

가열수 온도에 의한 저온진공건조 열적 특성에 관한 연구

김 경 근* · 최 순 열**

A Study on the Thermal Characteristics of Low Temperature Vacuum Drying by Hot Water Temperature

K-K Kim · S-Y Choe

Key words : Water content(함수율), Low temperature vacuum drying(저온진공건조), Falling rate(감율건조), Constant rate(항율건조)

Abstract

The aim of this paper is to develop the low temperature vacuum dryer, with low initial investments and operating costs, easy operating method and trouble-free operation

Usually operation is just below atmospheric pressure, as with direct dryers, but some are built for vacuum operation with pressure as low as 50mmHg abs.. This lowers the boiling point to 39° C

The experimental data of quantitative analysis for using practically were obtained by the constant drying rate period and reducing drying rate period according to the temperature of hot water which is the experimental parameters of present experiment

As the results, it took about 20 hours for material to reach about 18% of the final moisture content in order to store products for a long time, from about 450% of the early moisture content at the beginning of drying, and maximum drying rate comes to about 0.30 kg/m²hr at about 350% of the moisture content.

1. 서 론

현재 금세기까지 알려진 물질의 수는 대략 4백만 개가 되며, 그 물질 중에서 6만여 가지의 물질은 인류의 실생활에 이용되어지는데, 사용되기 위해서는 제조, 가공, 공급되는 과정을 거쳐야 하며 그 과

정에서 물질은 대부분 한번 이상 건조라는 과정을 거쳐야 하는 것으로 문헌을 통하여 알 수 있다.⁽¹⁻⁵⁾

건조조작은 열에너지를 가장 많이 사용하는 분체 프로세스로, 건조하는 대상물이 여러 종류가 있으므로 많은 종류의 건조장치가 개발되고 있다. 현재 산업전반에서 널리 행해지고 있는 건조방식은

* 한국해양대학교(원고접수일 : 2000년 12월)

** 군산대학교

대류전열에 의한 열풍건조방식, 전도나 복사전열에 의한 진공건조방식 및 동결진공건조방식, 적외선건조방식이나 마이크로파 건조방식 그리고 진동에너지를 기계적으로 이용하는 초음파건조방식 등이 있다. 적외선건조방식은 열복사에 의해 재료를 가열하고 건조하는 방법으로 두께가 얇은 재료의 건조에 주로 이용되어지며, 열효율은 10~30% 정도로 상당히 낮은 편이다. 초음파건조는 비교적 저온에서 건조하는 이점이 있어 열에 민감한 재료나 의약품 등의 건조에 이용되어지기도 하나, 그 실용화 예는 아직 일부에 지나지 않는다. 열풍건조방식은 열풍과 재료를 직접 접촉시킴으로써 열을 전달하여 수분을 증발시키는 방식으로 열풍과 피건조물과의 온도차 및 습도차가 건조의 추진력이 되므로 열풍의 온도를 되도록 높이고 습도를 낮출수록 건조속도를 증가시킬 수 있다. 열풍건조방식은 다른 건조방식에 비하여 비교적 구조가 간단하고 설비비가 적은 반면, 대량의 송풍량을 요구하며 배기송풍에 포함된 대량의 현열을 폐기함으로써 에너지 소모가 많은 단점이 있다.^(7,9,10)

따라서 기존장치에 비하여 재료의 수분함유량의 조절이 간편하며, 재료의 건조온도가 비교적 낮아 재료의 열변형이 적고, 또한 산소농도가 매우 낮아 건조과정 중에 일어날 수 있는 재료의 부패와 변질을 방지할 수 있고, 열풍건조기에 비하여 건조시간도 비교적 짧은 진공건조에 대한 관심이 급증하고 있다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 농수산물을 연구대상으로 하여, 최상의 품질을 고속으로 건조할 수 있는 고성능 저온진공건조기를 실용화 할 목적으로, 가열수 입구 온도가 저온진공건조에 미치는 열적 특성에 관하여 연구하였다.

