

# 진공실 온도에 의한 저온진공건조기의 열적 특성에 관한 연구

## A Study on the Thermal Characteristics of the Low Temperature Vacuum Dryer by the Vacuum Chamber Temperature

최 순 열  
S. Y. Choe

(접수일 : 2010년 6월 23일, 수정일 : 2010년 8월 3일, 채택확정 : 2010년 8월 11일)

**Key Words** : Water Content(함수율), Low Temperature Vacuum Drying(저온진공건조), Falling-rate Drying(감율건조), Constant-rate Drying(항율건조).

**Abstract** : Of the roughly four million known substances, about 60,000 are processed and sold ; many of these must be dried. Many materials are processed in the liquid state - ideal for mixing and reacting - but most products are needed or wanted as dry, or relatively dry, solids. Usually operation is just below atmospheric pressure, as with direct dryers, but some are built for vacuum operation with pressures as low as 26.66kPa abs.. In spite of the global-class aquiculture agriculture and fisheries technology of our country, the processing technologies are lags behind the other nations relatively. These problems are considered to be caused directly by the lack of drying technologies. This paper is concerned to the experimental results of drying heat transfer characteristics for the green energy type vacuum dryer for the high quality agriculture and fisheries production.

### 1. 서 론

지구상의 모든 물질은 수분을 함유하고 있으며, 이 물질에 대류전열, 전도전열, 복사전열과 같은 전열방법을 개별적으로 또는 조합을 통하여 열을 전달하고 공급 할 수 있다. 이처럼 열전달의 장점을 이용하여 물체에 열을 공급하고, 공급된 열에 의해 대상 물질 내의 수분을 기화 증발시킨 다음, 대기 속으로 확산시켜 수분을 제거하는 조작을 건조라고 하는데, 이는 열과 물질의 이동이 동시에 진행되는 열적인 분리법이다<sup>1-3)</sup>.

식품건조에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔는데, 桐榮<sup>4,5)</sup>은 일반 고체 내에서의 수분이동에 대하여 건조의 입장에서 광범위한 해석을 통하여 건조속도의 해석 및 관련 실험식을 제시하였다. 또한 점토를 이용하여 열유속을 일정조건(constant heat flux condition)으로 복사가열 및 전도가열의 경우에 대하여 진공상태하에서 표면증발계수는  $kg = 4.4 \times 10^{-3} \times P^{-2/3}$  ( $g/cm^2 \text{ min mm.Hg}$ ) 임을 제시하였

다. 또한 대기압 하에서의 건조특성과 비교하여 진공건조가 고품질 건조에 최적임을 확인하고 있다.

우리나라에서도 식품건조에 관해 주로 열풍건조기의 개발과 관련하여 연구되어 왔다<sup>6-11)</sup>.

현재까지 개발되어 보급되고 있는 건조기계로는 열풍건조기가 주종을 이루고 있는데, 이는 열풍과 건조물을 직접 접촉시켜 건조물 재료에 열에너지가 전달되어지는 방법으로, 공급되는 열풍에너지의 높은 온도와 낮은 습도를 건조물 재료의 낮은 온도와 높은 습도에 접촉시키므로 열전달에 의한 수분증발을 유도하여 건조가 진행되는 것이다. 그러나 이 건조기는 열풍이 순환되어야 하므로 송풍이 필요하고, 순환되면서 증발된 수분에 의해 습도가 높아진 열풍을 배기해야 하므로 다량의 습한 열에너지가 밖으로 버려지게 되므로 건조 장치에서 좋은 열효율은 기대할 수 없는 단점이 있다.

