

진공건조기의 적정 작동조건에 관한 연구 - 남은 음식물 처리 -

Operating Conditions of Vacuum Dryer

- Treatment of Food Wast -

김 상 현* 신 범 수* 황 병 록*

정희원 정희원

S.H. Kim B.S. Shin B.R. Hwang

1. 서론

건조는 여러가지 방법에 의해 이루어져 크게 배치식과 연속식으로 나눌 수 있으며 건조열원의 유무에 따라 열풍 및 자연건조(natural air drying)로 나뉘고 열원으로는 화석연료 또는 전기를 이용한 마이크로 웨이브 및 원격외선 방식이 있으며 특수목적으로 진공건조 방법 등이 있다.(1,2) 진공건조 방식은 재료의 함수율이 높을 때 낮은 온도에서 건조할 수 있는 특징이 있어서 의약품 및 고품위 농산물을 건조하는데 많이 쓰이고 있다. 특히 완전히 밀폐된 공간에서의 건조가 진행되어서 건조물에서 독성이나 악취등이 발생되어 지는 경우에 작업자와 환경을 보호하는 장점이 있다. 또한 대상 물질이 급격한 산화작용이 가능하고 생성된 가스가 폭발력이 있는 경우에 진공건조방법의 장점이 있어 유기물 솔벤트를 이용한 알약의 제조과정에 사용되고 있다. (3,11)

진공건조기의 기본적인 구성은 건조로와 외부의 열공급장치 및 진공시스템으로 되어 있다. 건조로의 구조는 고정식과 회전식이 있으며 유럽은 주로 고정식으로 내부에 섞음 장치가 있으며 미국식은 통자체가 회전하는 식이다.(4) 진공건조방식은 건조온도가 낮으므로 인해 에너지 비용이 획기적으로 절감되는 경제성외에도 환경친화적이며 기후에 영향을 덜받으며 시스템이 안정적이며 미래지향적인 기술로 인정되고 있다.(3) 특히 마이크로 웨이브 진공방식은 의약품건조 및 농산물 건조에 많이 사용되고 있으며 농산부산물등은 직화법등을 고려할 수 있다.(6) 그러나 우리나라에서는 축분 및 음식물 찌꺼기 등을 건조처리할때 경제성 높은 진공 건조 방식으로 사료화 하는 기술에 관한 체계적인 연구가 수행된바 없다. 따라서 본연구의 목적은 진공건조기의 이론적인 작동원리를 구명하고, 사용열량, 재료, 인건비, 건조시간 등을 감소시킬 수 있으며 기계의 안전성을 유지하도록 하는 적정 작동조건을 찾는 데 있었으며 구체적으로는 1) 진공건조기의 작동이론을 분석하며 2) 진공 건조기를 소형으로 제작하여 실험적인 방법으로 적정 조건을 찾으며 3) 진공 건조기의 성능 향상을 위한 작동방법을 진공 상태에서의 건조이론으로 분석, 실험으로 증명하고 4) 건조효율을 측정하는데 있다.

* 강원대학교 농업기계공학과

2. 진공건조기의 작동이론

진공시스템은 진공펌프, 컨덴서, 및 필터로 이루어져 있으며 진공펌프는 높은 진공도의 유지 및 작업전에 건조물의 건조로내 흡입에 충분한 용량을 갖추어야 한다.

건조는 물질의 수분을 제거하기 위해 수분 증발 에너지를 공급하는 것으로 진공건조의 경우는 주로 전도에 의한 열전도를 이룬다. 따라서 건조 대상물질은 멎쳐지지 않은 상태로 고루 퍼져서 전도 벽면과 접촉할 수 있는 면적을 크게할 수 있는 섞음 장치가 필요하다.(3) 일반적인 작업방법으로는 건조전에 건조로 내에 있는 물질을 일정온도로 상승시킨후에 진공을 가하여 건조를 수행하며 이때 진공을 가한후 가열된 열량은 무리없고 효율이 높은 건조를 할수있게 된다. 열매체를 이용하여 무리없고 효율이 높은 건조가 어려운경우는 마이크로 웨이브나 직화법등을 고려할 수 있다.

진공건조가 진행되는 과정은 증기표에서의(그림1) 증기 압력과 증기온도간의 관계가 중요하다.(10, 11) 즉 비록 물은 100 °C에서 일반적으로 비등하나 압력을 줄이면 낮은 온도에서도 끓는다. 예를 들면 절대압력 150 mmHg 일때 물은 60 °C에서 끓으며, 절대압력이 15 mmHg 일때는 18 °C에서 끓는다. 따라서 건조로 내의 압력은 건조물의 온도를 나타내는 지수가 될 수 있다.