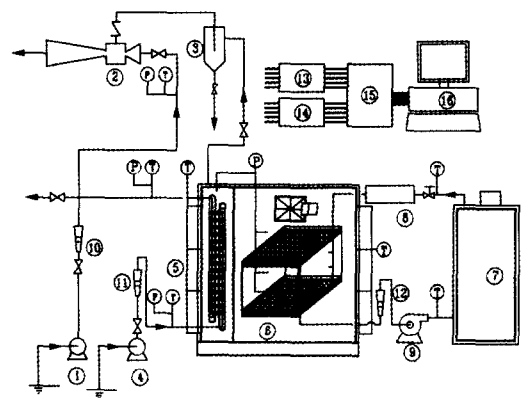
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 이용되어진 실험장치의 전체 계통도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 크게 나누어 피건조물을 투입하여 건조하기 위한 진공용기계통, 진공용기 내부를 소정

의 진공압력으로 유지하기 위한 진공추기계통, 피건조물의 증발 건조에 필요한 열량을 공급하기 위한 가열계통, 진공 증발된 수분을 응축하기 위한 응축계통, 각부의 온도, 압력, 차압, 무게 등의 실시간 계측을 위한 온라인 측정계통으로 구성되어 있다.

먼저 진공건조계통의 핵심장치로서, ⑥진공용기는 '1,200D×1,226L×6t' mm 크기의 원통형 용기로서 내부 용적은 1.502m³이다. 원통의 진공용기 내부에는 무게 측정기, 대류를 형성시키기 위한 팬 2대를 설치했다. 응축계통은 해수를 이용하여 시료로부터 증발하는 저압 상태의 체적이 매우 큰 증기를 응축시키기 위한 ⑤응축기를 설치하였다. 진공추기계통은 ②수구동 기체흡입 이젝터에 의해 진공용기내의 압력을 소정의 진공압으로 유지할 수 있도록 설계하였으며, 이젝터는 수구동 펌프 작동으로 구동되어진다. 이젝터의 흡입 측에는 역류 방지를 위해 체크밸브와 ③수액기를 설치했다. 가열판을 소정의 온도로 가열시키기 위한 가열계통의 핵심장비는 ⑦보일러이며, 진공건조실험에서 가열수 온도가 피건조물의 열적 특성에 미치



- ① Ejector Driving Pump ⑧ Electric Heater
- ② Ejector ⑨ Boiler Circulation Pump
- ③ Liquid Receiver ⑩⑪⑫ Flowmeter
- ④ Condenser Driving Pump ⑬ Pressure Transducer
- ⑤ Condenser ⑭ Temperature Transducer
- ⑥ Vacuum Chamber ⑮ Data Acquisition System
- ⑦ Boiler ⑯ Personal Computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

는 영향을 알기 위하여 공급되는 온수관의 중간에 ⑧전기가열기(2kw×3개)를 설비하였고 정온도조절 가열장치를 전기가열기에 연결하여 작동할 수 있도록 하였다. 각부의 온도 및 압력, 차압 및 피건조물의 무게 변화 등을 ⑮데이터 집목장치에 의하여 1초 이상의 임의 설정 가능한 실시간 간격으로 데이터를 수집하여 컴퓨터에 기록할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

기초실험은, Fig. 1과 유사한 실험장치를 이용하여, 진공상태하에서 함수다공질층 재료의 열 및 물질전달에 관한 기초자료를 수집하기 위하여 입자크기가 균일한 모래를 시료로서 실험하였다. 용기내의 진공압력을 50~200mmHg abs.까지 변화시켜 가면서 진공도에 따른 특성을 검토하였으며, 가열면의 온도가 건조 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 70~80°C까지 변화시켜 가면서 실험을 행하였다. 또한 1점과 2점으로 각각 실험하여 재료 두께에 의한 영향을 파악했으며 이 때의 열유량, 열프럭스 변동 및 비등곡선 추이 등을 검토하였다. 실험에서의 범위를 도표로서 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental condition for material

