

수산물의 저온진공건조 열적 특성에 관한 연구

- 해삼을 중심으로 -

A Study on the Thermal Characteristics of Aquatic Products by Low Temperature Vacuum Drying

- Especially on the Sea Cucumber -

최순열 · 김민수

S. Y. Choe · M.S. Kim

(접수일 : 2011년 02월 02일, 수정일 : 2011년 05월 17일, 채택일 : 2011년 05월 23일)

Key Words : Water Content(함수율), Low temperature vacuum Drying(저온진공건조), Falling-rate Drying(감율건조), Constant-rate Drying(항율건조)

Abstract : Low temperature vacuum drying technique, whose drying time and quantity of exhausting energy is about 25~30% of hot air drying, is very excellent in the drying efficiency.

This paper is made out in the aspects of heat engineering with the object of developing Korean drying machine which can dry once a large quantity of objects to be dried in the state of low temperature and vacuum. As the results, it took about 17 hours(3~4 days in case of hot air drying) for material to reach about 18% of the final moisture content in order to store products for a long time, from about 78~80% of the early moisture content at the beginning of drying, and maximum drying rate comes to about 0.35 kg/m2hr at about 400% of the moisture content.

1. 서 론

지금까지 알려진 물질 중에서 대략 6만여 가지의 물질은 인류의 생활에 이용되어 지는데^{1,6)} 그러기 위해서는 제조 및 가공하여 공급되어야 하며 대부분 건조라는 과정을 거친다는 것을 문헌을 통하여 알 수 있다. 건조대상 물질의 종류가 많음으로 이에 대한 다양한 건조기 및 건조방법이 개발되고 있으며 산업전반에서 활용되고 있다. 건조는 열전달을 이용하여 물체에 열을 공급하고, 공급된 열에 의해 대상 물질에서 수분을 기화 증발시킨 다음, 대기속으로 확산시켜 수분을 제거하는 조작이다. 이는 열과 물질의 이동이 동시에 진행되는 열적인 분리법이다.^{1~5)}

현재까지 개발되어 보급되고 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 수분에 의해 습도가 높아져 열풍을 배기해야 하므로 다량의 열에너지가 밖으로 버려지게 되므로 건조장치에서 좋은 열효율은 기대할 수 없는 단점이 있다. 그 외에 적외선 건조방식, 마이크로파 건조방식 그리고 진동에너지를 기계적으로 이용하는 초음파 건조방식은 비교적 저온에서 건조하는 이점이 있어 열에 민감한 재료나 의약품건조에 이용되어 지기도 하나 대량건조에는 아직 미흡하다. 적외선 건조방법은 열복사에 의해 재료를 가열하고 건조하는 방법으로 두께가 얇은 재료의 건조에 주로 이용되어지나 열효율은 낮은 편이다. 동결건조는 냉동기를 가동하여야 하므로 에너지 비용이 많다. 여러 건조 방법 중에서 진공건조는 재료의 수분 함유량의 조절이 간편하며 재료의 건조온도가 낮아서 열변형이 없다. 그리고 건조중 산소농도가 아주 낮아서 건조과정중에 일어 날 수 있

최순열(교신저자): 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템공학
E-mail : sychoe@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-1844
김민수 : 전북대학교 공학대학 기계설계공학부

는 재료의 부패와 변질을 방지 할 수 있다. 열풍건조기보다 건조시간도 비교적 짧아서 매우 좋은 건조법이며 건조 후 좋은 제품을 얻을 수 있는 신기술 건조법으로, 이러한 건조기술개발은 공학적 측면에서도 중요한 연구 대상이다.^{6~10)}