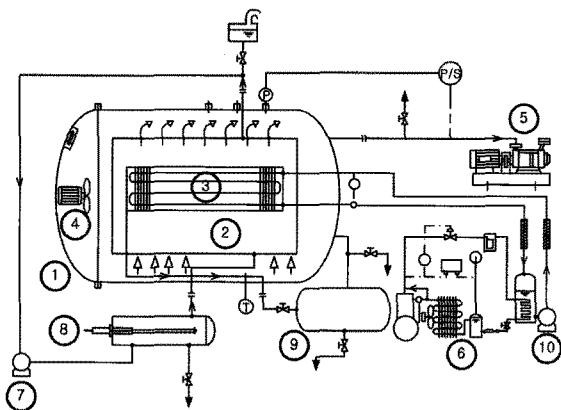
그러나 진공건조 및 진공동결건조는 건조 후 좋은 제품을 얻을 수 있는 신기술 건조법으로, 이러한 건조기술개발은 공학적 측면에서도 중요한 연구 대상이다. 이러한 관점에서, 본 연구에서는 저온진공건조에 필요한 제반 열공학적 특성을 파악하였으며, 농·수산물을 연구대상으로 건조물을 고속으로 건조

최순열(교신저자) : 군산대학교 동력기계시스템공학과  
E-mail : sychoe@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1844

하되 최상의 품질로 건조할 수 있는 고성능 저온진공건조기의 열적 특성에 관해 연구하였다.

## 2. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 전체 계통도를 나타낸다. 실험장치는 본체(low temperature vacuum drying chamber), 저온진공건조기 본체 진공실을 일정한 진공압력으로 유지하기 위한 진공추기계통(vacuum pumping unit), 건조물에 필요한 열량을 공급하기 위한 가열계통(hot-water supplying unit), 증발된 수분을 응축시키기 위한 응축계통(condensing unit) 및 각 부의 온도측정을 위한 측정계통(on-line measuring unit)등으로 구성되어 있다. 저온진공건조기 본체 진공실①의 크기는  $900\phi \times 1200L \times 16t$  mm의 용기로서 진공실 내부용적은  $0.85m^3$ 이다. 저온진공건조기의 본체 진공실에 건조판 10개를 투입할 수 있도록 설계되었으며, 실험중 진공실 내부의 건조상태를 관찰할 수 있는 관찰창( $\phi 200mm$ )을 설치하였다. 또한 본체 진공실 내부는 수봉식 진공펌프⑤를 이용하여 실험진공압을 형성시킬 수 있으며, 약 10분정도가 소요된다. 가열계통은 피건조물에 최소한의 열량을 공급하기 위하여  $5kW$  전기히터②를 사용 설정온도에서 자동 조절되도록 하였다. 응축계통에는 저온진공건조기 본체 진공실 내부에 비체적이 매우 큰 습증기를 응축시키기 위하여 응축기(condenser)2개③과 간접식 냉각장치④를 본체내부에 설치하였다. 본 실험 장치의 전체 사진을 Photo. 1에 나타내었다.



- ① Vacuum chamber
- ② Heating transfer box
- ③ Water vapor condenser
- ④ Circulation fan
- ⑤ Water ring vacuum pump
- ⑥ Ref. machine
- ⑦ Hot water cir. pump
- ⑧ Electric heater
- ⑨ Condensate tank
- ⑩ Cooling water cir. pp.

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

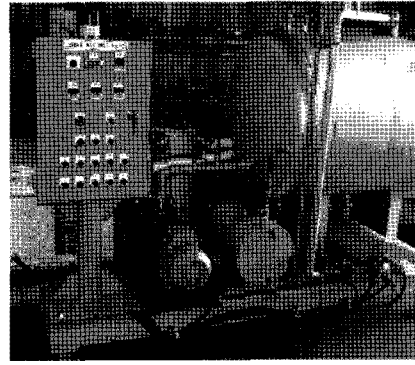
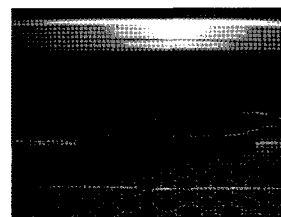
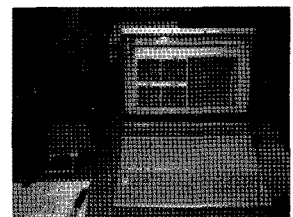