Parameter	Range
Pressure	50~200 mmHg abs.
Temperature	70 ~ 80 °C
Thickness of Material	1 ~ 2 layer

본 실험은 기초실험을 바탕으로 진공압력을 100mmHg abs.로 일정히 유지하고, 가열수 온도를 70~80°C로 변화시켜가면서 가열수 온도가 진공건조 특성에 미치는 영향을 중점적으로 연구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진공건조 메카니즘

건조는 일반적으로 재료에열기간, 항울건조기간, 감울건조기간으로 구분된다. 재료에열기간은

투입된 재료가 습구온도까지 상승하는 구간에서 시간적으로 비교적 짧고 이 동안의 수분변화는 적다. 항울건조기간에는 주위로부터 전열속도와 재료표면으로부터의 증발속도가 조화된 동적 평형에 있으며, 건조속도 R은 일정하다. 항울건조기간이 종료하는 시점의 함수율은 한계함수율이라 하지만 한계함수율은 동일재료라도 건조 방식이 바뀌면 이 값도 변하는 것에 주의해야 한다. 한계함수율 이하의 부분에서는 수분이 감소함에 따라 재료 내부의 수분 이동 저항이 증가해, 건조속도가 떨어져 가기 때문에 이 구간을 감울건조기간이라 한다. 감울건조기간의 건조 특성을 예상하는데는 확산계수를 구하여야 하므로 상당히 복잡한 계산이 필요하다. 한계함수율과는 별도로 재료 특유의 수분보유 상태를 나타낸 것으로 평형 함수율이 있다. 재료는 외부조건, 온도, 습도가 정해지면 그에 대응하는 일정의 함수율로 평형하다. 건조 대상으로 하고 있는 재료를 극히 저수분까지 건조할 필요가 있는 경우에는 평형 함수율을 내리도록 해야한다. 열전도에 의한 건조는 열매체에 의해 가열된 가열면상에 직접 피건조물을 올려놓음으로써 열전도에 의해 건조하는 방법을 말한다. 열전도에 의한 건조에서 정지층에서의 건조속도는 항울건조기간중에는 다음 식으로 나타낸다.

$$R_c = \frac{kg}{R_w T} (P_s - P_a) = \frac{k(t_{min} - t_s) - h(t_s - t_a)}{H_{fg}} \quad (1)$$

감울건조기간은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$R_D = \frac{\frac{\lambda}{x}(t_s - t_w) + \frac{X}{(l-x)}(t_b - t_w)}{H_{fg}} = \frac{1}{R_w T} \left(\frac{1}{1k_g + \mu x/D_v} \right) (P_w - P_a) \quad (2)$$

건조능력을 높이기 위해 재료 표면에 공기를 보내 재료 표면에서 물질이동 계수의 증대를 꾀하거나 열매체의 온도를 올려 Δt를 크게 하거나 또 재료층을 얇게 함으로서 k(1/h_i + l_i/λ_e + l/λ)의 증대를 꾀함과 함께 감울건조기간에서의 증발면 후퇴에 의한 재료층에서의 확산 저항을 감소시키는 것이

중요하다. 또한 전열면 및 증발면을 변경시켜 열전도 상당 거리인 재료층의 두께를 실질상 줄이는 것이 중요하고 가열면과 재료의 접촉면을 유효하게 활용하는 것도 중요하다.