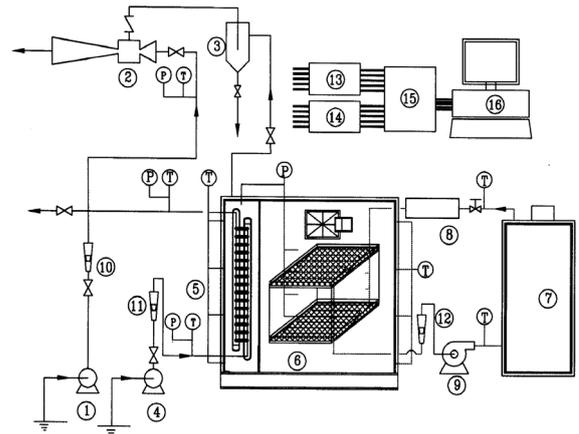
이러한 관점에서, 본 연구에서는 수산물을 연구 대상으로 하여, 최상의 품질을 고속으로 건조할 수 있는 고성능 저온진공건조기를 실용화 할 목적으로, 설계 및 기술개발에 필요한 제반 열공학적 특성을 파악하는데 본 연구의 목적을 두었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 이용되어진 실험장치의 전체 계통도를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 실험장치는 크게 나누어 건조할 시료를 투입하여 건조하기 위한 진공용기계통, 진공용기 내부를 소정의 진공압력으로 유지하기 위한 진공추기계통, 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 1.502m³이다. 원통의 진공용기 내부에는 무게 측정기, 대류를 형성시키기 위한 팬 2대를 설치했다. 응축계통은 해수를 이용하여 시료로부터 증발하는 저압 상태의 증기를 응축시키기 위한 ⑤응축기를 설치하였다. 진공추기계통은 물로 구동 되는 ②기체흡입 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 ⑦가정용 온수보일러이며, 진공건조실험에서 가열온도가 시료의 열적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 공급되는 온수관의 중간에 ⑧전기 가열기(2kW×3개)를 설치하였고 정온도 조절 가열장치를 전기가열기에 연결하여 작동할 수 있도록 하였다. 각부의 온도 및 압력, 차압 및 시료의 무게 변화 등을 ⑮데이터 집록장치에 의하여 1초 이상의 임의 설정 가능한 실시간 간격으로 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 ⑯Personal Computer

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 실험방법

기초실험은 Fig. 1과 유사한 실험장치를 이용하여, 진공상태하에서 재료의 열 및 물질전달에 관한 기초 자료를 수집하기 위하여 다양한 종류의 농수산물을 시료로서 실험하였으며, 본 실험에서는 기초실험을 바탕으로 해삼의 건조특성에 관해 실험을 실시하였다. 용기내의 진공압력을 6.7, 13.3 그리고 26.7kPa abs.로 3단계 변화시켜 가면서 진공도에 따른 건조 특성을 검토하였으며, 가열면의 온도가 건조 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 시료가열 온도를 40, 45 그리고 50℃로 3단계 변화시켜 가면서 실험을 하였다. 이때의 열유량, 열프릭스 변동 및 비등곡선 추이 등을 검토하였다. 실험 범위는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental condition for material

Parameter	Range
Parameter Range Dryer in side pressure(kPa abs.)	6.7, 13.3, 26.7
Heating temperature(℃)	40, 45, 50
Material	Sea cucumber

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진공건조속도 특성

진공건조실험이 시작되는 시점을 t=0 hr로 간주하여 실험이 개시되면, 가열판의 표면온도, 시료 및 그

주위 온도분포, 상부 건조판의 무게 센서에 의한 건조시료의 무게 변동을 측정하는데, 임의 시각에서 건조시료 시료의 무게를 W_T , 시료표피, 씨 및 꼭지의 무게 합계를 W_c , 수분의 무게를 W_h 라고 하면, 다음 식의 관계가 성립한다.

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

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 시료를 올려 놓은 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.

$$W_T = -a_1 t + b \quad (2)$$

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

$$W_T = a_2 e^{-k_2 t} \quad (3)$$

Fig. 2는 식(2), (3)을 이용하여 압력 13.3kPa abs.로 유지하고 재료가열온도 45°C에서의 무게 변화를 나타내고 있으며, 항울건조기간은 ▲, 감울건조기간은 △ 기호로 나타내었다. ω 는 함수율을 나타내며 생체의 경우 최적 보관 함수율이 18%임을 감안하면 약 17시간 경과 후 건조가 종료됨을 알 수 있다.