건조로 내의 발생되는 증기의 체적은 건조에 큰 영향을 미친다. 1기압 100 °C에서 1kg의 증기는 1.67m³이지만 7.5mmHg에서는 1 kg의 증기는 1기압의 70배가 된다. 따라서 저압에서 진공건조를 하기 위해서는 압력저하의 정도에 따라 큰용량의 진공펌프가 필요하다. 그러나 진공펌프는 공기의 체적을 제거하여 진공정도를 유지하므로 건조로와 진공펌프사이에서 흡입되는 증기의 온도를 낮추어 증기를 응축할 경우 오직 응축되지 않은 공기만이 진공펌프로 배출되어 작은 용량의 진공펌프로 큰 진공도를 얻을 수 있다.

Volume of 1kg of saturated water	Volume of 1kg of dry air	Boiling temperature	Absolute pressure	Relative pressure
cm ³	m ³	°C	mm Hg	mm Hg
1.673	0.896	100	760	0
2	0.8	90	600	150
3	0.7	80	400	350
4	0.6	70	200	550
5	0.5	60	150	650
7	0.4	50	100	750
8	0.35	40	70	850
9	0.3	30	50	950
10	0.25	20	30	1050
15	0.15	10	15	1150
20	0.1	5	7.5	1250
30	0.07	2	3.75	1350
40	0.05	1	1.875	1450
50	0.04	0.5	0.9375	1550
60	0.03	0.25	0.46875	1650
70	0.025	0.125	0.234375	1750
80	0.02	0.0625	0.1171875	1850
90	0.015	0.03125	0.05859375	1950
100	0.01	0.015625	0.029296875	2050
150	0.005	0.0078125	0.0146484375	2150
200	0.0025	0.00390625	0.00732421875	2250

그림 1. 증기표

3. 실험장치 및 방법

가. 장치 및 재료

실험실 실험을 위해 실험용 소용량의 진공건조기를 제작하였다. 진공조의 용량 0.3m^3 , 수봉식진공펌프의 용량 1500 l/min , 로터 회전장치, 화실 및 버너, 연료통 및 컨트롤 박스로 구성되어있다.(그림 2)

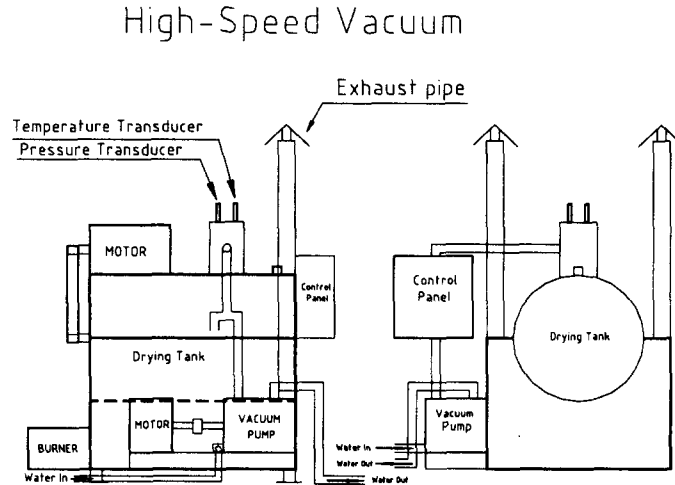


그림 2. 진공건조기의 구조 및 계측 장치 모식도

소형 진공건조기에 건조재료를 투입한 후 재료의 온도를 일정하게 높여 수증기를 발생하여 야만 진공을 적정온도에서 유지할 수 있다. 따라서 건조로를 연속가열하여 재료의 온도를 높인후 진공펌프를 작동하는 방법을 적용하였다. 수봉식 진공펌프는 일정량의 물을 연속적으로 공급받아 작동되므로 본 실험에서는 수도물을 공급하여 사용되었다.

재료는 대형 식당의 남은 음식물로 채등에 걸러 중력에 의한 수분분리를 한후 건조로에 공급되며 공급량은 $100 - 150\text{kg}$ 의 범위를 유지하였다. 진공건조기내의 건조를 촉진하기 위해서 분장기에 투입되는 재료인 남은 음식물에 수분 조절제 등을 남은 음식물에 대한 무게비로 $10 - 15\%$ 정도를 혼합하였다.(8) 재료의 함수율은 건조로 공급전 및 건조과정에서 일정한 시간간격으로 채취하여 건조오븐에 의해 측정되었으며 샘플 수는 각 처리 당 10개로 하였다. 재료의 건조시간은 2시간을 타이머로 정해놓고 자동으로 버너를 작동하여 온도를 조정하고, 로터의 정역전 및 펌프의 작동을 자동으로 작동한다.

