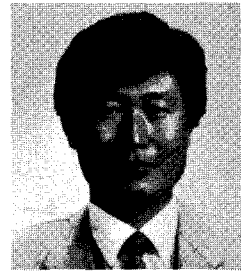


# 계분건조기의 설계를 위한 계분의 건조이론



장 동 일  
충남대학교 농과대학  
농업기계학과 부교수,  
공학박사

## 1. 계분건조의 필요성

계분처리 는 양계산업의 대형화, 환경공해 문제에 따른 법적규제, 환경위생에 대한 인식고조 등으로 생산농가 뿐만 아니라 관계기관에도 부담이 되는 문제로 대두되고 있다. 이러한 상황에서 여름철은 특히 농가에게 힘든 계절이 된다. 여름은 계분의 비수요기인데다 고온다습한 기후조건과 장마 등의 원인으로 자칫하면 관리소홀로 주민들로부터 민원의 대상이 되기 때문이다.

이 때문에 농장에서는 온갖 지혜를 동원해서 효율적인 처리방법을 강구하고 있다. 그러나 때로는 입지조건이나 경제적인 이유로, 또한 법적인 제한으로 이렇다할 방법을 찾지 못한 농장들도 많은 것이 사실이며, 요즘은 강화된 환경공해 단속에 적발되어 벌금을 납부하는 사례도 증가하고 있는 실정이다.

계분의 효율적인 처리방안은 계분이 지닌 자연력을 조금만 도와주어 계분이 비교로서 가치를 획득하여 자연으로 환원되게 하는 것이다. 계분이 비료로서 가치를 얻게 되려면 “건조→발효과정→상품유통화” 과정을 거쳐야 하는데, 적정건조기술이 개발되지 않은 현재에는 노천에서 자연건조를 시키는 방법이 대부분 이용되거나, 또는 극히 일부에서 일본 등 외국에서 사용중인 선드라이어 방법이 사용되고 있다.

그러나, 노천의 자연건조방법은 생계분이 농경지로 유입되어 농경지에 피해를 주거나, 계분적재로 파리발생 및 악취발생 등의 민원유발 문제를 갖고 있으며, 선드라이어 방법은 과다한 시설투자비 및 넓은 유희공간을 필요로 하는 문제점을 갖고 있다.

그러므로, 현 단계에서 우리의 양계농은 효율적인 계분건조기의 개발을 절실히 필요로 하는데, 이

를 위한 설계 및 개발에 필요한 계분의 물성 및 건조특성의 구명이 시급한 선결과제로 대두되고 있다.

그런데 이와같은 계분의 물성 및 건조특성에 대한 기초적이고 이론적인 정보의 축적이 없이 계분 건조기를 개발한다면 중대한 오류를 범하기 쉬울 뿐만 아니라, 현재 화력계분건조기를 개발했다는 어떤 제작회사와 같이 터무니 없이 과장된 건조기의 성능을 발표함으로써 양계농가를 미혹시켜 결과적으로 많은 양계농가에 피해와 분쟁이 발생할 우려가 있게 된다.

따라서, 계분건조기를 개발하고자 하는 업체나 구입하고자 하는 양계농가는 다음과 같은 내용의 분의 건조이론을 바탕으로 계분건조기를 개발 또는 적정선택 구입하여 앞으로 계분건조에 따른 문제를 현명하게 해결할 수 있기를 바란다.

## 2. 계분의 물성 및 건조특성

계분의 물성이나 건조특성에 대해서는 외국의 경우 일본이나 미국 등에서 이미 많은 연구가 있었으며, 국내에서는 충남대학교 농업기계공학과에서 연구된 바가 있으며, 현재도 화력계분건조기의 연구개발이 계속되고 있다.

산란계의 계분배설량은 계분의 함수율에 따라 다르지만, 함수율 80%(w. b.) 기준으로 1일 126g 정도가 된다고 알려지고 있으며, 계분의 함수율과 생계분의 중량관계는 표1과 같다.

표1. 생계분의 함수율과 중량의 관계

함수율(w. b.)	계분량(g/수·일)
85%	168 g
80%	126 g
75%	101 g
70%	84 g
65%	72 g

그리고 미국농공학회의 설계기준 자료에 의하면 계분의 밀도는 1.05 g/cm<sup>3</sup>이다. 그리하여 산란계 10,000수가 하루 배설하는 생계분량을 계산하면 함수율 80%의 경우에, 총 중량이 약 1.3톤 또는 부피가 1.14m<sup>3</sup>이 된다.