3.2 저온진공건조시의 열프럭스 변동

수산물 건조용 저온진공건조기를 실제로 실용화하기 위하여서는 건조판 단위면적당의 전열량을 알아야 한다. 앞에서 진술한 바와 같이 무게 W 가 계속되고, 이로부터 시간의 경과에 대한 무게 감소율 즉 $\Delta W_T / \Delta t$ 가 구하여지면, 건조판 단위면적당의 무게 감소율과 단위면적당의 전열량 즉 저온진공건조에 관한 구체적인 열프럭스의 변동을 구할 수 있다.

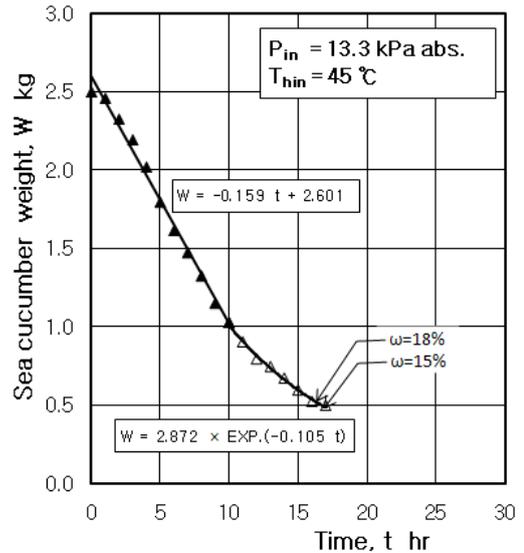


Fig. 2 Sea cucumber weight variation

$$q = \frac{1}{A} \left(-\frac{\Delta W_T}{\Delta t} \right) H_{fg} \quad (4)$$

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 같이 식(4)를 이용하여 실험한 결과, 항울건조기간 동안의 단위면적당의 열프럭스는 거의 일정한 값이 되며, 감울건조기간에 대하여는 역시 지수함수로서 표현됨을 예측할 수 있다.

본 실험범위에서는 항울건조기간 약 12시간동안 약 135kcal/m²hr의 거의 일정한 열흐름을 보였으며, 이후 감울건조기간에서는 열 흐름이 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

3.3 비등곡선

벽면 과열도 ΔT_s 는,

$$\Delta T_s = T_w - T_s \quad (5)$$

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(5)와 같이 벽면 과열도가 얻어지면 다음 식과 같이 국소열전달율, h (kcal/m²hr°C)를 구할 수 있다.

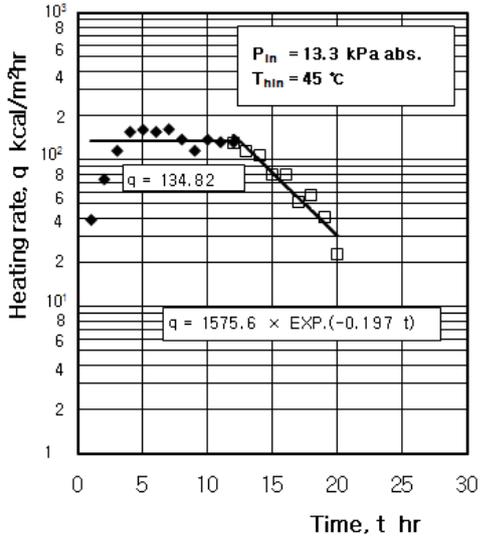


Fig. 3 Heat flux variation

$$h = \frac{q}{\Delta T_s} \quad (6)$$

Fig. 4에서는 건조초기에서 포화온도와 시료표면의 온도차가 크지 않을 때 열 흐름이 많이 있었으며, 항울건조기간이 끝나는 시점에서는 벽면 과열도가 약 25°C를 나타내었으며, 감울건조기간에는 거의 약간의 열 흐름만이 진행된다는 것을 알 수 있다.

3.4 진공건조 특성곡선

건조분야에서는 함수율 ω (%)와 건조판 단위면적당의 건조율 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{hr}$ 의 관계로서, 건조특성곡선을 나타낸다. 여기서 건조율은 다음 식과 같이 정의한다.

