

# 농산물의 저온진공건조 열적 특성에 관한 연구

- 고추를 중심으로 -

## A Study on the Thermal Characteristics of Agriculture Products in the Process of Low Temperature Vacuum Drying

- With Cayenne as the Object Product for Drying -

최 순 열

S. Y. Choe

**Key Words** : Water Content(함수율), Low Temperature Vacuum Drying(저온 진공 건조), Agriculture Products(농산물)

**Abstract** : Low temperature vacuum drying technique shows very excellent energy efficiency and prominent drying performances compared with the conventional hot air drying technique. This study was focused on the thermal characteristics of the low temperature vacuum drying technique. From the results of this study, it was confirmed that the time consumption for drying with the new drying technique could be shortened to about 1/3 of the time consumption with the conventional hot air drying technique under the same drying conditions for wet products. Also, the maximum drying rate with the new drying technique reached to about 0.35 kg/m<sup>2</sup>h at about 400% of moisture content.

### 기 호 설 명

### 1. 서 론

- $h$  : 국소열전달율
- $H_{fg}$  : 증발잠열
- $kg$  : 표면증발계수
- $P_a$  : 공기의 증기분압
- $P_s$  : 이젝터의 증기분압
- $q$  : 열프럭스
- $R_C$  : 항울기간에서의 건조속도
- $R_D$  : 감울기간에서의 건조속도
- $R_{dc}$  : 건조율
- $\Delta T_s$  : 벽면 과열도
- $T_s$  : 포화온도
- $T_w$  : 고추 표면 온도
- $t_{c,p}$  : 항울건조기간이 끝나는 시각
- $W_h$  : 수분의 질량
- $W_C$  : 고추의 건질량
- $W_T$  : 시료의 총무게

지구상의 모든 물질은 수분을 함유하고 있으며, 이 물질에 대류전열, 전도전열, 복사전열과 같은 전열방법을 개별적으로 또는 조합을 통하여 열을 전달하고 공급할 수 있다. 이처럼 열전달의 장점을 이용하여 물체에 열을 공급하고, 공급된 열에 의해 대상 물질에서 수분을 기화 증발시킨 다음, 대기속으로 확산시켜 수분을 제거하는 조작을 건조라고 하는데, 이는 열과 물질의 이동이 동시에 진행되는 열적인 분리법이다<sup>1-5)</sup>.

현재까지 개발되어 보급되어 있는 건조기계는 주로 열에너지의 공급 방법으로 분류되어지며, 열풍과 건조물을 직접 접촉시켜 건조물 재료에 열에너지가 전달되어지는 방법인데, 공급되는 열풍에너지의 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

접수일 : 2000년 9월 30일

최순열 : 군산대학교 해양과학대학 기관공학과

수분에 의해 습도가 높아져 열풍을 배기해야 하므로 다량의 열에너지가 밖으로 버려지게 되므로 건조장치에서 좋은 열효율은 기대할 수 없는 단점이 있다. 그러므로 진공건조 및 진공동결건조는 건조 후 좋은 제품을 얻을 수 있는 신기술 건조법으로, 이러한 건조기술개발은 공학적 측면에서도 중요한 연구 대상이다<sup>6, 10)</sup>.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 농수산물을 연구 대상으로 하여, 최상의 품질을 고속으로 건조할 수 있는 고성능 저온진공건조기를 실용화 할 목적으로, 설계 및 기술개발에 필요한 제반 열공학적 특성을 파악하는데 본 연구의 목적을 두었다.

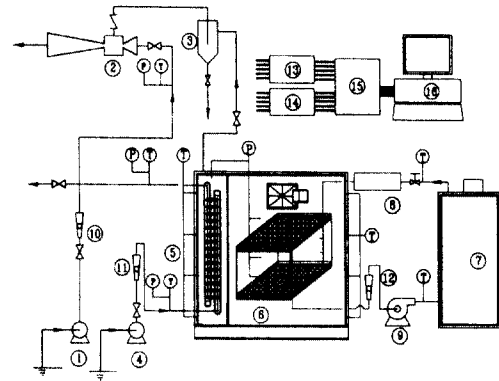
## 2. 실험장치 및 방법

### 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, ⑥진공용기는 '1,200D×1,226L 크기의 원통형 용기로서 내부 용적은 1.502m<sup>3</sup>이다. 원통의 진공용기 내부에는 무게 측정기, 대류를 형성시키기 위한 팬 2대를 설치했다. 응축계통은 해수를 이용하여 시료로부터 증발하는 저압 상태의 증기를 응축시키기 위한 ⑤응축기를 설치하였다. 진공추기계통은 ②물로 구동 되는 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, 진공 건조실험에서 가열수 온도가 피건조물의 열적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공급되는 온수관의 중간에 ⑧전기가열기(2kw×3개)를 설비하였고 정온도 조절 가열장치를 전기가열기에 연결하여 작동할 수 있도록 하였다. 각부의 온도 및 압력, 차압 및 피건조물의 무게 변화 등을 ⑮데이터 기록장치에 의하여 1초 이상의 임의 설정 가능한 실시간격으로 데이터를 수집하여 컴퓨터에 기록할 수

있도록 하였다.



