

고품질 수산 건제품의 건조열전달에 관한 연구

문수범¹ · 김경석[†] · 이춘화² · 김경근³ · 오철³ · 배창원⁴

(원고접수일 : 2010년 4월 4일, 원고수정일 : 2010년 4월 26일, 심사완료일 : 2010년 5월 13일)

A Study on the Drying Heat Transfer for the High Quality Product of the Dried Sea Foods

Soo-Beom Mun¹ · Kyong-Suk Kim[†] · Choon-Wha Lee² · Kyung-Kun Kim³ ·
Chul Oh³ · Chang-Won Bae⁴

요약 : 우리나라의 수산 양식과 어로기술은 세계적 수준임에도 불구하고, 가공기술은 상대적으로 낙후되어 있다. 수산가공품은 냉동품, 통조림, 염장식품(젓갈), 연제품(어묵) 등이 대부분으로, 특히 부가가치가 가장 높은 고품질의 수산 건제품은 매우 적다. 이러한 문제는 단적으로 건조기술의 부족에 기인한다고 사료된다. 본 논문은 부패하기가 쉽지만 향후 대량 생산이 계획되어 있는 고가 수산물의 고품질 건조가공이 가능하게 하기 위한 에너지 절약형 진공건조장치의 건조열전달특성에 관하여 수행한 실험적 결과를 보고한 것이다.

주제어 : 수산물, 수산 건제품, 저온진공건조, 건조열전달

Abstract: In spite of the global-class aquaculture and fishing technology of our country, the processing technologies are lags behind the other nations relatively. The processed marine products are mainly frozen foods, canned goods, salty food (fermented fish products), fish paste products (boiled fish paste), and we can see that the high-value dehydrated foods by drying are very few. 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 sea foods production.

Key words: Sea foods, Dried sea foods, Low temperature vacuum drying, Drying heat transfer

1. 서론

양식수산업의 발달에 의한 대규모 양식, 연근해 양식장의 오염 심화와 인건비의 상승으로 인하여 국내 수산 양식업은 매우 어려운 상황에 처해있다. 더욱이 값싼 중국산 제품의 대량 유입에 의하여 우리나라의 수산업은 전반적으로 매우 중대한 시련의

단계에 접어들고 있어, 새로운 고부가가치 제품의 창출과 수산물의 수출산업화가 매우 절실한 상황이다. 현재 우리나라의 수산 양식과 어로기술은 세계적 수준임에도 불구하고 가공기술은 상대적으로 낙후되어 있어, 수산가공품은 냉동품(횡갈,가공용), 통조림, 염식품(젓갈), 연제품(어묵) 등이 대부분

[†] 교신저자(한국해양수산연수원, E-mail: kskim@seaman.or.kr, Tel:051-620-5767)

1 군산대학교

2 산야

3 한국해양대학교

4 한국해양수산연수원

으로, 건조에 의한 고부가가치 건조품은 매우 적음을 알 수 있다.

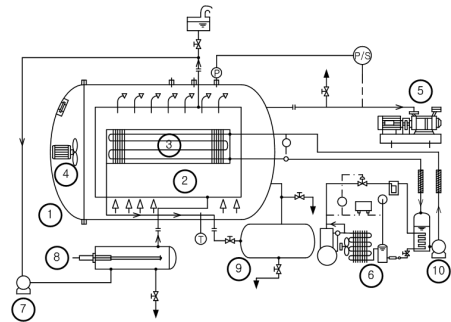
이러한 문제는 단적으로 건조기술의 부족에 기인한다고 사료된다. 우리나라는 양식기술의 발달로 잡는 어업에서 기르는 어업으로 전환하여 넙치, 다랑어, 돔, 대구 등의 고급어종을 생산하고 있다. 특히 최근에는 고가의 해삼과 전복을 양식하고 있는데[1,2], 해삼의 경우는 연간 3,000톤의 생산량을 2015년경까지 3만톤 규모로 증산하는 계획을 세우고 있다. 이와 같은 양식산업을 수출산업으로 발전시키기 위해서는 지금까지의 활어수출에서 벗어나, 고부가가치의 건제품 생산이 매우 중요하다고 사료된다. 또한 정부는 농수산물품을 수출산업으로 발전시키기 위하여 전복 익산지역에 국가식품클러스터 조성을 착수하였다[3].