Photo. 1 Experimental apparatus

본 실험장치의 각부 온도측정은 K-Type 열전대(C-A thermocouple)를 사용하였다. 저온진공건조기 본체 진공실 내부, 건조판, 피건조물 등의 온도측정을 위하여 설치된 열전대에서 얻어진 측정결과는 데이터 처리장치를 통해 컴퓨터로 저장 및 기록할 수 있도록 하였다. 또한 정확한 온도 측정을 위하여 각각의 열전대에 대해 표준온도계를 이용하여 검정하였다. 열전대에서 발생하는 기전력은 기준 온도상자, 로터리 스위치를 거쳐 데이터로거(data logger)에서 측정하였으며, 용기내에 설치된 최소눈금  $0.01^{\circ}C$ 의 표준온도계(standard thermometer)의 눈금과 측정된 기전력을 기록하여 최소사승법(least regression)으로 처리하여 검정하였다.



(a)



(b)

Photo. 2 Present data acquisition computer system

Photo. 2는 열전대를 피건조물에 삽입한 상태로 수집된 온도가 컴퓨터에 실시간으로 기록되는 배치를 사진으로 나타낸다. Photo. 2(a)에서 보는 바와 같이 열전대는 해삼의 표면하 깊이  $0.5mm$ 의 위치와 내장을 제거한 해삼의 중심부 2곳에 열전대를 꼽도록 하였다. 또한 가열부(heating box)의 표면과 중간단의 공간 중심부에 열전대를 부착하여 건조실험기간중 연속적으로 온도를 계측할 수 있도록 하였다. Photo. 2.2(b)에서 보는 바와 같이 측정된 온도는 3분 간격으로 PC에 저장되고 모두 4-채널의 온도가 기록 저장되도록 하였으며, 측정된 온도는 자동적으로 그래

픽 처리된다.

건조는 일반적으로 피건조물의 예열기간, 항율 건조기간(constant-rate drying period), 감율 건조기간(falling-rate drying period)으로 구분된다. 피건조물의 예열기간은 투입된 재료가 습구온도까지 상승하는 구간이며 시간적으로 비교적 짧고 이 동안의 수분변화는 적다. 항율 건조기간은 주위로부터 전열속도와 재료표면으로부터의 증발속도가 조화된 동적 평형을 이루는 시기이며, 이 기간 중의 건조속도는 일정하게 된다. 또한 항율 건조기간이 종료하는 시점의 함수율은 한계함수율이라 하며 한계함수율은 동일재료라도 건조 방식이 바뀌게 되면 이 값도 변하게 된다. 한계함수율 이하의 부분에서는 수분이 감소함에 따라 피건조물 내부의 수분 이동 저항이 증가해, 건조속도가 떨어지기 때문에 이 기간을 감율 건조기간이라 한다. 감율 건조기간의 건조 특성을 예상하는 데는 확산계수를 구해야 할 뿐만 아니라 상당히 복잡한 계산이 요구되기 때문에 오히려 실험결과에 따르는 것이 더 간편하고 정확하다. 한계함수율과는 별도로 피건조물 특유의 수분 보유 상태를 나타낸 것으로 평형 함수율이 있다. 피건조물은 외부조건, 온도, 습도가 정해지면 그에 대응하는 일정한 함수율로 평형을 유지한다. 건조 대상으로 하고 있는 재료를 극히 저 수분까지 건조해야만 하는 경우에는 평형 함수율을 내리기 위해 열원의 온도를 올리든가 혹은 진공실의 습도를 내려야만 한다. 또한 저 함수율까지 건조해도 대기중의 수분을 흡습해서 함수율이 다시 올라가 버릴 수가 있으므로 건조 제품의 보관 관리에서 공조 관리도 중요하다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 시간경과에 따른 무게 변동

건조시료를 건조판 위에 일정량씩 올려놓은 후 건조판을 가열판 위에 올려놓고 건조기의 개폐문을 닫는다. 다음으로 진공추기계통을 작동시키면 실험이 시작되고, 소정의 실험압력으로 유지되어갈 때 가열계통의 작동을 개시하여 진공압력이 일정하게 되는 시점과 소정의 가열수를 이용 진공실 실험온도와 일치시킨다. 이와 같이 저온진공건조실험이 시작되는 시점을  $t = 0hr$ 로 하였다. 실험은 평균적인 건조특성을 나타내는 중간부분의 No.5 건조판을 이용하여 실행하였다.