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

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

### 2.2 실험방법

기초실험은, Fig. 1과 유사한 실험장치를 이용하여, 진공상태하에서 함수다공질층 재료의 열 및 물질전달에 관한 기초자료를 수집하기 위하여 입자크기가 균일한 모래를 시료로서 실험하였으며, 본 실험에서는 기초실험을 바탕으로 농수산물의 건조 특성에 관해 실험을 실시하였다. 용기내의 진공압력을 50~200mmHg abs.까지 변화시켜 가면서 진공도에 따른 건조 특성을 검토하였으며, 가열면의 온도가 건조 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 70~80℃까지 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 또한 재료 두께에 의한 영향을 파악하기 위해 20~60mm 두께의 모래를 실험하였다. 이 때의 열유량, 열프럭스 변동 및 비등곡선 추이 등을 검토하였다. 실험범위는 Table 1과 같다<sup>11)</sup>.

Table 1 Experimental condition for material

Parameter	Range
Pressure	50~200 mmHg abs.
Temperature	70 ~ 80℃
Thickness of Material	20 ~ 60mm

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 진공건조 메카니즘

건조는 일반적으로 재료예열기간, 항울건조기간, 감울건조기간으로 구분된다. 항울건조기간이 종료하는 시점의 함수율을 한계함수율이라 하며 한계함수율은 동일재료라도 건조 방식이 바뀌면 이 값도 변하는 것에 주의해야 한다. 한계함수율 이하의 부분에서는 수분이 감소함에 따라 재료 내부의 수분이 이동 저항이 증가해, 건조속도가 떨어져 가기 때문에 이 기간을 감울건조기간이라 한다. 열전도에 의한 건조는 열매체에 의해 가열된 가열면상에 직접 피건조물을 올려놓음으로써 열전도에 의해 건조하는 방법을 말한다. 열전도에 의한 건조에서 정지층에서의 건조속도는 항울건조기간중에는 다음 식으로 나타낸다.

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

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

감울건조기간은 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$R_D = \frac{\lambda(t_s - t_w) + \frac{X}{(\ell - x)}(t_b - t_w)}{H_{fg}} \quad (2)$$

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

건조능력을 높이기 위해 재료 표면에 공기를 보내 재료 표면에서 물질이동 계수의 증대를 피하거나 열매체의 온도를 올려  $\Delta t$ 를 크게 하거나 또 재료층을 얇게 함으로서  $k(1/h_i + l_i/\lambda_i + \ell/\lambda)$ 의 증대를 피함과 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 건조관에서는 무게 센서에 의한 건조시료의 무게 변동을 측정 하는데, 임의 시각에서 건조시료 시료의 무게를  $W_T$ , 시

료표피, 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 함수율을 갖는 건조시간이 존재한다.

Fig. 2는 상부 건조판상에 2,500gr의 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 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., 가열수온도 80°C 에서의 무게 변화를 나타내고 있으며, 항울건조기간은 ■, 감울건조기간은 □ 기호로 나타내었다.  $\omega$ 는 함수율을 나타내며 생체의 경우 최적 보관 함수율이 15%임을 감안하면 약 16 시간 경과후 건조가 종료됨을 알 수 있다.

#### 3.3 저온진공건조시의 열프릭스 변동

농산물 건조용 저온진공건조기를 실제로 실용화하기 위하여서는 건조관 단위면적당의 전열량을 알아야 한다. 앞에서 전술한 바와 같이 무게  $W$ 가 계측되고, 이로부터 시간의 경과에 대한 무게 감소율 즉  $\Delta W / \Delta t$ 가 구하여지면, 건조관 단위면적당의 무게 감소율과 단위면적당의 전열량 즉 저온진공건조에 관한 구체적인 열프릭스의 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  $0.55m^2$ 이다. Fig. 3에서 보는바와 같이 식(6)을 이용하여 실험한 결과, 항울건조기간 동안의 단위면적당의 열프럭스는 일정한 값이 되며, 감울건조기간에 대하여는 역시 지수함수로서 표현됨을 예측할 수 있다.