3.2 진공건조속도 특성

진공건조실험이 시작되는 시점을 $t=0$ hr로 간주하여 실험이 개시되면, 가열판의 표면온도, 시료 및 그 주위 온도분포는 물론 상부의 건조판에서는 무게 센서에 의한 건조시료의 무게 변동을 측정하는데, 임의 시각에서 건조 시료의 무게를 W_T , 시료 표피, 씨 및 꼭지의 무게 합계를 W_c , 수분의 무게를 W_h 라고 하면, 다음 식의 관계가 성립한다.

$$W_T = W_c + W_h \quad (3)$$

일반적으로 생체를 진공건조하면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 초기에는 건조가 매우 활발히 일어나는 항울건조기간을 거쳐 건조가 서서히 일어나는 감울건조기간에 진입한다. 다음으로 최적의 장기보관 또는 식품이 최고상태의 맛을 보존하기 위한 최적의 함수율 ω_{ST} 를 갖는 최적의 건조시간이 존재한다.

Fig. 2는 상부 건조판상에 2,500gr의 건조시료를 올려놓은 상태에서 건조를 하였을 경우, 시간의 경과에 따른 무게의 변동을 측정하여 정리한 것이

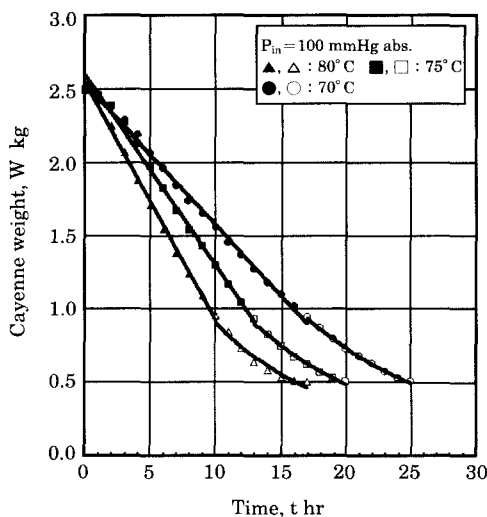


Fig. 2 Weight variation

다. 그림 중에 나타난 결과에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 비례하여 선형적으로 무게가 감소하는 소위 항울건조기간과 시간의 경과에 대하여 무게 감소율이 완만하여지는 감울건조기간이 있었다. 이 그림에 표현한 바와 같이 항울건조기간 동안의 무게 변화는 일반적으로 다음 식과 같이 표현된다.

$$W_T = -a_1 t + b \quad (4)$$

또한 감울건조기간에 대하여는 총 무게가 시간의 경과에 따라서 감소하므로 지수함수를 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_T = a_2 e^{-k_2 t} \quad (5)$$

Fig.2는 식(4), (5)를 이용하여 압력 100mmHg abs., 가열수의 온도를 80, 75, 70°C로 변화시켜 가며 무게 변화를 측정 하였으며, 항울건조기간은 ■, 감울건조기간은 □기호로 나타내었다.

이 그림에서 보는 바와 같이 가열수의 온도가 높을수록 무게감소의 속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 가열면 온도가 높을수록 시료의 증발표면에서의 온도가 상승하게 되므로 확산의 구동력이 되는 시료의 증발표면과 주위와의 수증기 분압차가 크게 되기 때문이다.

3.3 저온진공건조시의 열프럭스 변동

농수산물 건조용 저온진공건조기를 실제로 실용화 하기 위하여서는 건조판 단위면적당의 전열량을 알아야 한다. 앞에서 전술한 바와 같이 무게 W 가 측정되고, 이로부터 시간의 경과에 대한 무게 감소율 즉 $\Delta W/\Delta t$ 가 구하여지면, 건조판 단위면적당의 무게 감소율과 단위면적당의 전열량 즉 저온진공건조에 관한 구체적인 열프럭스의 변동을 구할 수 있다.

$$q = \frac{1}{A} \left(-\frac{\Delta W_T}{\Delta t} \right) H_{fg} \quad (6)$$

위 식에서 H_{fg} 는 수분의 증발잠열을, 그리고 A 는 건조판의 면적을 나타낸다. 본 실험에서 계측용 건조판의 크기는 가로 0.71m, 세로 0.77m이므로 건조판의 면적은 0.55m²이다. Fig. 3에서 보는바와