건조실험이 시작되면 2시간 간격으로, 건조기를 정지한 후 건조판을 꺼내어 정미의 건해삼 무게변동을 측정하였으며, 한번 측정에 소요되는 시간은 15~20분 정도 소요되며, 이 측정 소요 시간을 제외하고 다음 2시간 후에 2차 측정을 하여, 건조가 완료되는 시간까지 측정을 반복하였다.

지금 임의시각에서 건조시료의 무게를  $W_T$ 라고 하고 건 무게 합계를  $W_c$ , 수분의 무게를  $W_h$ 라고 하면, 다음 식의 관계가 성립한다.

$$W_T = W_c + W_h \quad (1)$$

위 식에서 건 무게  $W_c$ 는 불변이므로, 시간  $t$ 가 경과하면 수분이 증발하므로 수분량  $W_h$ 는 적어진다. 전체 시료의 무게 중에 수분이 차지하는 무게의 비율을 함수율  $\omega$ 라고 하며, 이는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\omega = \frac{W_h}{W_T} = \frac{W_h}{W_c + W_h} \quad (2)$$

따라서 저온진공건조 실험이 개시되는  $t = 0$ 에서의 초기 함수율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_0 = \frac{W_{h0}}{W_{T0}} = \frac{W_{h0}}{W_c + W_{h0}} \quad (3)$$

위 식으로부터 시료의 무게 및 수분의 무게를 구하면 각각 다음과 같다.

$$W_c = \frac{W_{h0}(1 - \omega_0)}{\omega_0} \quad (4)$$

$$W_{h0} = \frac{\omega_0}{(1 - \omega_0)} W_c \quad (5)$$

일반적으로 생체를 저온진공건조하면 초기에는 건조가 매우 활발히 일어나는 항율 건조기간을 거쳐 건조가 서서히 일어나는 감율 건조기간에 진입한다. 다음으로 최적의 장기보관 또는 식품이 최고상태의 맛을 보존하기 위한 최적의 함수율  $\omega_{ST}$ 를 갖는 최적의 건조시간이 존재한다. 실험결과를 데이터 처리에 있어서는 수차례의 검토를 통하여, Fig. 2에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 비례하여 선형적으로 고추 및 해삼의 무게가 감소하는 소위 항율 건조기간과 시간의 경과에 대하여 무게 감소율이 완만하여지는 감율 건조기간이 나타나는 것을 알 수 있었다.

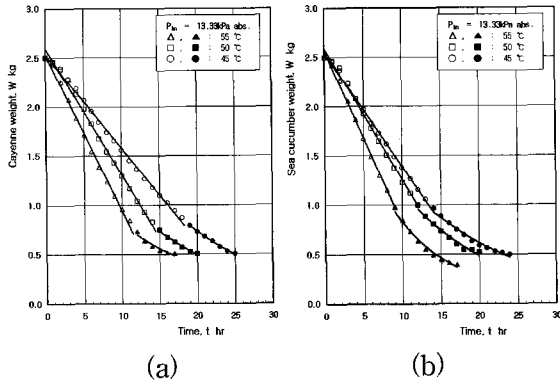


Fig. 2 Weight variation of cayenne and sea cucumber to vacuum drying time

이 그림에서 보는 바와 같이, 건조개시 후 항을 건조기간에는 피건조물 전체가 함수율이 매우 높으므로 표면 근처의 수분이 활발히 증발하므로써 시간이 경과함에 따라 거의 직선적으로 무게가 감소함을 알 수 있으며, 항을 건조기간이 지나 감을 건조기간에 돌입하면 내부의 수분이 피건조물 표면으로 이동되는 시간이 점차 지연되므로 지수적으로 무게가 감소하여 완전 건조상태에 도달함을 알 수 있었다. 실험을 통하여 진공실의 온도가 높을수록 항을 건조시간과 감을 건조시간이 짧아짐을 확인할 수 있었으며, 항을 건조시간은 고추의 경우 약 12~18시간 정도 해삼의 경우 약 9~14시간, 그리고 감을 건조시간은 항을 건조기간 이후 고추의 경우 약 17~25시간 정도 해삼의 경우 약 17~24시간이 소요됨을 알 수 있었다.