본 실험범위에서는 항울건조기간 약 11시간동안 약  $200kcal/m^2hr$ 이 거의 일정한 열흐름을 보였으며, 이후 감울건조기간에서는 열흐름이 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

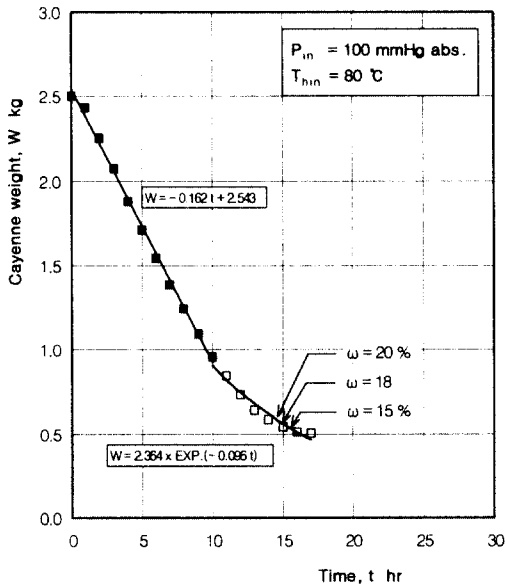


Fig. 2 Cayenne weight variation

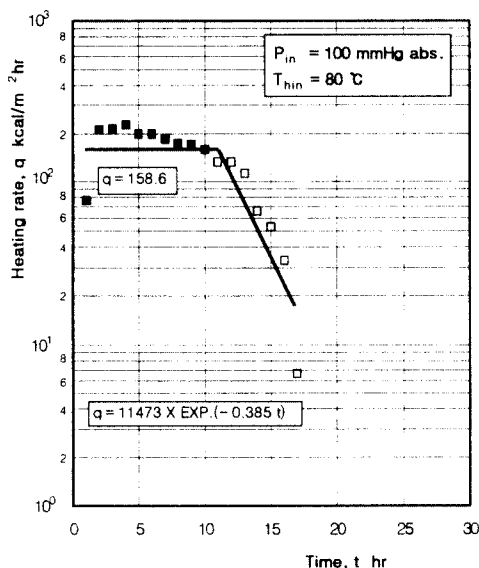


Fig. 3 Heat flux variation

### 3.4 비등곡선

벽면 과열도  $\Delta T_s$ 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,  $h$  ( $kcal/m^2hr^\circ C$ )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 약  $25^\circ C$ 를 나타내었으며, 감울건조기간에는 거의 약간의 열흐름만이 진행된다는 것을 알 수 있다.

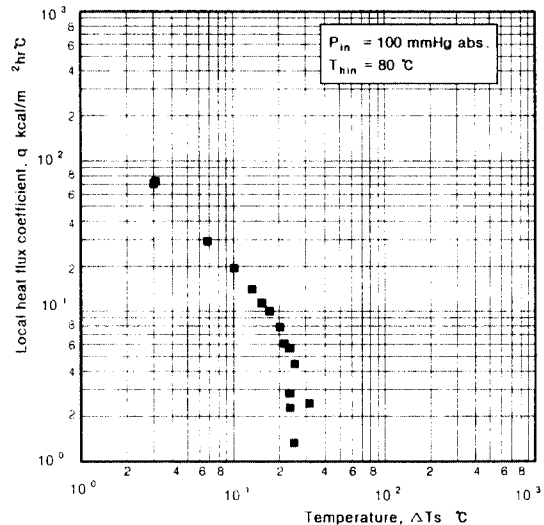


Fig. 4 Boiling curve

### 3.5 진공건조 특성곡선

건조분야에서는 함수율  $\omega(\%)$ 와 건조판 단위면적당의 건조율  $kgH_2O/m^2hr$ 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.

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

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 역순으로 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.

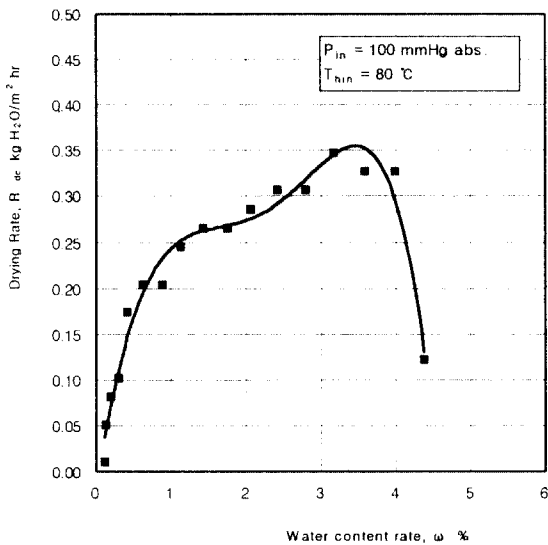


Fig. 5 Vacuum drying characteristic curve

### 3.6 가열수 입구온도의 영향 평가

저온진공건조의 피건조물에 관하여 가열수의 온도가 진공건조의 열적 특성에 미치는 영향에 관하여 중점적으로 연구하였다.