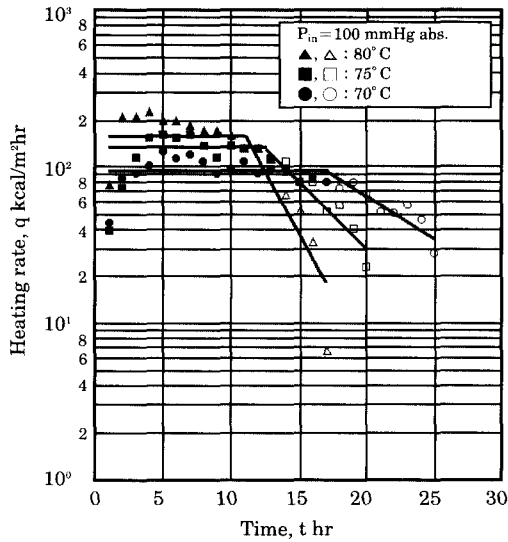


Fig. 3 Heat flux variation

같이 식(6)을 이용하여 실험한 결과, 항울건조기간 동안의 단위면적당의 열프럭스는 거의 일정한 값이 되며, 감울건조기간에 대하여는 역시 지수함수로서 표현됨을 예측할 수 있다. 가열수 온도가 높을수록 열 흐름이 많았으며, 항울건조기간이 짧게 나타나, 전체적인 건조 시간이 짧아짐을 확인하였다. 본 실험범위에서는 가열수 온도가 80°C에서 항울건조기간은 약 11시간, 75°C에서 13시간, 70°C에서 17시간이 소요되었으며, 각각 열흐름은 약 170, 150, 100kcal/m²hr로 나타났다.

3.4 비등곡선

벽면 과열도 ΔT_s 는,

$$\Delta T_s = T_w - T_s \quad (7)$$

위 식에서 T_w 는 실험에서 측정된 시료의 표면온도를 나타내는데, 이 값은 미세열전대를 주사기 바늘에 삽입하여, 측정하고자 하는 반대측 표피로부터 삽입하여 거의 외표면 가까이의 온도를 시료의 표면온도로 간주하였다. 위 식에서 T_s 는 수증기의 포화온도를 의미하는데, 이는 진공압력에 상당하는 포화온도를 증기표에서 찾아 사용하였다. 한편 식(7)과 같이 벽면 과열도가 얻어지면 다음 식과 같이 국소열전달율, h (kcal/m²hr°C)를 구할 수 있다.

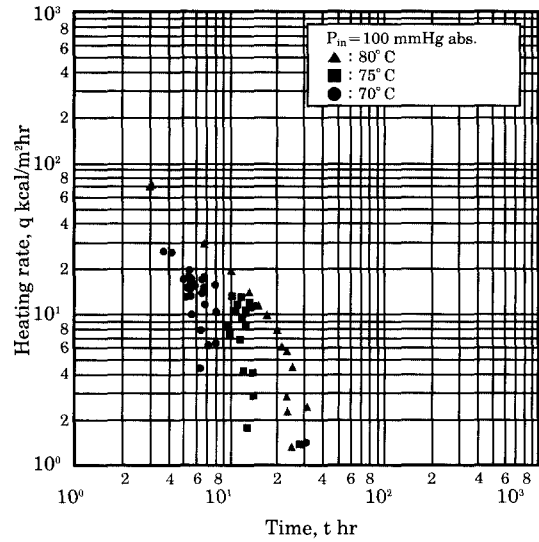


Fig. 4 Boiling curve

$$h = \frac{q}{\Delta T_s} \quad (8)$$

Fig. 4에서는 건조초기 포화온도와 시료표면의 온도차가 크지 않을 때 열흐름이 많이 있었으며, 항울건조기간이 끝나는 시점에서는 벽면 과열도가 더 이상 올라가지 않으며, 감울건조기간에는 거의 약간의 열흐름만이 진행된다는 것을 알 수 있다. 가열수 온도가 80°C일 때 항울건조기간이 끝나는 시점에서의 벽면과열도는 약 20°C로 나타났으며, 이후 벽면과열도는 더 이상 증가하지 않으며, 열흐름도 약 4kcal/m²hr°C 이하로 미소하게 전달됨을 알 수 있다.