나. 실험방법

본 연구에서는 진공건조 장치의 작동 및 건조성능을 측정하기 위해 건조로 내에 재료를 투입한후 함수율을 측정하여 건조성능을 측정하였으며 건조장치의 작동특성을 측정하기 위해

증기 배출구에 온도 및 압력센서를 설치하여 건조과정에서의 온도 및 압력변화를 측정하였다. 또한 건조과정에서 시간에 따른 재료의 건조속도를 측정하기 위해 건조작업 시작 후 30분 간격으로 진공조에서 샘플을 채취하여 함수율을 측정하였다.

진공상태에서 건조가 수행될때 진공조내의 온도와 압력은 Smet(1989)⁽¹¹⁾등이 발표한 내용과 같이 증기표의 포화수증기일 경우에 비례하여 변화하며 또한 재료의 함수율 변화에 따른 건조속도도 차이를 보인다. 본 실험에서는 재료의 함수율에 따른 건조속도를 대기압에서 측정하고 그 경향을 기초로 진공상태에서 진공조내 재료의 함수율이 작아짐에 따른 건조속도의 차이를 시간에 따른 재료의 함수율을 측정하여 구하였으며 동시에 온도 및 압력의 특성도 측정하였다. 진공건조기의 효율을 측정하기 위해 작업 중에 연료소비량을 측정하였다.

다. 계측 시스템 구성

진공 건조기의 작동 특성을 파악하기 위하여 표 1에서 보는 바와 같이 계측 시스템을 구성하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 온도, 습도 및 압력 센서는 진공 펌프로부터 반응조로 가는 관로에 구멍을 뚫고 너트를 용접하여 센서부의 나사로 체결하였다.

표 1. 계측 장치의 블록 다이어그램

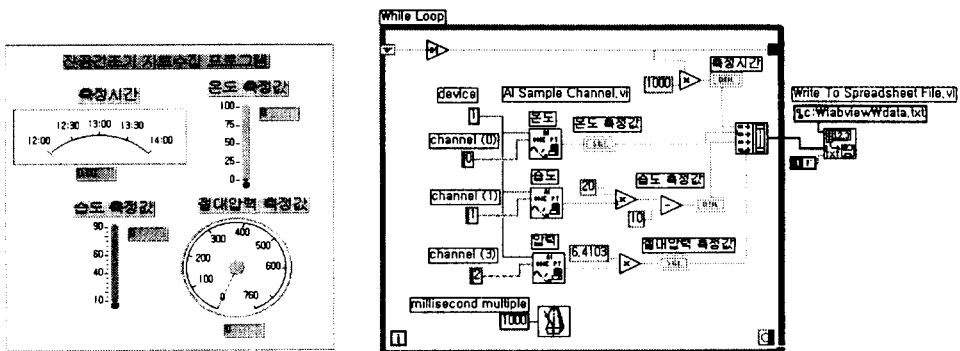
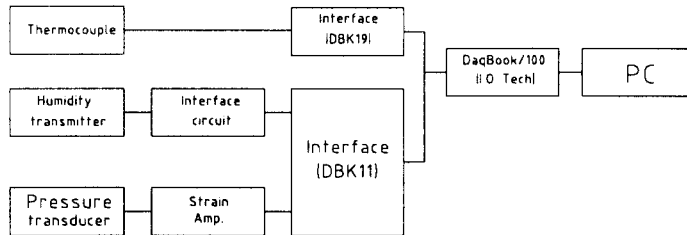


그림 3. 계측 센서 자료 수집 프로그램(Labview)

4. 결과 및 고찰

가. 진공건조기의 건조특성

진공건조기는 작업과정에서 압력과 온도가 일정한 관계를 갖고 변화한다. 표 2는 실험용 진공건조기에 남은 음식을 수분조절재 10%와 혼입 후 2시간 동안 진공조 내의 온도와 압력을 측정된 결과이다. 재료의 공급총량이 59kg인 경우에 진공조내의 압력은 절대압력 130에서 90 mmHg으로 변화하고 증기온도는 47 °C에서 43 °C의 분포를 보였다. 시간에 따라 진공도가 커지며 동시에 진공조내의 온도가 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 건조가 진행됨에 따라 수분의 증발량이 감소되나 진공펌프는 항상 일정한 공기량을 진공조에서 배출해내므로 인해 진공조 내의 진공도가 커지며 이때의 비점온도는 증기표에서 찾을 수 있는 경향과 같이 낮아지게 된다. 그러나 실험결과 진공도가 커짐에 따라 낮아진 증기온도가 증기표의 압력에 비례한 비점온도(boiling temperature)의 값보다 7 °C에서 10 °C정도 낮은 값을 보였는데 이러한 현상은 온도측정 위치의 차이에 기인된 것으로 판단된다.