식품건조에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔는데, 桐榮 等[4,5]은 일반 고체 내에서의 수분이동에 대하여 건조의 입장에서 광범위한 해석을 통하여 건조속도의 해석 및 관련 실험식을 제시하였다. 또한 점토를 이용하여 열유속 일정조건(constant heat flux condition)으로 복사가열 및 전도가열의 경우에 대하여 진공상태하에서 표면증발계수는 $kg = 4.4 \times 10^{-3} \times P^{-2/3}$ ($g/cm^2 \text{ min mmHg}$) 정도임을 제시하였다. 또한 대기압 하에서의 건조특성과 비교하여 진공건조가 고품질 건조에 최적임을 확인하고 있다. 우리나라에서 식품건조는 주로 김경근 교수의 연구실에서 저온진공건조기의 개발과 관련하여 연구되어 왔다[6]. 박 등[7]이 다공질층의 모래와 점토를 사용하여 진공건조 메카니즘을 파악하였으며, 김 등[8]과 문 등[9]은 저온진공건조기의 설계최적화를 위한 전반적 열적특성에 관하여, 최 등[10-12]은 한국의 가장 중요한 향신료에 해당하는 고추의 저온진공건조 열전달에 관하여 실험적 연구를 수행하여 최적의 가열수의 온도와 진공압력이 저온진공건조기의 성능의 양부를 결정함에 매우 중요함을 확인하고 있다.

본 논문에서는 특히 향후 정부에서 대량 양식과 고품질 건조기술에 의하여 수출산업화 대상품목인 양식 및 자연산 해삼을 중심으로 해산물의 건조열전달특성에 대한 실험적 연구결과를 기술하였다[12,13].

2. 실험장치

Figure 1은 실험장치의 전체 계통도를 나타낸다. 실험장치는 본체(low temperature vacuum drying chamber), 저온진공건조기 본체 내부를 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 온도 계측을 위한 측정계통(on-line measuring unit) 등으로 구성되어 있다. 저온진공건조기 본체①의 크기는 $900\phi \times 1200L \times 16t \text{ mm}$ 의 용기로서 내부용적은 $0.85m^3$ 이다. 저온진공건조기의 본체 내부는 건조관 10개를 투입할 수 있도록 설계되었으며, 실험중 내부의 건조상태를 관찰할 수 있는 관찰창($\phi 200mm$)을 설치하였다. 또한 본체 내부는 수봉식 진공펌프⑤를 이용하여 실험진공압($6.67 \text{ kPa abs.} \pm 2.67 \text{ kPa abs.}$)을 형성시킬 수 있으며, 약 10분 정도가 소요된다. 가열계통은 피건조물에 최소한의 열량을 공급하기 위하여 $5kW$ 전기히터⑧을 사용 설정온도에서 자동 조절되도록 하였다. 응축계통에는 저온진공건조기 본체 내부에 비체적이 매우 큰 습증기를 응축시키기 위하여 응축기(condenser) 2개 ③과 간접식 냉각장치④를 본체 내부에 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. p.

Figure 1: Schematic diagram of exp. apparatus.



Photo. 1: Experimental apparatus.

본 실험장치의 각부 온도측정은 K-Type 열전대 (C-A thermocouple)를 사용하였다. 저온진공건조기 본체 내부, 건조판, 피건조물 등의 온도측정을 위하여 설치된 열전대에서 얻어진 측정결과를 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, 로터리스위치를 거쳐 데이터로거(data logger)에서 측정하였으며, 용기 내에 설치된 최소누금 0.01°C 의 표준온도계(standard thermometer)의 눈금과 측정된 기전력을 기록하여 최소자승법(least regression)으로 처리하여 검정하였다.

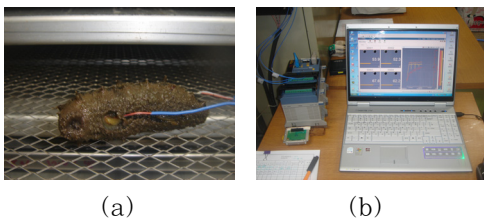


Photo. 2: Present data acquisition computer system.

Photo. 2는 열전대를 피건조물에 삽입한 상태 및 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 가열증발부(heating box)의 표면과 중간단의 공간 중심부에 열전대를

부착하여 건조실험기간 중 연속으로 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 그래픽 처리된다.