3.5 진공건조 특성곡선

건조분야에서는 함수율 $\omega(\%)$ 와 건조판 단위면적당의 건조율 kgH₂O/m²hr의 관계로서, 건조특성곡선을 나타낸다. 여기서 건조율은 다음 식과 같이 정의한다.

$$R_{dc} = \frac{q}{H_{fg}} \quad (9)$$

실제의 실험에 있어서는 저온진공건조에 의하여 연속적으로 시료의 무게 변동을 측정하고 있으므로, 이로부터 임의 시각에서의 함수율을 알 수

있다.

항울건조기간에서의 무게 감소율, 즉 증발율은 식(4)와 같이 표현되었으며, 감울건조기간에 대하여는 식(5)와 같이 표현되었다. 그러므로 항울건조가 끝나는 시각 즉, 감울건조가 시작되는 시각은 이 두식을 등호관계로 놓고서 그 시각을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{c,p} = -\frac{1}{k_3} \ln \frac{a_1}{k_1} = \frac{1}{k_3} \ln \left(\frac{k_1}{a_1} \right) \quad (10)$$

실제의 경우에는 시료를 건조하여 최고의 맛과 영양상태를 유지하고, 장기보관을 하는 경우에는 건조과정 끝단에서의 함수율을 최적치로 유지할 필요가 있다. 이러한 경우에는 함수율이 주어지므로, 역으로 시료의 무게와 최종적인 함유 수분량을 계산할 수 있으므로, 저온진공건조에 소요되는 시간을 역순서로 계산할 수 있다.

건조 직전의 함수율은 함수율 측정기를 이용하여 측정하였는데, 대부분의 경우에는 400~600%의 범위이었다. 건조가 진행되면 수분의 증발과 더불어 함수율은 낮아지면서, 건조율은 최대치를 향하여 급증한다. 이어서 함수율이 200% 전후까지는 함수율이 약간씩 감소하기는 하지만 아주 높은 상태의 항울건조가 지속된다. 서서히 표피 근처의 수분이 증발하면 결국 시료 내부의 수분이 외부표면으로 이동하며, 이 때는 건조율이 낮아지면서 감

울건조기에 진입한다.

Fig. 5는 건조특성곡선을 정리하여 나타낸 것이며, 가열수 온도가 80°C일때 항울건조기간에서의 함수율 100~400%에서 건조율은 약 0.20~0.35 kgH₂O/m²hr로 가장 높게 나타났다.

이 그림에서 가열수의 온도는 현격한 무게 감소율의 증대를 일으키는 것을 알 수 있다. 그러나 생체의 건조에서는 영양가, 맛, 색깔을 손상시키지 않는 범위 내에서 건조가 이루어져야 한다는 점에 유의할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 한국인의 식생활과 관련하여 매우 중요한 농수산물을 연구 대상으로 저온진공건조 방법에 관하여 전열공학측면에서 특히 가열수 온도가 저온진공건조 특성에 미치는 영향에 대해 정량적인 해석을 시도하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 실험을 통하여 저온진공건조용 건조기를 열설계하기 위한 많은 정량적 설계 데이터를 습득하였으며, 농수산물의 저온진공건조를 통하여 설계 제작하여 개발한 저온진공건조기는, 그 성능이 열공학측면에서 매우 우수함을 확인하였다.
- (2) 생체의 저온진공건조실험에서도 전형적인 항울건조기간과 감울건조기간이 확연히 존재함을 확인할 수 있었으며, 항울건조기간 동안의 무게의 변화는 경과시간에 대한 1차 식으로, 감울건조기간 동안에 대하여는 경과시간에 대하여 점진적으로 무게가 감쇠하는 지수형태의 식으로 각각 정량적인 실험식의 제시가 가능하였다.
- (3) 항울건조기간에서의 증발속도가 본 실험의 범위내에서는 가열수의 온도가 높을수록 증가하였으며, 감울건조기간 동안의 증발속도도 동일한 양상을 보였다.
- (4) 저온에서 건조가 이루어 지기 때문에 기존의 건조기에 비해 건조시간이 약 1/3~1/4정도로 단축되었으며 맛, 향기, 색깔 등의 손상도 거의 없음을 확인하였다.