표 2. 진공조내의 절대온도와 압력(59kg 공급)

작동시간(min)	절대압력(mmHg)	온도(°C)
15	133	47
25	130	47
40	125	48
55	120	45
70	110	42

나. 재료의 증발속도

진공 건조기내의 재료의 증발량은 재료가 건조되어 질수록 작게된다. 즉 높은 함수율에서는 재료의 표면에 수분이 많아 증발량이 많아지나(항을 건조기간), 낮은 함수율에서는 재료에 절대적인 수분량이 적을 뿐 아니라 재료내부의 수분이 표면으로 이송되어 증발되어야 하므로 증발량이 적어 건조 속도가 늦다(감을 건조기간).(6)

대기압에서 실험재료인 남은 음식물의 비증발량(수분 증발량/재료의 건물량/1분)을 함수율에 따라 측정된 결과는 그림 4와 같다. 재료내부의 온도를 97 °C - 99 °C로 유지되도록 유도시키며 재료의 함수율에 따라 1분동안 단위 건물량당 수분증발량을 측정된 결과 지수감소곡선을 나타내었다. 즉 단위 건물량당 수분증발량은 70%(w.b.) 일때 0.17이며 50%(w.b.)일 때는 0.12정도로서 증발량이 재료의 함수율이 감소함에 따라 줄어드는 경향을 보였다. 이때 증기의 온도는 재료의 표면에서 97 °C 정도로 100 °C보다 다소 낮았다.

대기압에서의 결과와 비교하기위해 진공건조기 내에서 재료를 건조할 때 1분당 비증발량을 측정된 결과는 그림 5와 같이 지수감소 경향을 보여 대기압때의 비증발량과 비슷한 경향을 보였다. 따라서 압력에 상관없이 함수율의 감소에 따라 비증발량도 감소하는 경향을 보여

건조가 진행됨에 따라 절대적인 증발량이 줄어드는 것을 알 수 있다.

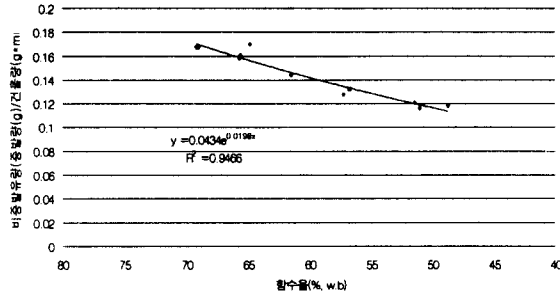


그림 4. 대기압에서 함수율에 따른 비증발유량

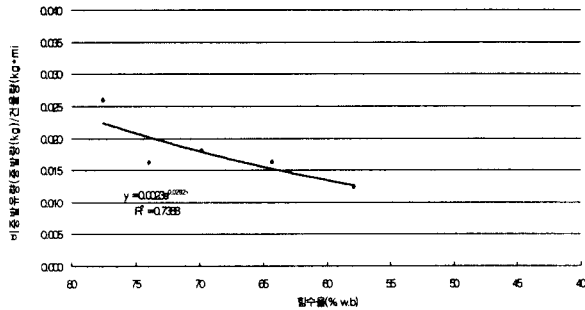


그림 5. 진공건조기내의 함수율에 따른 비증발유량(90kg 공급)

다. 진공건조기의 작동조건

재료가 건조됨에 따라 증발량이 감소하는 현상은 진공건조기내의 온도 압력관계를 결정하는 기준이 될 수 있으며 진공건조기의 적정 작동조건을 결정할 수 있는 방법을 제시할 기초 자료를 얻을 수 있다. 표 3은 시간에 따라 압력의 변화와 함수율의 변화를 나타낸 표로서 건조과정에 따라 진공도가 커지는 경향을 볼 수 있다.