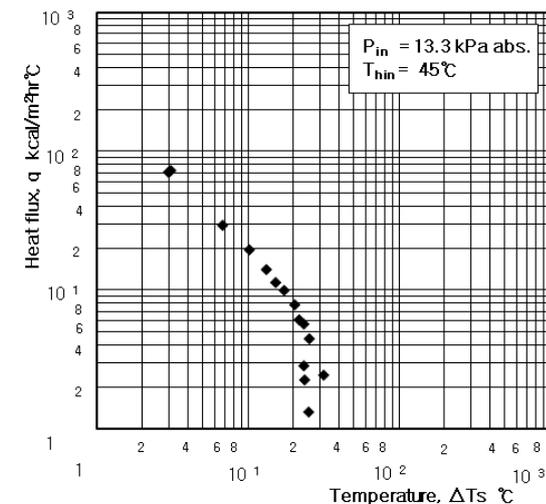


Fig. 4 Boiling curve

$$R_{dc} = \frac{q}{H_{fg}} \quad (7)$$

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

항울건조기간에서의 무게 감소율, 즉 증발율은 식(2)와 같이 표현되었으며, 감울건조기간에 대하여는 식(3)과 같이 표현되었다. 그러므로 항울건조가 끝나는 시각 즉, 감울건조가 시작되는 시각은 이 두식을 등호관계로 놓고서 그 시각을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{c,p} = -\frac{1}{k_3} \left(\ln \frac{a_1}{k_1} \right) = \frac{1}{k_3} \ln \left(\frac{k_1}{a_1} \right) \quad (8)$$

실제의 경우에는 시료를 건조하여 최고의 맛과 영양 상태를 유지하고, 장기보관을 하는 경우에는 건조과정 끝단에서의 함수율을 최적으로 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 항울건조기간에서는 거의 일정한 속도로 건조가 진행되고 있으며, 감울건조기간에서는 건조속도가 현저히 떨어지고 있다는 것을 알 수 있다.

3.5 시료가열 온도의 영향 평가

저온진공건조의 피건조물에 관하여 시료가열 온도가 진공건조의 열적 특성에 미치는 영향에 관하여 중점적으로 연구하였다. Fig. 6은 진공압력이 13.3 kPa abs.로 일정히 하고, 시료가열 온도를 50, 45, 4

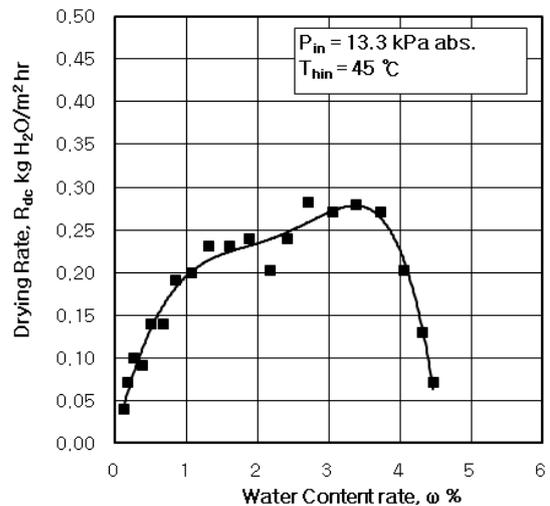


Fig. 5 Vacuum drying characteristic curve

0°C로 하였을 때 무게감소율 즉 수분의 증발율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료가열 온도가 높을수록 무게감소의 속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 시료가열 온도가 높을수록 시료의 증발 표면에서의 온도가 상승하게 되므로 확산의 구동력이 되는 시료의 증발표면과 주위와의 수증기 분압차가 크게 되기 때문이다. 본 실험범위에서는 가열 온도가 50°C에서 항울건조기간은 약 9시간, 45°C에서 12시간, 40°C에서 14시간이 소요되었으며, 무게감소율은 약 0.17, 0.15, 0.10kg/hr로 나타났다.

3.6 진공도의 영향 평가

Fig. 7은 시료가열 온도를 45°C로 일정하게 유지하고 진공건조기 내부 압력을 6.7, 13.3, 26.7kPa abs.로 변화시키면서 시간에 대한 무게감소율 즉 진공압력에 대하여 수분증발속도를 평가한 것이다. 앞에서 시료가열 온도의 영향보다는 다소작지만, 역시 진공압력이 낮을수록 항울건조기간 및 감울건조기간에 무게 감소율이 큰 것을 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 $P/(P - P_v)$ 가 커져서 확산 질량유속이 증가하기 때문이다. 즉, 전압 P 가 감소할수록 수분이동에 대한 확산 저항이 감소하기 때문에 건조속도가 증가하게 된다.