Fig. 6은 진공압력이 100mmHg abs.로서 일정하고, 가열수의 온도를 80, 75, 70°C로 하였을 경우 무게감소율 즉 수분의 증발율을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 가열수 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. 본 실험범위에서는 가열수 온도가 80°C에서 항율건조기간은 약 11시간, 75°C에서 14시간, 70°C에서 16시간이 소요되었으며, 무게감소율은 약 0.17, 0.15, 0.10kg/hr로 나타났다.

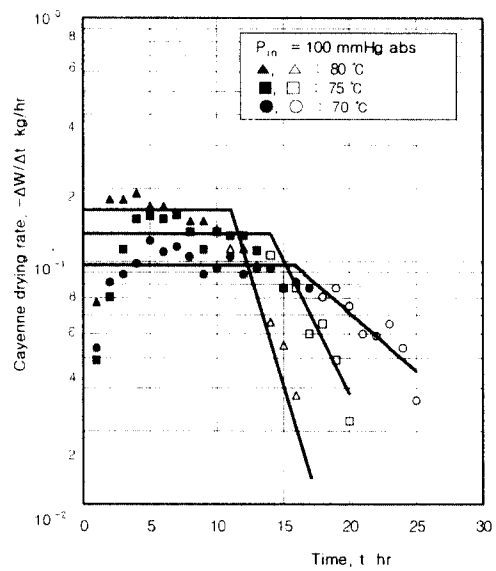


Fig. 6 Effect of hot water temperature on heat flux variation

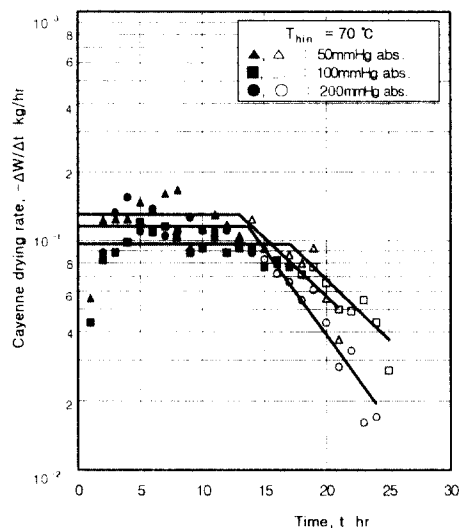


Fig. 7 Effect of vacuum pressure on reducing rate of weight

### 3.7 진공도의 영향 평가

Fig. 7은 가열수 입구온도를 70℃로 일정히 유지하고 진공압력을 50, 100, 200mmHg abs. 로 변화시켜가면서 시간에 대한 무게 감소율 즉, 수분의 증발 속도에 대한 진공압력의 영향을 평가한 것이다. 앞 절의 가열수 온도의 영향보다는 다소작지만, 역시 진공압력이 낮을수록 항울건조기간 및 감울건조기간 동안의 무게 감소율이 큼을 확인할 수 있다. 본 실험 범위에서는 진공압력의 차가 그리 크지 않기 때문에 건조속도는 큰 차이를 나타내지 않았다. 그림으로부터 건조속도는 진공압력이 낮을수록 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 전압  $P$ 가 감소할수록  $P/(P-P_0)$ 가 커져서 확산 질량유속이 증가하기 때문이다. 즉, 전압  $P$ 가 감소할수록 수분이동에 대한 확산 저항이 감소하기 때문에 건조속도가 증가하게 된다.

### 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, 그 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 감소하는 지수형태의 식으로 각각 정량적인 실험식의 제시가 가능하였다.
- 3) 항울건조기간에서의 증발속도가 본 실험의 범위 내에서는 진공압력이 높을수록 그리고 가열수의 온도가 높을수록 증가하였으며, 감울건조기간 동안의 증발속도도 동일한 양상을 보였다.

### 참고문헌

1. 김경근, 최순열, 문수범 등 “저온진공건조기를 이용한 고추의 열적특성에 관한 연구,” 공기조

- 화 냉동공학회 학술강연회논문집, pp. 410~414, 1999. 6. 25
2. 김경근, 최순열, 문수범 등 “가열/진공증발 교호열조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(1차년도 연구보고서),” 산업자원부산업기반기술과제, 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, “乾燥裝置,” 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
11. 박형진, “함수다공질층의 진공건조에 관한 연구,” 한국해양대학교 기계공학과 석사학위논문, 1997. 2