

시료 두께에 의한 저온진공건조기의 열적 특성에 관한 연구

최 순 열* · 문 수 범**

A Study on the Thermal Characteristics of the Low Temperature Vacuum Dryer by Material Layers

S-Y Choe* · S-B Moon**

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

Abstract

In tradition, there have been two kinds of drying methods, which are sun drying and artificial drying. The sun drying method which has been adopted traditionally has been replaced by the hot-air drying method which is one of the most general methods of artificial drying, with its simple drying system, low initial cost of drying plant, and easy operating method. But the hot-air drying method has some defects ; (1)much energy loss happens due to the discharge of hot air during the drying process, (2)control of drying rate is not easy on account of changing relative humidity of inlet air for uniform hot air temperature, (3)high temperature of foods in drying process brings about the production of low-grade drying products. Also, the hot-air drying method is inducing environmental and sanitary problems which are resulting from the emission of high temperature and high humidity air, including stick on the drying progress.

Vacuum drying technique, whose drying time and quantity of exhausting energy is about 1/3~1/4 of hot air drying, is very excellent in the drying efficiency.

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 0.35 kg/m²hr at about 350% of the moisture content.

1. 서 론
생물이 자랄 수 있는 영양분이 요구되며, 이 중 한
요소를 물질로부터 제거함으로써 부패의 진행을
물질의 부패에는 충분한 수분과 산소 그리고 미 막을 수 있는데 가장 일반적인 방법은 물질에 함유

* 군산대학교 기관공학부
** 한국해양대학교 대학원

된 수분을 제거하는 것이다.

지구상에 있는 것은 모두 수분을 함유하고 있다. 그 함유량에 따라 그 물체의 성질은 변화한다. 또, 수분 자체도 온도, 압력에 따라 고체, 액체, 기체로 변화한다. 지구상의 물체는 그 발생에서 끝날 때까지 물과의 관련을 갖고 변화되어 간다. 물을 수증기로 변화하기 위하여 1kg에 대해 약 600kcal의 열에너지를 필요로 한다. 아무리 에너지 위기를 의처도, 인간과 함께 존재하는 건조수법은 기계화에 의한 인력절감, 고능률화를 추구하는 현대사회에서 고전적인 태양열과 바람만을 이용하는 자연건조만에 의지할 수는 없다.^(1~3)

현재까지 개발되어 보급되어 있는 건조기계는 주로 열에너지의 공급 방법으로 분류되어지며, 열풍과 건조물을 직접 접촉시켜 건조물 재료에 열에너지가 전달되어지는 방법인데, 공급되는 열풍에너지를 높은 온도와 낮은 습도를 건조물 재료의 낮은 온도와 높은 습도에 접촉시키므로 열전달에 의한 수분증발을 유도하여 건조시키는 대류전열 열풍건조기가 주종을 이루고 있다. 그러나 이 건조기계는 열풍이 순환되므로 송풍이 필요하게 되고, 순환되면서 증발된 수분에 의해 습도가 높아져 열풍을 배기해야 하므로 다량의 습한 열에너지가 밖으로 버려지게 되므로 건조장치에서 좋은 열효율은 기대할 수 없는 단점이 있다. 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. 이미 미국, 일본등 선진국에서는 이러한 진공건조장치를 개발하여 상품화하고 있으나 자국산업의 보전을 위하여 기술이전을 회피하고 있는 실정이다.^(7,9,10)

이러한 관점에서, 본 연구에서는 농수산물을 연구대상으로 하여, 최상의 품질을 고속으로 건조할 수 있는 고성능 저온진공건조기를 실용화 할 목적으로, 건조시료의 두께가 진공건조의 열적 특성에 미치는 영향에 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 소정의 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, ⑥진공용기로서 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 핵심장치는 ⑦보일러이며, 진공건조실험에서 가열수온도가 피건조물의 열적 특성에 미치는 영향을 알

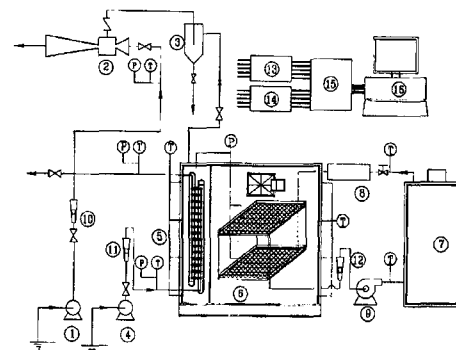


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

기 위하여 공급되는 온수관의 중간에 ⑧전기가열기(2kw×3개)를 설치하였고 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℃까지 변화시켜 가면서 실험을 행하였다. 또한 1겹과 2겹으로 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° C~80° C
Thickness of Material	1겹~2겹