### 3.2 무게 감소율의 변동

항을 건조기간에는 피건조물의 무게가 시간경과와 함께 직선적으로 감소하므로, Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 항을 건조기간 동안의 시료 무게는 일반적으로 다음 식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$W_T = -a_1 t + b \quad (6)$$

또한 감을 건조기간에 대하여는, 시료의 총 무게가 시간경과에 따라 감소하므로 지수함수를 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_T = a_2 e^{-k_2 t} \quad (7)$$

항을 건조기간 및 감을 건조기간에 있어서 시간의 경과에 따른 무게의 변동식이 실험적으로 구하여지면 이를 시간에 대하여 미분함으로써 무게 감소율 즉, 수분의 증발율을 계산할 수 있다.

식(6) 및 식(7)을 시간  $t$ 에 대하여 미분하면 각각 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial W_T}{\partial t} = -a_1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_T}{\partial t} &= -k_2 a_2 e^{-k_2 t} \\ &= -k_1 e^{-k_3 t} \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)에서 보는 바와 같이 항을 건조기간에는 수분의 증발율이 일정하므로  $\Delta W / \Delta t$ 가 일정한 값이 되며, 감을 건조기간에는 식(9)와 같이 기본적으로는 무게의 변동을 나타내는 식과 같다. 무게 감소율의 그래프에서 항을 건조기간과 감을 건조기간이 보다 명확하여짐을 우선 알 수 있으며, 실험치와 상관식은 전 영역에 걸쳐서 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

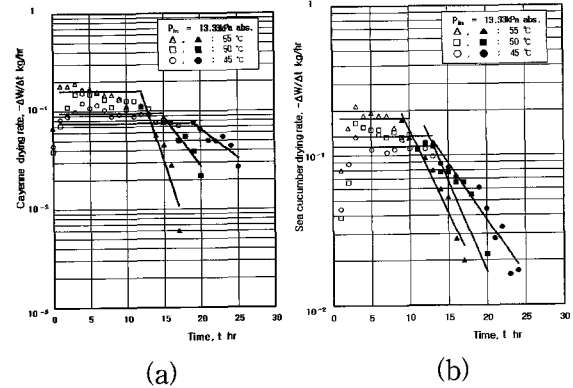


Fig. 3 Variation of weight reducing rate of cayenne and sea cucumber on the No.5 plate

Fig. 3은 항을 건조기간 동안의 무게 감소율을 나타내는 식(8)과 감을 건조기간 동안의 무게 감소율을 나타내는 식(9)을 이용하여 실험 데이터로부터 고추 (a) 및 해삼(b)의 무게 감소율을 구한 결과를 보여준다. 그림으로부터 알 수 있듯이 항을 건조기간에는 건조판 1-판당 고추의 경우 약 0.07~0.17kg/hr, 해삼의 경우 0.12~0.18kg/hr의 속도로 수분이 증발하며, 항을 건조기간 동안의 값으로부터 건조가 진행됨에 따라 지속적으로 감소하여 최소 0.01kg/hr까지 감소하여 최종적인 건조에 도달함을 알 수 있다.

### 3.3 열 플럭스의 변동

생체 건조용 저온진공건조기를 실제로 설계, 실용화하기 위해서는 우선 건조판 단위면적당의 전열량

을 예측해야만 한다. 앞 절에서 전술한 바와 같이 무게  $W$ 가 계측되고, 이로부터 시간의 경과에 대한 무게 감소율 즉  $\Delta W/\Delta t$ 가 구하여지면, 건조판 단위면적당의 무게 감소율과 단위면적당의 전열량 즉, 저온진공건조에 관한 구체적인 열 프릭스의 변동을 구할 수 있다.

$$q = \frac{1}{A} \left( - \frac{\Delta W}{\Delta t} T \right) H_{fg} \quad (10)$$

여기서  $H_{fg}$ 는 수분의 증발잠열을, 그리고  $A$ 는 건조판의 면적을 나타낸다. 그러므로 식(10)을 이용하여, Fig. 4와 같이 정리할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 항을 건조기간 동안의 단위면적당의 열 프릭스는 거의 일정한 값이 되며, 감을 건조기간에 대하여는 역시 지수적으로 감소함을 알 수 있다.