건조는 일반적으로 피건조물의 예열기간, 항을 건조기간(constant-rate drying period), 감율 건조기간(falling-rate drying period)으로 구분된다. 피건조물의 예열기간은 투입된 재료가 습구 온도까지 상승하는 구간이며 시간적으로 비교적 짧고 이 동안의 수분변화는 적다. 항을 건조기간은 주위로부터 전열속도와 재료표면으로부터의 증발속도가 조화된 동적 평형을 이루는 시기이며, 이 기간 중의 건조속도는 일정하게 된다. 또한 항을 건조기간이 종료하는 시점의 함수율은 한계함수율이라 하지만 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 확산 계수를 구해야 할 뿐만 아니라 상당히 복잡한 계산이 요구되기 때문에 오히려 실험결과에 따르는 것이 더 간편하고 정확하다. 한계함수율과는 별도로 피건조물 특유의 수분보유 상태를 나타낸 것으로 평형 함수율이 있다. 피건조물은 외부조건, 온도, 습도가 정해지면 그에 대응하는 일정한 함수율로 평형을 유지한다. 건조 대상으로 하고 있는 재료를 극히 저수분까지 건조해야만 하는 경우에는 평형 함수율을 내리기 위해 열원의 온도를 올리든가 혹은 건조기 내부의 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 건조 소요 동력 및 소모전력

Figure 2는 본 연구를 통하여 개발한 해삼 전용의 에너지 절약형 저온진공건조장치를 이용하여, 소요동력 및 전력량을 측정된 결과들을 나타낸다.

소요전력량은 기본적으로 건조기의 종합적인 열효율과 1회의 투입량에 따라서 결정된다. 사용 전력량은 매 2시간마다 저온진공건조장치를 일시 정지하여 약 15분 동안 개방하고 필요한 측정을 수행한 후 재가동하는 방법으로 실시하였다. 이들 그림에서 알 수 있는 바와 같이 건조초기에는 피건조물이 갖는 초기의 열에너지와 각 요소장치의 기동 및 활발한 건조로 인하여 최대전력이 4~6kW 정도로 최대치를 보이며, 약 4시간이 경과하면 평균적으로 3 kW 전후의 평균 소요동력이 소비됨을 알 수 있다. 또한 건조 완료시까지의 사용전력량은 10% 전후의 부분 부하시 약 70~80 kWh 정도임을 알 수 있다.

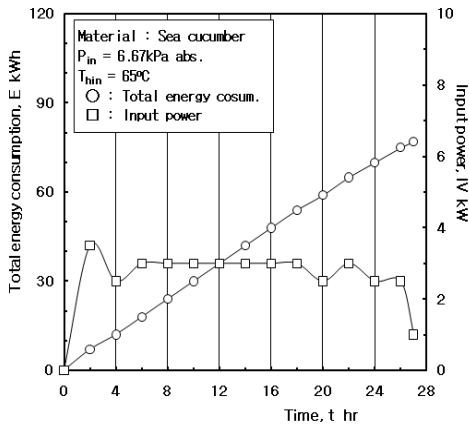


Figure 2: Analysis of total energy consumption & power for vacuum drying of Korean sea cucumber.

3.2 시간경과에 따른 무게 변동

건조시료인 해삼을 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 가열수 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 건조시료 해삼의 무게를 W_T 라고 하고 건해삼의 무게 합계를 W_c , 수분의 무게를 W_h 라고 하면, 다음 식의 관계가 성립한다.

$$W_T = W_c + W_h \tag{1}$$

위 식에서 건해삼의 무게 W_c 는 불변이므로, 시간 t 가 경과하면 수분이 증발하므로 수분량 W_h 는 적어진다. 전체 해삼의 무게 중에 수분이 차지하는 무게의 비율을 함수율 ω 라고 하며, 이는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\omega = \frac{W_h}{W_T} = \frac{W_h}{W_c + W_h} \tag{2}$$

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

$$\omega_0 = \frac{W_{h0}}{W_{T0}} = \frac{W_{h0}}{W_c + W_{h0}} \tag{3}$$

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

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

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

일반적으로 생체를 저온진공건조하면 초기에는 건조가 매우 활발히 일어나는 항을 건조기간을 거쳐 건조가 서서히 일어나는 감율 건조기간에 진입한다. 다음으로 최적의 장기보관 또는 식품이 최고상태의 맛을 보존하기 위한 최적의 함수율 ω_{ST} 를 갖는 최적의 건조시간이 존재한다. 실험결과의 데이터 처리에 있어서는 수차례의 검토를 통하여, Figure 3에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 비해

하여 선형적으로 해삼의 무게가 감소하는 소위 항을 건조기간과 시간의 경과에 대하여 무게 감소율이 완만하여지는 감율 건조기간이 나타나는 것을 알 수 있었다.