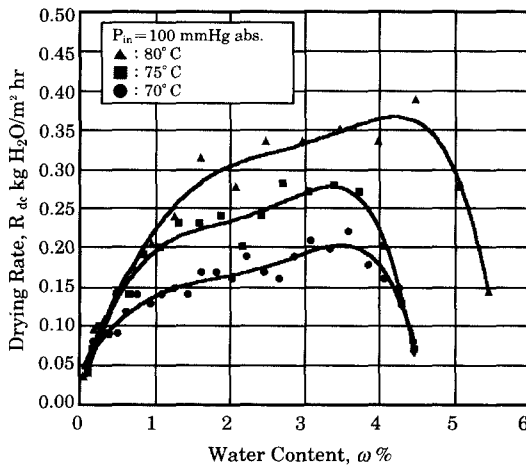


Fig. 5 Vacuum drying characteristic curve

참고문헌

1. 김경근, 최순열, 문수범 등; “저온진공건조기를 이용한 고추의 열적특성에 관한 연구”, 공기조화 냉동 공조학회 학술대회논문집, 무주 리조트, pp.410~414, 1999
2. 김경근, 최순열, 문수범 등; “가열/진공증발 교호열 조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(1차년도 연구보고서)”, 산업자원부 산업 기반기술과제, 1998
3. 김경근, 최순열, 문수범 등; “가열/진공증발 교호열 조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(2차년도 연구보고서)”, 산업자원부 산업기반기술사업, 1999
4. 김경근; “농수산물의 저온진공건조 열적 특성”, 대한기계학회 추계학술대회논문집 특강 자료, 부경대학교, pp.1~6, 1999
5. 최순열; “저온진공건조기의 열적특성에 관한 연구”, 한국해양대학교 기관공학과 박사학위 논문, 1999
6. 신기술 편집부역; “건조장치의 이론과 실제”, 신기술, 1998
7. 太田勇夫, 益子正教, 木村進; “眞空乾燥”, 日刊工業新聞, 1964
8. Edward M. Cook, Harman D. DuMont; “Process Drying Practice”, McGraw-Hill
9. 久保田濃; “乾燥裝置”, 省エネルギーセンター, 1995
10. 桐榮, 前田金剛, 山内敏夫, 不破威信, 和田一洋, 山本博久; “眞空乾燥の基礎的研究”, 化學工學, 第24卷, 第5號, pp.289~297, 1960

저 자 소 개



김경근(金京根)

1952년 10월생. 1974년 한국해양대학교 해사대학 기관공학과 졸업. 1976년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 1979년 일본 동경대학 대학원 기계공학부 졸업(석사). 1985년 일본 동경대학 대학원 기계공학부 졸업(박사). 1979년~1986년 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수. 1994년~1999년 조선·해양기자재 지역컨소시엄 사업단장. 1994년~현재 박용기관학회 평의원, 대한기계학회 평의원. 2000년~현재 한국해양대학교 해사산업연구소장.



최순열(崔順烈)

1947년 6월생. 1986년 서울산업대학교 기계공학과 졸업. 1992년 조선대학교 기계공학부 대학원 졸업(석사). 1999년 한국해양대학교 기관시스템공학부 대학원 졸업(박사). 1992년~현재 군산대학교 기관공학과 부교수. 2000. 10~현재 한국박용기관학회 평의원