본 실험은 기초실험을 바탕으로 재료의 두께가 진공건조 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진공건조 메카니즘

건조는 일반적으로 재료예열기간, 항울건조기간, 감울건조기간으로 구분된다. 재료예열기간은 투입된 재료가 습구온도까지 상승하는 구간에서 시간적으로 비교적 짧고 이 동안의 수분변화는 적다. 항울건조기간에는 주위로부터 전열속도와 재료표면으로부터의 증발속도가 조화된 동적 평형에 있으며, 건조속도 R은 일정하다. 항울건조기간

이 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 기간을 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 일정한 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.

$$R_c = \frac{kg}{R_w T} (P_s - P_a) \tag{1}$$

$$= \frac{k(t_{min} - t_s) - h(t_s - t_a)}{H_{fg}}$$

위 식에서 kg는 표면증발계수, Ps는 온도 ts에서 의 포화증기압, Pa는 공기의 증기분압, Hfg는 증발 잠열을 나타낸다.

감울건조기간은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$R_D = \frac{\frac{\lambda}{x} (t_s - t_w) + \frac{\lambda'}{(l-x)} (t_b - t_w)}{H_{fg}} \tag{2}$$

$$= \frac{1}{R_w T} \left(\frac{1}{1/k_g + \mu x/D_v} \right) (P_w - P_a)$$

위 식에서 λ는 재료층의 열전달도, x는 감울건조기간에서의 증발면의 재료표면으로부터의 후퇴거리, μ는 증기통과에 대한 계수로 일반적으로는 재료층 공극율 ε의 역수 1/ε로 잡는다. Dv는 수증기의 공기로의 확산계수, Pw는 온도 tw에서의 포화

증기압을 나타낸다.

건조능력을 높이기 위해 재료 표면에 공기를 보내 재료 표면에서 물질이동 계수의 증대를 꾀하거나 열매체의 온도를 올려 Δt 를 크게 하거나 또 재료층을 얇게 함으로서 $k(1/h_i + l_i/\lambda_i + l/\lambda)$ 의 증대를 꾀함과 함께 감율건조기간에서의 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 건조시료의 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 항율건조기간을 거쳐 건조가 서서히 일어나는 감율건조기간에 진입한다. 다음으로 최적의 장기보관 또는 식품이 최고상태의 맛을 보존하기 위한 최적의 함수율 w_{ST} 를 갖는 최적의 건조시간이 존재한다.

Fig. 2는 상부 건조판상에 2,500, 5,000gr의 건조시료를 올려놓은 상태에서 건조를 하였을 경우, 시간의 경과에 따른 무게의 변동을 측정하여 정리한 것이다. 그림 중에 나타난 결과에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 비례하여 선형적으로 무게가 감소하는 소위 항율건조기간과 시간의 경과에 대하여 무게 감소율이 완만하여지는 감율건조기간이 있었다. 이 그림에 표현한 바와 같이 항율건조기간 동안의 무게 변화는 일반적으로 다음 식과 같이 표현된다.

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

또한 감율건조기간에 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., 가열수온도 75°C에서의 무게 변화를 나타내고 있으며, 항율건조기간은 ■, 감율건조기간은 □ 기호로 나타내었다. 그림은 1겹과 2겹으로 배열하여 건조실험을 행하였으며, 무게감소율은 2겹의 경우가 1겹의 경우보다 크기는 하지만 2배에 도달하지는 못함을 알 수 있다. 그리고 건조에 소요되는 총시간은 1겹의 경우가 20시간, 2겹의 경우가 30시간으로 1겹의 경우가 결국 2겹의 경우보다 건조속도가 빠르나, 1겹의 2배량을 건조할 시는 2겹으로 하는 것이 건조시간을 단축할 수 있다.