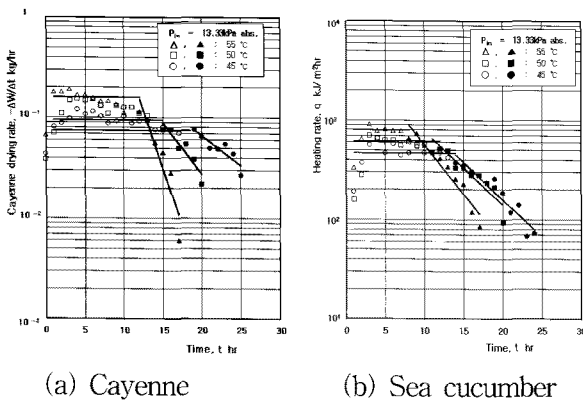


Fig. 4 Variation of heat flux of vacuum drying of cayenne and sea cucumber on the No.5 plate

Fig. 4는, Fig. 3의 무게감소율 데이터를 이용하여, 실험 시간의 경과에 따른 열 프릭스 변동을 그래프로 도시한 것이다. 항을 건조기간, 즉 건조 개시후 약 10시간 건조가 매우 활발히 진행되는 동안에는 고추 및 해삼의 경우에서 최대 약  $800 \text{ kJ/m}^2 \text{ hr}$ 의 열 프릭스를 입을 알 수 있다. 여기서 전열면적은 가상적인 전열면적으로서, 물질전달이 일어나는 고추 및 해삼의 표면적이 아니고 건조판의 넓이임을 밝혀둔다. 감을 건조기간 동안에는 수분의 증발율이 점차 감소하므로 열 프릭스도 이에 비례하여 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

### 3.4 비등곡선

증발현상을 가장 잘 나타낼 수 있는 그래프가 비등곡선으로서, 단위면적당의 열 프릭스와 벽면 과열

도(wall superheat)와의 관계를 정리하여 비등곡선을 나타낼 수 있다. 실험적으로는 전술한 식(10)을 이용하여 먼저 열프릭스를 구한다. 또한 벽면 과열도  $\Delta T_s$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta T_s = T_w - T_s \quad (11)$$

여기에서  $T_w$ 는 실험에서 측정한 시료의 표면온도를 나타내는데, 이 값은 미세열전대를 주사기 바늘에 삽입하여, 측정하고자 하는 반대 측 시료의 표피로부터 삽입하여 얇은 외표면 부근의 온도를 해삼의 표면온도로 간주하였다. 또한  $T_s$ 는 해당 진공압력 상태에서의 포화온도이다. Fig. 5는 이와 같이 하여 계산한 비등곡선을 나타내는데, 벽면 과열도가  $10^\circ\text{C}$  이하가 되면서 열 프릭스가 급격히 감소하면서 감을 건조기간에 돌입함을 알 수 있다.

한편 식(11)과 같이 벽면 과열도가 얻어지면 다음 식과 같이 국소 열전달율,  $h$ (local heat transfer coefficient,  $\text{kJ/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}$ )를 구할 수 있다.