1일 총 계분배설량

$$=0.126\text{kg/수} \cdot \text{일} \times 10,000\text{수} \times 1\text{일}$$

$$=1,260\text{kg}=1.3\text{톤}$$

$$=1,142,857\text{cm}^3=1.14\text{m}^3$$

또한 계분은 다음과 같은 내용의 비료로서의 가치와 영양적 가치를 가지고 있다.

표2. 케이지 산란계분의 톤당의 비료로서의 가치

계분의 상태	수분(w. b.)	질소(N)	인산(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	칼리(K <sub>2</sub> O)
젖은상태	75%	11.3kg	10.4kg	5.4kg
축축한 상태	50%	18.1kg	20.8kg	10.4kg
약간마른상태	25%	27.2kg	29.9kg	16.3kg
마른상태	15%	31.7kg	31.7kg	20.8kg
완전건조상태	0%	36.2kg	40.8kg	25.4kg

표3. 건조계분의 영양적 가치

구 분	성분함량
회분	26%
조섬유	10%
조단백	33.5%
가용성질소성분	22.5%

이와같은 비료로서의 가치 및 영양적 가치를 지닌 계분은 그림 1과 같은 건조특성을 보인다. 함수율 70%에서 40%까지는 1단계 항률건조를 하며, 그 후 40%에서 25%까지는 1단계 감률건조를 한다. 다시 25%에서 15%까지 2단계 항률건조가 있고, 그

뒤에 2단계 감률건조가 있다. 그러므로 계분의 최종함수율을 얼마를 목표로 하여 건조하느냐에 따라 계분건조기의 시간당 성능과 소요에너지가 크게 좌우된다. 만약 계분을 화력건조한다면 40%까지 건조함이 매우 유리하며 25% 이하까지 건조한다면 소요에너지 비용이 급격히 증가하여 비경제적인 건조가 된다.

또한 계분속에는 표 2, 3과 같은 성분들이 포함되어 있어 건조중에 계분덩어리의 표면이 건조되면서 굳어져 덩이의 내부에 함유된 수분이 증발되기 어려운 상태가 된다. 그러므로 계분건조장치는 이와같은 표면경화를 방지하여 계분덩어리의 내부의 수분이 표면까지 이동하여 증발하기가 용이하도록 계속적으로 계분덩이를 분쇄하여 표면경화를 방지하여야 건조효율을 향상시킬 수 있다.

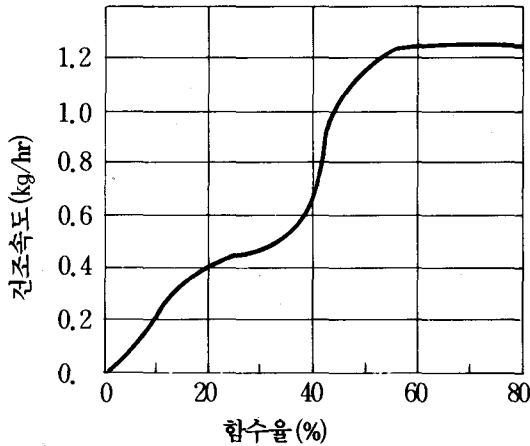


그림 1. 계분의 건조특성곡선

### 3. 건조를 위한 소요열량

계분의 건조란 계분속에 포함된 수분을 기체의 상태로 증발, 분리시키는 작업을 뜻하며, 수분을 액체의 상태로 빼내는 작업은 탁수작업이라고 정의한다. 수분이 기체상태로 변화되기 위해서는 기화열이 필요하며, 계분내부에 있는 수분까지 열이

전달되어 이 수분을 이동시키거나 기화시키는 데에는 열의 전도에 에너지가 필요하게 된다. 그러므로 생계분 1kg을 건조시키는데 필요한 열량을 계산하기 위해서는 다음과 같은 수식을 사용하여 계산하면 된다.

$$\begin{aligned} & \text{총 소요량} \\ & = \text{건조과정중에 계분을 목표온도까지 상승시키는 데 소요되는 에너지} + \text{수분을 기화시키기 위한 잠열} \\ & = C_m \cdot (T_2 - T_1) + M_w \cdot H_{fg} \end{aligned}$$

여기서,

$C_m$  = 계분의 비열,  $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$T_1$  = 계분의 초기온도,  $^\circ\text{C}$