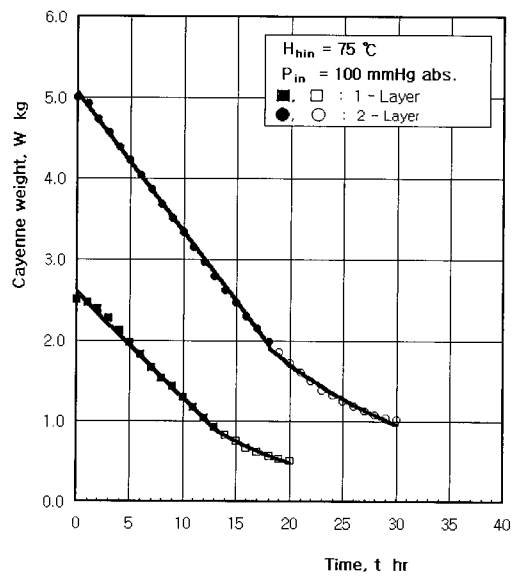


Fig. 2 Weight variation according to drying time

3.3 저온진공건조시의 열프릭스 변동

농수산물 건조용 저온진공건조기를 실제로 실용화 하기 위하여서는 건조판 단위면적당의 전열량을 알아야 한다. 앞에서 전술한 바와 같이 무게

W가 계측되고, 이로부터 시간의 경과에 대한 무게 감소율 즉 $\Delta W / \Delta t$ 가 구하여지면, 건조판 단위면 적당의 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 A는 건조판의 면적을 나타낸다. 본 실험에서 계측용 건조판의 크기는 가로 0.71m, 세로 0.77m이므로 건조판의 면적은 0.55m²이다. Fig. 3에서 보는바와 같이 식(6)을 이용하여 실험한 결과, 항울건조기간 동안의 단위면적당의 열프럭스는 1점의 경우 약 140kcal/m²hr, 2점의 경우 약 200kcal/m²hr의 거의 일정한 값이 되며, 감울건조기간에 대하여는 역시 지수함수로서 표현됨을 예측할 수 있다.

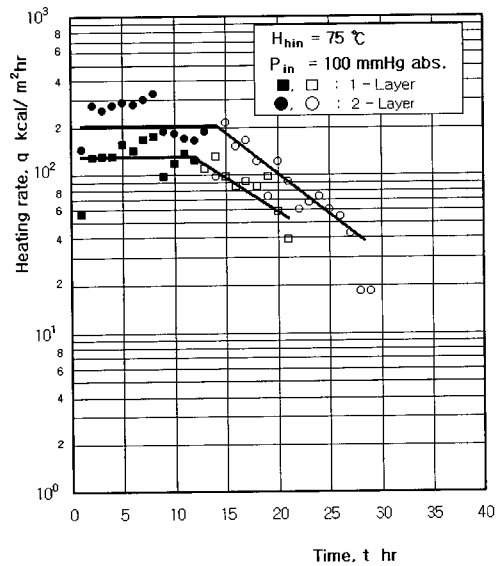


Fig. 3 Heat flux variation according to drying time

3. 4 비등곡선

벽면 과열도 ΔT_s 는,

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

위 식에서 T_w 는 실험에서 측정한 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.

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

Fig. 4에서는 건조초기에서 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. 항울건조기간이 끝나는 시점에서의 벽면 과열도는 약 15°C로 나타났으며, 이후 열 흐름은 약 8 kcal/m²hr°C의 아주 미소한 열프럭스가 전달되는

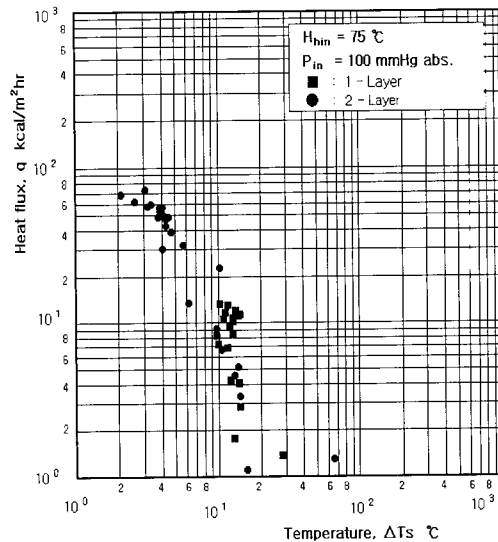


Fig. 4 Boiling curve

것을 알 수 있다.

3.5 진공건조 특성곡선

건조분야에서는 함수율 $\omega(\%)$ 와 건조판 단위면적당의 건조율 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{hr}$ 의 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.

항율건조기간에서의 무게 감소율, 즉 증발율은 식(4)와 같이 표현되었으며, 감율건조기간에 대하여는 식(5)와 같이 표현되었다. 그러므로 항율건조가 끝나는 시각 즉, 감율건조가 시작되는 시각은 이 두식을 등호관계로 놓고서 그 시각을 다음과 같이 구할 수 있다.