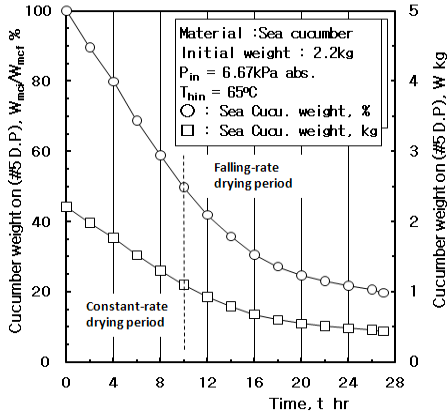


Figure 3: Weight variation of sea cucumber to vacuum drying time.

이 그림에서 보는 바와 같이, 건조개시 후 약 10 시간 정도의 항을 건조기간에는 피건조물 전체가 함수율이 매우 높으므로 표면 근처의 수분이 활발히 증발함으로써 시간이 경과함에 따라 거의 직선적으로 무게가 감소함을 알 수 있으며, 이 시간이 지나 감율 건조기간에 돌입하면 내부의 수분이 피건조물 표면으로 이동되는 시간이 점차 지연되므로 지수적으로 무게가 감소하여 완전 건조상태에 도달함을 알 수 있었다. 실험을 통하여 진공도가 낮을수록 가열수의 온도가 높을수록 항을 건조시간과 감율 건조시간이 짧아짐을 확인할 수 있었으며, 항을 건조시간은 9~13시간 정도, 그리고 감율 건조시간은 약 10시간이 소요됨을 알 수 있었다.

3.3 함수율의 변동

Figure 4는 생해삼의 배를 약 1cm 절개하여 내장을 제거한 다음, 뜨거운 물에 삶은 해삼을 No.5 건조판에 가득 채우고 건조하여 얻은 실험 결과를 보여준다. 실험은 건조를 개시한 후 매 2시간마다 무게변동을 측정하고, 마지막 무게와 함수율을 측정한 결과로부터 역산하여 각 시각에서의 함수율

을 계산하였다. 앞 절에서 설명한 함수율 정의의 식(3.3)으로부터 실험종료 시점의 함수율을 함수율 측정기로 측정하여 건무게를 계산한 다음 각 시각에서의 함수율을 계산하였다. 실험초기 함수율은 삶은 해삼의 경우 약 80~85%, 실험종료 함수율은 약 5% 전후를 나타내었다.

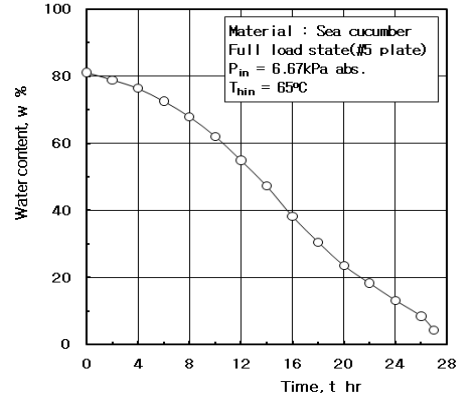


Figure 4: Variation of water contents rate according to the drying time.

그림에서 보는 바와 같이, 함수율이 매우 높은 건조초기에는 함수율의 감소속도가 완만하다가, 약 8시간이 경과하면 급격히 함수율의 감소속도가 빠르게 됨을 알 수 있다. 이는 후술하는 국소열전달율의 변화와 매우 깊은 관계가 있음을 의미한다.

본 실험에서는 장기보관 및 식품의 상태 보존을 위한 최적 함수율 약 5% 전후로 실험을 수행하였으며, 건조 종료시의 함수율은 수율 등에도 밀접히 관계되므로 건조에 있어서 건조종료시점의 함수율은 매우 중요하다고 할 수 있다.

3.4 무게 감소율의 변동

항을 건조기간에는 피건조물의 무게가 시간경과와 함께 직선적으로 감소하므로, Figure 5에 나타난 바와 같이, 항을 건조기간 동안의 해삼의 무게는 일반적으로 다음 식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$W_T = -a_1 t + b \quad (3.6)$$

또한 감율 건조기간에 대해서는 해삼의 총 무게

가 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 t에 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 그래프에서는 항을 건조기간과 감을 건조기간이 보다 명확하여짐을 우선 알 수 있으며, 실험치와 상관식은 전 영역에 걸쳐서 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

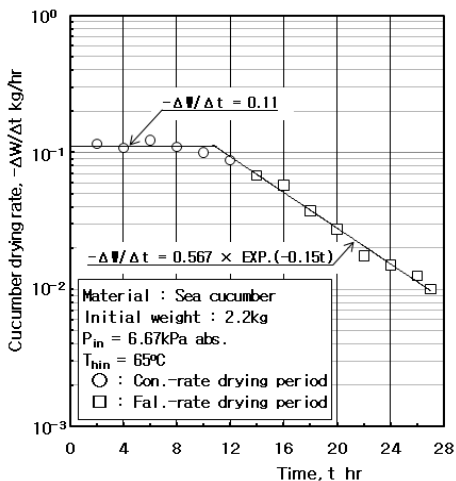


Figure 5: Variation of weight reducing rate of sea cucumber on the No. 5 plate.