$T_2$  = 계분의 최종온도,  $^\circ\text{C}$

$M_w$  = 계분의 총 수분제거량,  $\text{kg}$

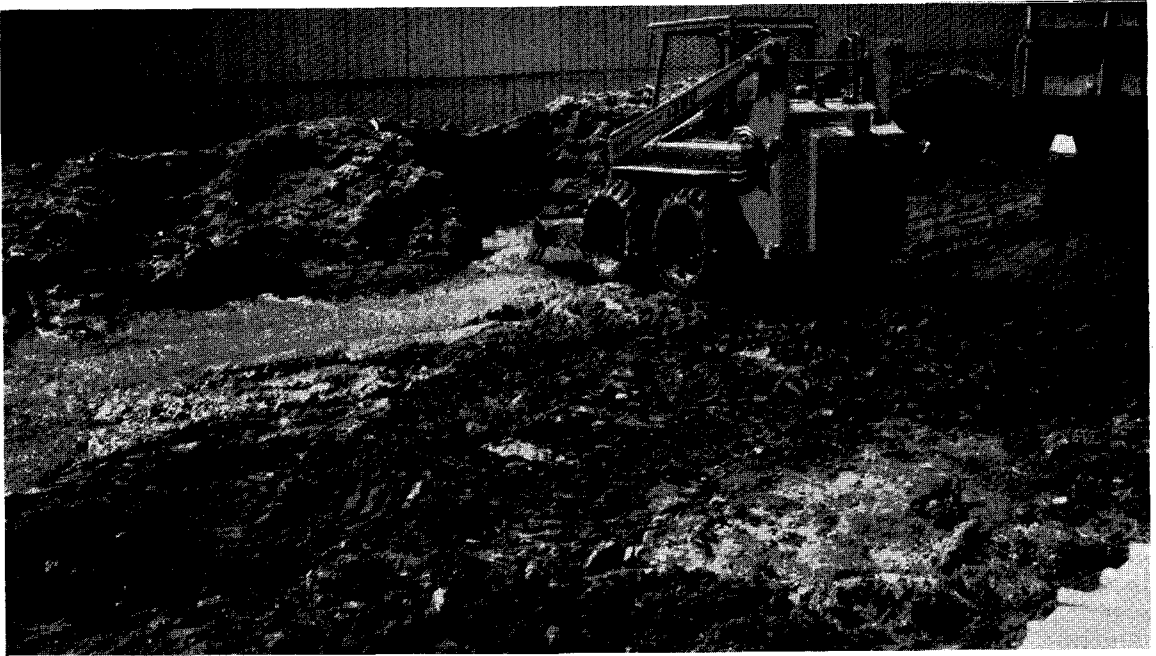
$H_{fg}$  = 계분에서의 수분의 기화열,  $\text{kJ/kg}$

문헌에 의하면, 1 기압에서의 수분의 기화열은  $2,257\text{kJ/kg}$ , 계분의 비열은  $3.6\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다. 이 값을 가지고, 계분의 초기온도가  $10^\circ\text{C}$ 이고, 최종온도가  $100^\circ\text{C}$ 라면, 이때 수분 1kg을 계분에서 제거하는데 소요되는 열량을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \text{소요열량} & = 3.4 \times (100 - 10) + 2,257 = 2,563\text{kJ/kg} \\ & = 612.3\text{kcal/kg} \end{aligned}$$

그런데, 계분의 초기조건과 최종조건이 건조의 필요상황과 주변조건에 따라 달라지기 때문에, 일반적으로 물 1kg을 제거하는데 필요한 소요열량을  $600\text{kcal/kg}$ 로 계산하여 건조기를 설계하면 적정설계를 할 수 있겠다.

### 4. 소요열량 계산의 실례



독자들의 이해를 돕기 위해 소요열량 계산의 실례를 다음의 2경우를 이용하여 설명하고자 한다.

1) 월간양계 1991년 5월호 130~131 페이지에 실려있는 화력계분건조기의 성능을 보면, 생계분을 25~30%로 건조하는데 시간당 22.5리터의 경유를 연소하여 2.5톤의 생분을 건조처리 할 수 있다고 했다. 생계분의 초기함수율이 표시되지 않아서 조금 애매한 성능의 표현이지만, 통상적인 생계분의 함수율인 80%로 가정하여 소요열량을 계산하고 열효율을 분석한다면, 다음과 같다.

건조조건 : 80%(w. b.)→30%(w. b.)