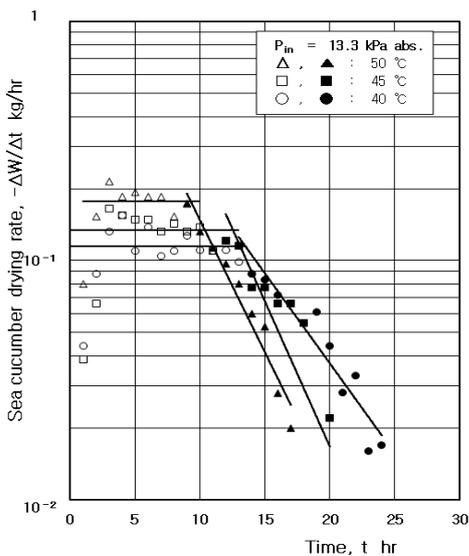


Fig. 6 Effect of hot water temperature on reducing rate of sea cucumber weight

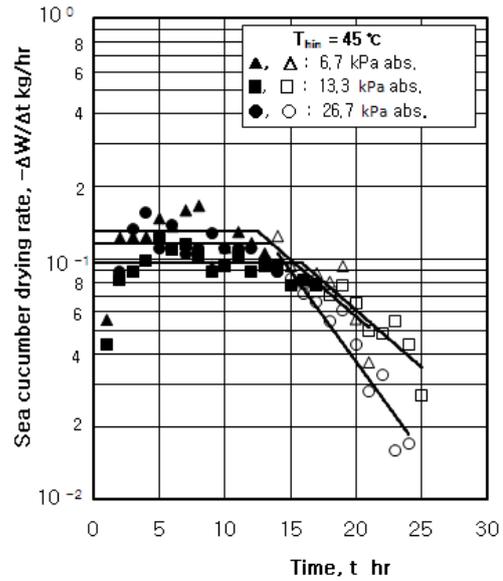


Fig. 7 Effect of vacuum pressure on reducing rate of sea cucumber weight

4. 결 론

본 연구에서는 한국인의 식생활과 관련하여 매우 중요한 수산물을 연구 대상으로 저온진공건조 방법에 관하여 전열공학적인 측면에서 정량적인 해석을 시도하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수산물 진공건조장치의 열부하 설계를 위하여 필요한 건조관 단위면적당의 열전달량이 실험식과 실험을 통하여 얻은 것이 거의 일치함을 알 수 있었다.

(2) 해삼의 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 진공압력과 시료가열 온도가 높을수록 증가하였다.

참고문헌

1. 김경근, 최순열, 문수범 등, 1999, “저온진공건조기를 이용한 고추의 열적특성에 관한 연구”, 공기조화 냉동공학회 학술강연회논문집, pp. 410-414.

2. 김경근, 최순열, 문수범 등, 1998, “가열/진공증발 교호열조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(1차년도 연구보고서)”, 산업자원부산업기반기술과제.
3. 김경근, 최순열, 문수범 등, 1999, “가열/진공증발 교호열조작에 의한 임산·수산물 건조장치 개발(2차년도 연구보고서)”, 산업자원부 산업기반기술사업.
4. 김경근, 1999, “농수산물의 저온진공건조 열적 특성”, 대한기계학회 추계학술논문집 특강자료, pp. 1-6.
5. 최순열, 1999, “저온진공건조기의 열적특성에 관한 연구,” 한국해양대학교 기관공학과 박사학위논문.
6. 신기술 편집부역, 1998, “건조장치의 이론과 실제”, 신기술.
7. 太田勇夫, 益子正教, 木村進, 1964, “眞空乾燥”, 日刊工業新聞.
8. Edward M. Cook, Harman D. DuMont, “Process Drying Practice”, McGraw-Hill.
9. 久保田濃, 1995, “乾燥裝置”, 省エネルギーセンター.
10. 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.