Figure 5는 항을 건조기간 동안의 무게 감소율을 나타내는 식 (8)과 감을 건조기간 동안의 무게 감소율을 나타내는 식 (9)을 이용하여 실험 데이터로부터 감소율을 구한 결과를 보여준다. 그림으로부터 알 수 있듯이 항을 건조기간에는 건조판 1-판당 약 0.11kg/hr의 속도로 수분이 증발하며, 항을 건조기간 동안의 값으로부터 건조가 진행됨에 따라 지속적으로 감소하여 최소 0.01kg/hr까지 감소하여 최종적인 건조에 도달함을 알 수 있다.

3.5 열 프럭스의 변동

해삼 건조용 저온진공건조기를 실제로 설계, 실용화하기 위해서는 우선 건조판 단위면적당의 전열량을 예측해야만 한다. 앞 절에서 전술한 바와 같이 무게 W가 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 프럭스의 변동을 구할 수 있다.

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

여기서 H_{fg} 는 수분의 증발잠열을, 그리고 A는 건조판의 면적을 나타낸다. 그러므로 식 (10)을 이용하여, Figure 6과 같이 정리할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 항을 건조기간 동안의 단위면적당의 열 프럭스는 거의 일정한 값이 되며, 감을 건조기간에 대하여는 역시 지수적으로 감소함을 알 수 있다.

Figure 6은 Figure 5의 무게감소율 데이터를 이용하여, 실험 시간의 경과에 따른 열 프럭스 변동을 그래프로 도시한 것이다. 항을 건조기간, 즉 건조 개시 후 약 10시간 건조가 매우 활발히 진행되는 동안에는 약 750kJ/m² hr의 열 프럭스를 가짐을 알 수 있다. 여기서 전열면적은 가상적인 전열면적으로서, 물질전달이 일어나는 해삼의 표면적이 아니고 건조판의 넓이임을 밝혀둔다. 감을 건조기간 동안에는 수분의 증발율이 점차 감소하므로 열 프럭스도 이에 비례하여 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

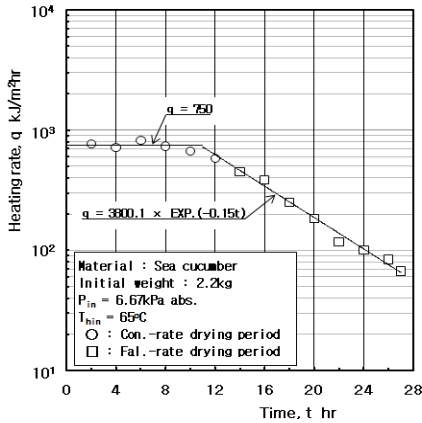


Figure 6: Variation of heat flux of vacuum drying of sea cucumber on the No. 5 plate.

3.6 비등곡선

증발현상을 가장 잘 나타낼 수 있는 그래프가 비등곡선으로서, 단위면적당의 열 플럭스와 벽면 과열도(wall superheat)와의 관계를 정리하여 비등곡선을 나타낼 수 있다. 실험적으로는 전술한 식 (10)을 이용하여 먼저 열플럭스를 구한다. 또한 벽면 과열도 ΔT_s 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta T_s = T_w - T_s \tag{11}$$

여기에서 T_w 는 실험에서 측정된 해삼의 표면온도를 나타내는데, 이 값은 미세열전대를 주사기 바늘에 삽입하여, 측정하고자 하는 반대측 해삼의 표피로부터 삽입하여 얇은 외표면 부근의 온도를 해삼의 표면온도로 간주하였다. 또한 T_s 는 해당 진공압력 상태에서의 포화온도이다. Figure 7은 이와 같이 하여 계산한 비등곡선을 나타내는데, 해삼의 경우 항을 건조기간 동안의 최대 열 플럭스는 약 $840 kJ/m^2 hr$ 정도이며, 벽면 과열도(Wall superheat)가 $10^\circ C$ 이하가 되면서 열 플럭스가 급격히 감소하면서 감을 건조기간에 돌입함을 알 수 있다.