$$h = \frac{q}{\Delta T_s} \quad (12)$$

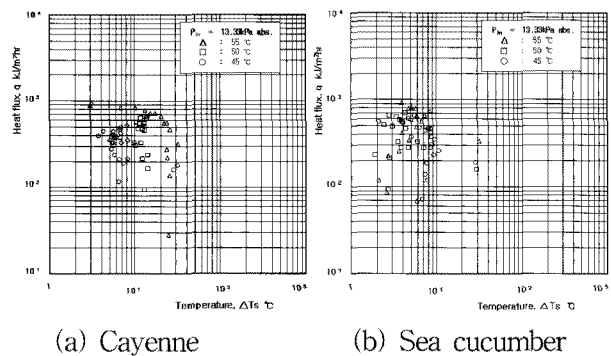


Fig. 5 Boiling curve of vacuum drying cayenne and sea cucumber

## 4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 농·수산물들의 고부가가치 제품의 창출과 수출산업화를 위한 저온진공건조기의 건조열전달 특성에 관한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 항을 건조기간에는 진공실 온도가 높을수록 증발속도가 증가하였다.
- 2) 고추 및 해삼의 저온진공건조의 경우 전형적인 항을 건조기간과 감을 건조기간이 확연히 존재함을 확인할 수 있었으며, 항을건조기간 동안의 무게 변

화는 경과시간에 대한 1차식으로, 감율건조기간 동안에 대하여는 경과시간에 대하여 점진적으로 무게가 감소하는 지수형태의 식으로 실험결과를 정리할 수 있었다.

3) 본 실험의 범위에서 항을 건조기간 동안의 무게 감소율은 건조판 1-판당 고추의 경우 약 0.07~0.17kg/hr, 해삼의 경우 0.12~0.18kg/hr 정도로 거의 일정한 속도로 수분이 증발하며, 감율 건조기간에는 항을 건조기간의 값으로부터 건조가 진행됨에 따라서 지속적으로 감소하여 최소 0.01kg/hr까지 감소하여 최종적인 건조에 도달함을 알 수 있었다.

4) 건조 개시 후 항을 건조기간에서의 건조판 단위 면적당의 전열량은 고추의 경우 330~780 kJ/m<sup>2</sup>hr, 해삼의 경우 약 470~800kJ/m<sup>2</sup>hr의 열프릭스가 됨을 알 수 있었으며, 감율 건조기간 동안에는 수분의 증발율이 점차 감소하므로 열 프릭스도 이에 비례하여 지수적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

5) 단위면적당의 열 프릭스와 벽면 과열도와의 관계를 정리하여 비등곡선을 나타낼 수 있는데 최대 열 프릭스는 약 800kJ/m<sup>2</sup>hr정도이며, 벽면 과열도가 10℃ 이하로 되어 열 프릭스가 급격히 감소하면서 감율 건조기간에 돌입함을 알 수 있었다.

온진공건조 열적 특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제25권 제3호, pp. 35~42.

9. 문수범 외 4인, 2000.7, "생체 건조용 대형 저온진공 건조기의 열적 특성에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제24권 제4호, pp. 35~42.
10. 최순열, 1999. 2, "저온진공건조기의 열적특성에 관한 연구", 한국해양대학교 기관공학과 박사학위논문.
11. 김경근 외 5인, 1999. 6. 25, "저온진공건조기를 이용한 고추의 열적특성에 관한 연구", 공기조화냉동공조학회 학술논문집, pp. 410~414.

## 참고문헌

1. 국립수산물연구원 서해수산물연구소, 2006. 8, "해삼양식 기술개발".
2. 신우철, 2008, "전북양식산업의 미래전략", 목포해양수산청.
3. 농촌경제연구소, 2008.12, "국가 식품클러스터 조성 기본계획".
4. 桐榮, 前田金剛, 山内敏夫, 不破威信, 和田一洋, 山本博久, 1960, "眞空乾燥の基礎的研究", 化學工學, 第24卷, 第5號, pp. 289~297.
5. 桐榮, 林信也, 澤田周三, 1965, "立體および粉體材料層の乾燥における層分布", 化學工學, 第29卷, 第1號, pp. 25~27.
6. 김경근, 1999. 6. 12, "농수산물의 저온진공건조 열적특성", 대한기계학회 추계 학술논문집 특강자료, pp. 1~6.
7. 박형진, 김경근, 김명환, 1996.12, "함수 다공질층의 진공건조에 관한 실험적 연구(1)", 한국박용기관학회지, 제20권, 제5호, pp. 514~521.
8. 김경근, 최순열, 2001.5, "가열수 온도에 의한 저