생계분 증량 : 2.5톤/h(2,500kg/h)

계분 1kg을 상기 조건대로 건조한다면, 714.3g의 수분을 제거하여야 한다. 전체 생계분에 대하여 계산한다면 ;

$$\begin{aligned} \text{총 수분제거량} &= 714.3(\text{g/kg}) \times 2,500\text{kg}/1,000 \\ &= 1,785.8\text{kg} \end{aligned}$$

=1.8톤

$$\text{소요열량} = 1,785.8(\text{kg}) \times 600\text{kcal/kg} = 1,071,480\text{kcal}$$

여기서, 소요경유량을 계산해보면 다음과 같다. No. 2 경유의 발열량을 기계공학 핸드백에서 찾아보면, 9,389kcal/리터이다. 그러므로,

$$\text{소요경유량} = 1,071,480/9,389 = 114.1\text{리터}$$

이 경우의 화력건조기의 열효율을 계산하면 ;

열효율

$$= \text{소요열량} / \text{투입열량} \times 100$$

$$\begin{aligned} &= 1,071,480\text{kcal} / (22.5\text{리터} \times 9,389\text{kcal/리터}) \times 100 \\ &= 507.2\% \end{aligned}$$

현재 일본에서 개발되어 시판되고 있는 화력계분건조기의 열효율을 9개 제작회사의 14개의 카다로그를 분석한 결과에 의하면, 열효율의 범위는 최저 51%에서 최고 128%까지이다. 건조기의 효율이 100%를 넘는 경우는 극히 드문 경우인데, 이 경우

100%가 넘는 열효율은 폐열회수장치를 설치한 경우이다. 보통 기계공학적 분석에서는 건조기의 열효율 70%를 기준하여 성능을 평가하는데, 이 보다 효율이 높으면 설계가 잘 된 우수한 건조성능으로 평가하며, 이 보다 낮은 경우는 열관리 계통을 개선할 필요가 있다고 평가하게 된다.

그렇다면 상기의 507.2%의 열효율은 명백하게 건조기의 성능을 무리하게 과장표현한 경우라고 분석할 수 있겠다.

2) 월간양계에서 소개한 같은 화력건조기인데, 월간종합축산 1991년 6월호 171 페이지에 성능이 조금 다르게 표현되어 있다. 여기에서 소개한 화력 계분건조기의 건조성능을 보면, 함수율 80%~90%의 성분을 건조기의 8시간 가동으로 약 4톤의 40%~50%의 건조계분을 생산한다고 한다. 이때 소요되는 비용은 경우와 전력비를 합하여 약 45,000원 소요된다고 했다. 이경우의 소요열량을 계산해 보면 다음과 같다.

건조조건 : 80%→40%

건계분증량 : 0.5톤/h(500kg/h)

1kg의 계분을 80%에서 40%로 건조한다면, 666.7g의 수분이 제거되고, 333.3g의 계분이 남게 된다. 그러므로 500kg/h의 건계분을 얻기 위해서는 약 1,000kg의 수분을 제거해야 한다.

$$\begin{aligned} \text{소요열량} &= 1,000\text{kg} \times 600\text{kcal/kg} \\ &= 600,000\text{kcal} \end{aligned}$$

여기서, 소요경유량을 계산해보면 다음과 같다. No. 2 경유의 발열량을 기계공학 핸드북에서 찾아보면, 9,389kcal/리터이다. 그러므로,

$$\text{소요경유량} = 600,000\text{kcal} / 9,389(\text{kcal/리터}) = 63.9\text{리터}$$

전력비용은 연료비용에 비하면 무시할 정도이기 때문에, 소요비용을 모두 경유의 비용으로 가정하여 연료량을 계산하면, 경유 가격이 약 180원/리터이므로,

$$\begin{aligned} \text{소요경유량} &= 45,000\text{원} / 8\text{h} / 180(\text{원/리터}) \\ &= 31.3\text{리터} \end{aligned}$$

이 경우의 화력건조기의 열효율을 계산하면 ;

$$\begin{aligned} \text{열효율} &= \text{소요열량} / \text{투입열량} \times 100 \\ &= 600,000\text{kcal} / (31.3\text{리터} \times 9,389\text{kcal/리터}) \times 100 \\ &= 204.2\% \end{aligned}$$

이 경우에도 명백히 건조기의 성능이 과장표현되었음을 알 수 있으나, 경우 1)의 표현보다는 조금 적게 과장표현되었음을 알 수 있다.

## 5. 맺음말

이 외에도 계분건조기의 설계에 필요한 이론으로 습공기의 성질, 평형함수율, 송풍기의 선택 등 몇가지 주제를 더 다루어야 하나, 이러한 주제는 다음 기회로 미루고자 한다.

상기의 건조이론은 가능하면 이 분야의 비전문가라도 쉽게 이해하여 활용할 수 있도록 표현하기 위해 노력했으므로, 건조기의 구입을 계획하는 양축농가나 그밖의 관련분야 종사자들에게도 좋은 참고가 되기를 바란다. **양기**