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

$$h = \frac{q}{\Delta T_s} \tag{3.12}$$

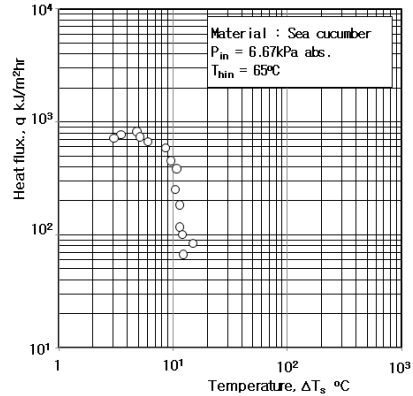


Figure 7: Boiling curve of vacuum drying sea cucumber.

3.8 건조 진행도에 따른 피건조물의 온도 변동

Figure 8은 가열판(Δ), 건조기 내부공간(\diamond), 해삼의 표면(\circ)과 피건조물인 해삼내의 중심부공간(\square)에서 측정된 온도변화를 2시간 간격으로 나타내었다. Figure 8은 전형적인 온도변화곡선으로서, 건조개시 후 약 2시간이 경과하면 포화온도에 근접하는 온도상승이 완료됨과 동시에 본격적인 증발이 시작되며, 건조시작 후 8~9시간이 경과되면 대부분의 수분이 증발하게 된다. 이 영역 즉, 항을 건조기간 동안의 해삼의 온도는 속, 표면의 온도가 거의 일정한 약 $35\sim 40^\circ C$ 의 온도로 건조됨을 알 수 있으며, 이는 진공건조 특성상 진공압력에서의 수분의 증발 온도가 낮기 때문이며, 특히 생체 건조의 경우 중요한 요소이다. 또한 시간이 더욱 경과됨과 함께 해삼 내부의 온도가 표면온도와 근접하여 가면서 건조가 완성되어 감을 알 수 있으며, 건조가 거의 완료되는 시점에서는 해삼의 온도와 건조기 내부 온도가 같아짐을 알 수 있는데, 이는 해삼에서 증발되는 수분의 양이 적어짐으로서 온도가 상승하게 된다.

실험범위 전 영역에서 거의 일정한 양상의 온도 특성을 나타내었는데 해삼 내부 및 중심부 공간의 온도차는 생해삼 자체의 두께 차이, 해삼 전처리

과정에 있어서 삶은 해삼의 삶기 정도의 차이에 의한 해삼육의 무게 차이 등으로 인해 약간의 오차는 발생 할 수 있음을 고려해야 한다.

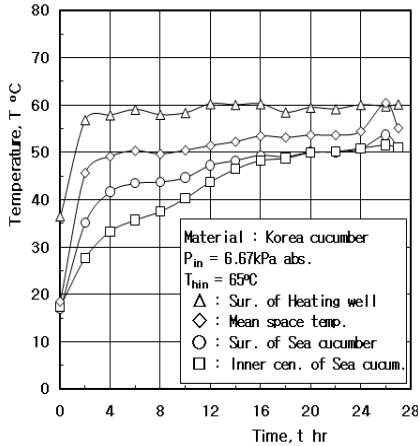


Figure 8: Temperature variation during vacuum drying of sea cucumber.

4. 실험결과의 고찰

4.1 가열수 입구온도의 영향

저온진공건조의 피건조물인 해삼에 관하여 특히 가열수의 온도와 진공압력이 진공건조의 열적 특성에 미치는 영향에 관하여 실험하였다.

Figure 9는 진공압력이 26.66kPa abs.(± 2.67 kPa abs.)으로 일정하고, 가열수의 온도를 80, 75, 70°C로 하였을 경우 무게 변동을 나타낸 것이다. 그림 중 하얗게 칠한 것은 항울 건조기간이며, 검게 나타낸 데이터는 감울 건조기간을 나타낸다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이, 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. Figure 10은 건조판 단위면적당의 전열량 즉 열프럭스에 가열수의 온도 영향을 나타낸 것이다. 본 연구에서와 같은 생체의 건조에서는 영양가, 맛, 색깔을 손상시키지 않는 범위 내에서 건조가 이루어져야 한다는 점에 유의할 필요가 있다.

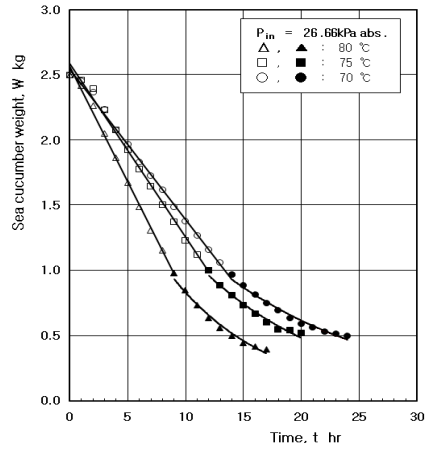


Figure 9: Effect of hot water temperature to sea cucumber weight variation.

