습도)에서의 습도 계산

또한, 한계 함수율에서의 한계 습도 H_c 는 식 (21)에 의해 얻어질 수 있다.

$$H_c = W_0 (w_1 - w_c) / G_0 + H_1 \quad (21)$$

4) 표면 증발기간 소요용적

결국 표면증발기간에서의 소요용적은 식(22)에 의해 얻을 수 있다.

$$V_2 = q_2 \frac{\ln \left(\frac{t_1 - t_{m1}}{t_c - t_w} \right)}{U_a (t'_1 - t_c)} \quad (22)$$

5) 건조 구간 내에서의 총 용적

$$V_{total} = V_1 + V_2 \quad (23)$$

6) 소요길이 L

$$L = V_{total} / A \quad (24)$$

7) 3단 건조기 단면적 비는 일반적으로 1단, 2단, 3단을 각각 1 : 1.5 : 3.75 비율로 적용한다. 단면적 비를 이용하여 각 드럼의 직경을 구할 수 있다.

3. 건조성형기 설계 프로그램

3.1 건조성형기 용적설계

Fig. 2는 건조 성형 장치 설계 프로그램의 입력 화면을 나타내며, 하루 처리량, 함수율 등을 입력할 수 있다. 또한, 화면 우측에 필요한 데이터를 얻기 위한 프로그램들을 선택 할 수 있다. 본 프로그램은 주 입력창에 입력하는 변수들을 변화시켰을 때 간편하게 변화된 결과들을 확인할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Fig. 2에서 변수값을 입력하고 입력창 우측의 도구 막대를 선택하면, 해당 계산과정을 거쳐서 결과 값을 출력한다.

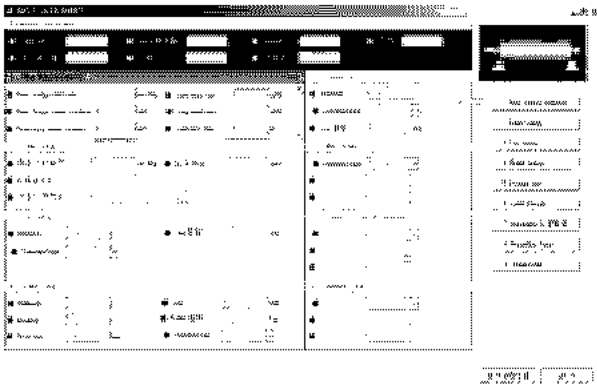


Fig. 2 Main input box

먼저 건조 성형 장치 용적을 계산하기 위해 주 입력창의 열 물질 평형(Heat & Mass balance)창에 변수들을 입력하고, 오른쪽 첫 번째 도구막대를 선택하면 혼합가스비열, 말단온도 및 열풍량 계산을 반복 수행하여 수립된 결과를 Fig. 3에서 보여 준다. 건조 성형 설비 Sizing 패드에서 입구속도, 입구 밀도, 비례상수 값을 입력 후 계산 버튼을 클릭 함으로써 우측에 생성된 도면에 치수가 나타난다(Fig. 4).

번호	입구온도	입구풍량	온도비율
1	391.34183	3697.59339	0.36792
2	163.76916	18312.47809	0.34789
3	372.73903	4751.77752	0.37441
4	196.76106	11401.16227	0.36661
5	374.17407	4210.10347	0.37183
6	213.09332	9104.10367	0.37090
7	364.86725	7221.11784	0.36219
8	204.16608	16227.71433	0.36584
9	380.16927	5662.10201	0.37986
10	214.46709	7436.30048	0.35406
11	201.47611	1020.62729	0.36006
12	291.45436	7079.41542	0.36247
13	277.69841	6111.92730	0.36729

Fig. 3 Composite specific heat and mass flow computation dialog box

Fig. 4에서는 처리하고자 하는 슬러지의 투입량과 건조성형기 입구로 유입되는 열풍량 그리고 증발되는 양을 통하여 최종적으로 처리되는 고형물의 양을 계산하여 화면상으로 보여준다. Fig. 4의 결과를 토대로 설계자는 송풍기 및 히터의 용량을 결정할 수 있다. 또한 이 결과는 건조성형기의 전체적인 크기를 나타내고 건조기를 지지하는 톨러와 건조기를 회전

시키는 회전 모터등을 결정하는 모태가 된다.