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

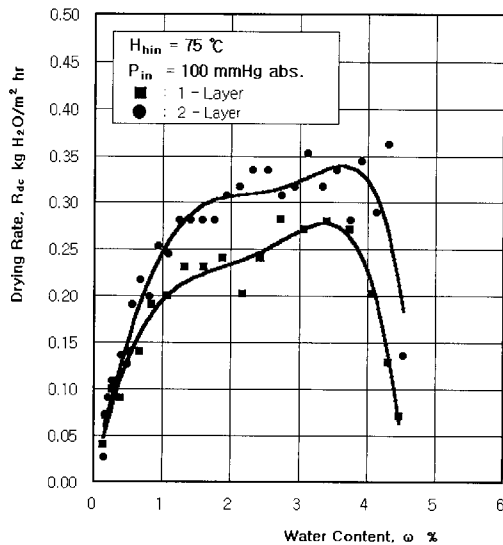


Fig. 5 Vacuum drying characteristic curve

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.

Fig. 5는 건조특성곡선을 정리하여 나타낸 것이며, 초기에는 건조가 빠르게 진행되고 항율건조기간에서는 거의 일정한 속도로 건조가 진행되고 있으며, 감율건조기간에서는 건조속도가 현저히 떨어지고 있다는 것을 알 수 있다. 본 실험 범위에서는 1점의 경우 항율건조기간이 함수율 100~400%에서 약 $0.25\text{kgH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{hr}$ 의 건조율을 나타냈으며, 2점의 경우 항율건조기간이 함수율 100~400%에서 약 $0.30\text{kgH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{hr}$ 의 거의 일정한 건조율을 나타냈다.

시료의 두께를 2점으로 하여 두껍게 하였을 경우 수분이동 및 확산에 대한 저항이 증가하기 때문에 무게 감소율이 2배에 도달하지 못하였으며, 건조되는 시료가 증가되어도 공급되는 가열수의 온도는 일정하고 열흐름의 전도가 원활하게 이루어지지 못하므로 무게 감소율이 2배에 달하지 못한 것이라고 분석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 한국인의 식생활과 관련하여 매우 중요한 농수산물을 연구 대상으로 저온진공건조 방법에 관하여 전열공학적인 측면에서 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, 저온에서 건조가 이루어 지므로 성능이 열공학적인 측면에서 매우 우수함을 확인하였다.

(2) 생체의 저온진공건조실험에서도 전형적인

항울건조기간과 감울건조기간이 확연히 존재함을 확인할 수 있었으며, 항울건조기간 동안의 무게의 변화는 경과시간에 대한 1차식으로, 감울건조기간 동안에 대하여는 경과시간에 대하여 점진적으로 무게가 감쇠하는 지수형태의 식으로 각각 정량적인 실험식의 제시가 가능하였다.

(3) 건조판상에 1겹 건조시보다 시료의 량을 2배 증가시켜 2겹으로 배열하여 건조하면 건조시간이 0.5배 증가함을 알았다.

(4) 문헌의 기존건조장치에 비해 1겹 저온건조시 20시간으로 건조시간을 약 1/3~1/4로 단축할 수 있으며, 저온진공 상태에서 건조가 이루어 지므로 에너지 소모가 적고 재료의 색, 맛, 향 등의 손상이 거의 없음을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김경근, 최순열, 문수범 등 ; "저온진공건조기를 이용한 고추의 열적특성에 관한 연구" 공기조화 냉동공조학회 학술논문집, pp.410~414(1999. 6. 25)
2. 김경근, 최순열, 문수범 등 ; "가열/진공증발 교호열조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(1차년도 연구보고서)", 산업자원부산업기반기술사업(1998. 9. 30)
3. 김경근, 최순열, 문수범 등 ; "가열/진공증발 교호열조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(2차년도 연구보고서)", 산업자원부 산업기반기술사업(1999. 9. 30)
4. 김경근 ; "농수산물의 저온진공건조 열적 특성", 대한기계학회 추계학술논문집 특강자료 pp.1~6(1999. 6. 12)
5. 최순열 ; "저온진공건조기의 열적특성에 관한 연구", 한국해양대학교 기관공학과 박사학위논문(1999. 2)
6. 신기술 편집부역 ; "건조장치의 이론과 실제", 신기술 (1998. 4. 5)
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 ; "乾燥装置", 省エネルギーセンター(1995. 10. 12)
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



최순열 (崔順烈)

1947년 6월생. 1986년 2월 서울산업대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1992년 2월 조선대학교 기계공학과 대학원 졸업(공학석사). 1999년 2월 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학박사). 2002년 현재 군산대학교 해양과학대학 기관공학부 교수, 당학회 증진회원 및 평위원.



문수범 (文首範)

1972년 12월생. 1998년 2월 군산대학교 기관공학과 졸업. 2000년 2월 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(공학석사). 현재 동대학원 기관공학과 박사과정.