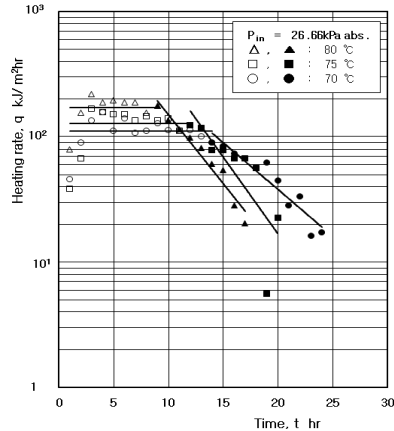


Figure 10: Effect of hot water temperature on heat flux variation.

4.2 진공도의 영향

Figure 11은 저온진공건조를 하는 경우 진공압력이 건조에 미치는 영향을 평가한 결과들을 나타낸다. 먼저 Figure 11은, 가열수의 온도를 75°C로 일정하게 하고, 변수로서 진공압력을 6.67, 13.33, 26.66kPa abs.로 하여 시간의 경과에 따른 무게 변동을 정리한 것이다. 비교적 진공압력이 높을수록 무게 감소율이 증대함을 알 수 있다. Figure 12는 가열판 단위면적당의 열 프럭스에 대한 진공압력의 영향을 대수그래프로 나타내었다. 온도의 변화시에는 열흐름의 변화가 많았는데, 압

력의 변화시에는 열흐름이 적었다. 이것은 압력차가 있을 때보다도 온도차이가 있을 때 무게 감소율이 많기 때문이다.

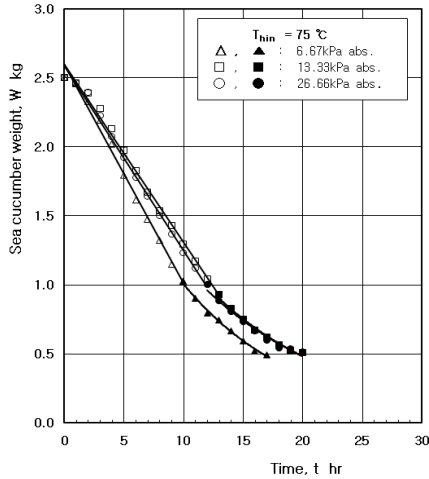


Figure 11: Effect of vacuum pressure on sea cucumber weight variation.

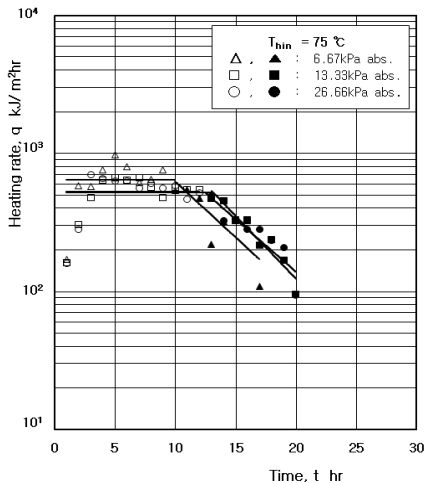


Figure 12: Effect of vacuum pressure on heat flux variation.

본 실험의 범위 내에서는 저온진공건조에 있어서 진공압력의 영향은 가열수 온도의 영향보다 건조속도에 미치는 영향이 적음을 정량적으로 확인할 수 있었다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 건조속도는 진공도가 클수록 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

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

(1) 소요전력 및 전력량을 측정된 결과 건조초기에는 피건조물이 갖는 초기의 열에너지와 각 요소 장치의 기동 및 활발한 건조로 인하여 최대전력이 4~6kW였으며, 평균 3kW 전후의 평균동력으로 운전되었는데, 이는 타 건조기에 비해 매우 에너지 절약적임을 확인할 수 있었다.

(2) 해삼의 저온진공건조의 경우 전형적인 항울 건조기간과 감율 건조기간이 확연히 존재함을 확인할 수 있었으며, 항울건조기간 동안의 무게 변화는 경과시간에 대한 1차식으로, 감율건조기간 동안에 대하여는 경과시간에 대하여 점진적으로 무게가 감소하는 지수형태의 식으로 실험결과를 정리할 수 있었다.