Fig. 4의 결과를 적용하여 3단 건조성형기의 각 단의 직경과 길이를 구하면 Fig. 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5에서는 건조성형기의 각단에 대한 직경과 길이를 한 화면상에서 모두 확인할 수 있으며, 주된 치수는 건조기의 직경과 길이이며, 부가적으로 건조기 입구로 유입되는 경사진 관에 대한 정보와 출구관의 길이도 확인할 수 있다.

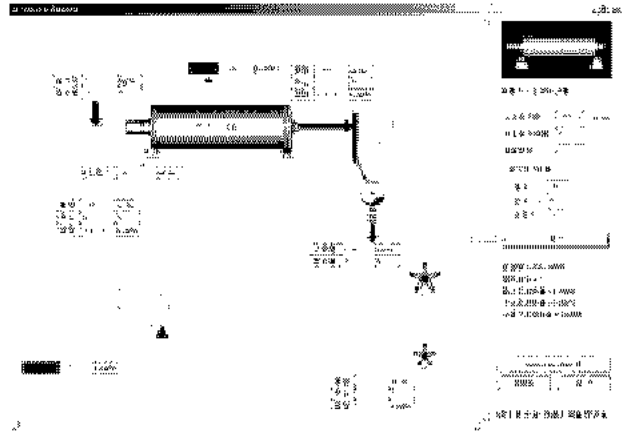


Fig. 4 Heat & mass balance program

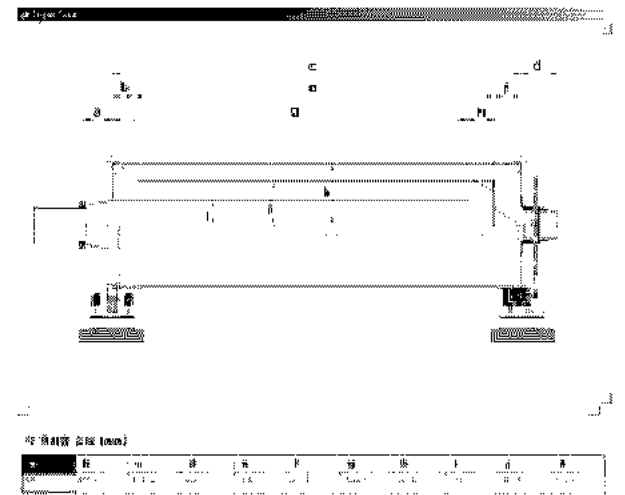


Fig. 5 Dryer sizing program

4. 결 론

본 연구에서는 현재 하수슬러지 처리 및 활용에 대한 하나의 대안으로 대두되는 건조성형기술을 활용하기 위한 장치중 하나인 A-type 3단 회전식 건조성형 장치의 설계를 용이하게 하는 프로그램 개발을 수행하였다.

프로그램의 개발은 건조성형장치 설계 이론을 기반으로 내부 알고리즘을 작성하였고, 엔지니어가 간

편하게 설계도면을 완성할 수 있도록 설계자의 입장에서 작성되었다. 본 설계프로그램을 활용하면 설계자가 기본변수인 일일처리량, 입·출구 함수율 등에 대한 지식만 갖추면 되므로 간단한 변수입력만으로 단기간에 건조성형 장치에 대한 설계가 가능해진다.

하수처리장마다 하루에 처리되는 하수량이 각각 다르고 배출되는 슬러지의 양도 각각 다른 경우가 일반적이다. 따라서, 본 프로그램을 활용하면 다양한 용량을 가지는 건조성형장치의 설계가 가능해지고 실제로 본 프로그램을 활용하여 건조성형장치의 설계를 P사에서 수행중이다.

추후에는 A-type형 외의 다른 방식의 건조성형기에 대한 설계프로그램 개발을 수행할 것을 계획하고 있다.

후 기

본 연구는 부경대학교 2006년도 누리사업 및 “건조성형장치 기본설계과정 전산화” POSCO E&C 지원 과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

1. 桐榮, 良三 編, 1967, “乾燥 裝置”, 日刊工業新聞社, pp.139~141.
2. B. Mohammadi, O.Pironneau, 1994, “Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model” pp.89~90
3. 岡崎守男, 鈴木 睦, “化學 工學 便覽”
4. 황진우, 배재근, 고희백, 고병산, 2002, “폐하수슬러지 건조-소각연계처리시스템의 성능검토”, Vol. 24, No. 6, pp. 1051~1059