(3) 본 실험의 범위에서 항울 건조기간 동안의 무게 감소율은 건조판 1-판당 0.11kg/hr 정도로 거의 일정한 속도로 수분이 증발하며, 감율 건조기간에는 항울 건조기간의 값으로부터 건조가 진행됨에 따라서 지속적으로 감소하여 최소 0.01 kg/hr까지 감소하여 최종적인 건조에 도달함을 알 수 있었다.

(4) 건조 개시 후 약 10시간 즉 항울건조기간에서의 건조판 단위 면적당의 전열량은 700kJ/m²hr의 열 프릭스를 가짐을 알 수 있었으며, 감율 건조기간 동안에는 수분의 증발율이 점차 감소하므로 열 프릭스도 이에 비례하여 지수적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

(5) 단위면적당의 열 프릭스와 벽면 과열도와와의 관계를 정리하여 비등곡선을 나타낼 수 있는데 최대 열 프릭스는 약 800kJ/m²hr정도이며, 벽면 과열도가 10°C 이하로 되어 열 프릭스가 급격히 감소하면서 감율 건조기간에 돌입함을 알 수 있었다.

(6) 온도변화 곡선에서는 건조개시 후 약 2시간이 경과하면 온도상승이 완료되며, 활발한 증발이 8~10시간 진행되면 대부분의 수분이 증발되고, 이어서 해삼 내부의 온도가 표면온도와 근접하여 가면서 건조가 완성되어 감을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 농림수산식품부 산하 한국해양기술진흥원의 연구비 지원에 의하여 수행되고 있음(과제명: “수산건제품의 품질향상을 위한 생산지 적용형 개량 건조시스템 기술 개발”)을 밝히며, 이에 심심한 고마움을 표하는 바입니다.

참고문헌

[1] 국립수산물품질관리원 서해수산연구소, 해삼양식 기술개발, 2006.

[2] 신우철, 전북양식산업의 미래전략, 목포해양수산청, 2008.

[3] 농촌경제연구소, 국가 식품클러스터 조성 기본계획, 2008.

[4] 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.

[5] 桐榮, 林信也, 澤田周三, “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, 1965.

[6] 김경근, “농수산물의 저온건조 건조 열적특성”, 대한기계학회 추계 학술논문집 특강자료, pp. 1-6, 1999.

[7] 박형진, 김경근, 김명환, “함수 다공질층의 건조공건조에 관한 실험적 연구(I)”, 한국박용기관학회지, 제20권, 제5호, pp. 514-521, 1996.

[8] 김경근, 최순열, “가열수 온도에 의한 저온건조 건조 열적 특성에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 제25권 제3호, pp. 35-42, 2001.

[9] 문수범, 최순열, 정한식, 김경근, “생체 건조용 대형 저온건조 건조기의 열적 특성에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 제24권 제4호, pp. 35-42, 2000.

[10] 최순열, 저온건조 건조기의 열적특성에 관한 연구, 한국해양대학교 기관공학과 박사학위논문 1999.

[11] 김경근, 최순열, 최두열, 이정혜, 문수범, “저온건조 건조기를 이용한 고추의 열적특성에 관한 연구”, 공기조화 냉동공조학회 학술논문집, pp. 410-414, 1999.

[12] 김경근, 문수범, 이춘화 등, 해삼의 상온상태

에서의 에너지 절약적인 진공건조장치 개발, 농림수산식품부, 한국해양기술진흥원, 2009.

[13] 김경석, 문수범, 이춘화 등, 수산 건제품의 품질향상을 위한 생산지 적용형 개량 건조시스템 기술 개발, 농림수산식품부, 한국해양기술진흥원, 2011.

저 자 소 개



문수범(文首範)

1998년 군산대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2000년 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 수료(공학석사), 2010년 한국해양대학교 기관시스템공학과 수료(공학박사), 현재 군산대학교 실습선 2기사



김경석(金京錫)

1978년 한국해양대학교 졸업, 공학박사, 현재 한국해양수산연수원 교육연구처 교수, 관심분야는 선박안전설비, 저온건조 건조, IMO에 의한 해사 관련 국제협약 등임.



김경근(金京根)

1974년 한국해양대학교 졸업, 공학박사, 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수, 관심분야는 이젝터를 이용한 해양조선 및 육상플랜트설비, LNG 선박의 열설계, 저온건조 건조 등임.



오철(吳喆)

1958년생, 1983년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사), 1998년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수.



배창원(배창원)

1960년 10월생, 1983년 2월 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1997년 2월 한국해양대학교 대학원 재료공학과 수료(공학석사), 2003년 2월 한국해양대학교 대학원 재료공학과 수료(공학박사), 1994년 ~ 현재 한국해양수산연수원 교수