표 3. 진공 건조기내의 시간에 따른 절대압력과 함수율의 변화(증기온도 44 °C)

작동시간(min)	절대압력(mmHg)	함수율(% w.b)
30	120	75.6
60	110	72.3
90	110	67.4
120	105	61.2
150	100	54.6

재료의 함수율이 감소함에 따라 진공도가 커지는 과정을 분석하면 첫째, 함수율이 감소함에

따라 비 증발량이 감소하며 따라서 증발된 증기의 체적도 줄어들게 된다. 둘째, 항상 일정한 유량을 흡입하는 진공펌프에서는 초기의 온도와 진공도에서 재료가 발생한 일정량의 증기를 흡입하다가 함수율이 감소되어 증발된 증기의 양이 줄어들게 되면 이때의 증기의 체적도 따라서 줄어들게 되어 흡입유량이 일정한 진공펌프는 증기를 흡입하고 난후 나머지 흡입유량은 진공조내의 진공도를 증대시키는 결과를 유발하며, 증대된 진공도에서는 증기의 체적이 증대되므로 진공펌프는 순간적인 균형을 이루며 진공 압력을 유지한다. 이러한 현상을 계산 결과로 표시하면 표 3의 경우 재료의 건물량은 18.45 kgd.m. 이었으며 75%(w.b.)의 함수율 일때 절대압력은 120mmHg이고, 비증발량은 0.02 (kgw/kgd.m./ min) 이며 (그림 5) 이 때의 증기의 비체적이 9.3m³ /kgw(그림 1) 이므로 분당 증발량은

$$0.02 \text{ kgw/kgd.m./min} * 18.45\text{kgd.m.} = 0.369 \text{ kgw/min}$$

이고 따라서 증기의 체적유량은

$$0.369 \text{ kgw/min} * 9.3 \text{ m}^3/\text{kgw} = 3.432\text{m}^3/\text{min} \text{ 이다.}$$

재료가 건조되어 65%(w.b.)의 함수율 일때 증기의 절대압력은 105mmHg 이고, 비증발량은 0.016 (kgw/kgd.m./min)이며 이때의 증기의 비체적은 10.5 m³/kgw 이므로 분당 증발량은

$$0.016 \text{ kgw/kgd.m./min} * 18.45\text{kgd.m.} = 0.295 \text{ kgw/min}$$

이고 따라서 증기의 체적유량은

$$0.295 \text{ kgw/min} * 10.5 \text{ m}^3/\text{kgw} = 3.098\text{m}^3/\text{min} \text{ 이다.}$$

따라서 75%함수율일때 증발된 증기의 체적유량이 3.432m³/min이고 65% 함수율 일 때는 3.098m³/min으로 10%정도의 차이를 보이며 거의 비슷한 유량을 나타내어 일정유량의 진공 펌프로 건조되는 과정이 설명이 된다.

다음 표 4는 진공조내의 내용물을 60 °C 정도로 가열한 후 진공을 가한 경우의 결과로 재료의 건물량은 22.5kg이었으며 함수율의 감소에 따라 증기의 절대압은 110mmHg에서 65mmHg로 감소하고 재료의 온도는 55 °C에서 53.5 °C 범위로 낮아지는 경향을 보였다. 이 경우에 있어서 그림 6는 비증발량을 표시한것으로 그림 5에 비해 전체적으로 높은 값을 보여 2시간내 건조된 재료의 함수율도 낮았으며 최종압력도 낮았다. 이러한 현상은 재료의 초기 온도를 높인 결과로서 그림 5의 경우는 재료의 온도를 충분히 높이지 않고 진공을 가했을때 평형을 이룬 증기 온도는 44 °C 정도로 낮은 경우와 비교할 수 있다. 재료의 온도를 높여 증기 발생량을 높인 후에 진공을 가한 경우에는 상대적으로 높은 온도에서 평형을 이룰 수 있으나 재료의 온도가 낮은 경우에는 증기의 발생량이 적으므로 상대적으로 큰 유량을 가진 진공펌프는 진공조의 진공도를 높게 되어 따라서 증발온도가 낮은 상태를 유지한다. 따라서 본 실험 장치의 진공펌프의 유량은 다소 큰 것으로 판단되며 사료로서의 가치를 유지할 수 있고 건조후 발효가 용이한 상태를 유지할 수 있는 60 °C 정도에서 건조되기 위해서는 재료의 량 및 함수율에 따라 진공펌프의 유량을 적절하게 조정하여 일정한 온도를 유지 할 수 있는 제어장치를 부착하는 방법이 필요할 것으로 판단된다.

표 4. 내용물 가온후(60 °C) 진공건조기내 절대압력과 온도 및 함수율의 변화

작동시간(min)	절대압력(mmHg)	온도(°C)	함수율(% , w.b)
30	110	54.5	
60	95	52.5	64
90	85	54	
120	65	53.5	42

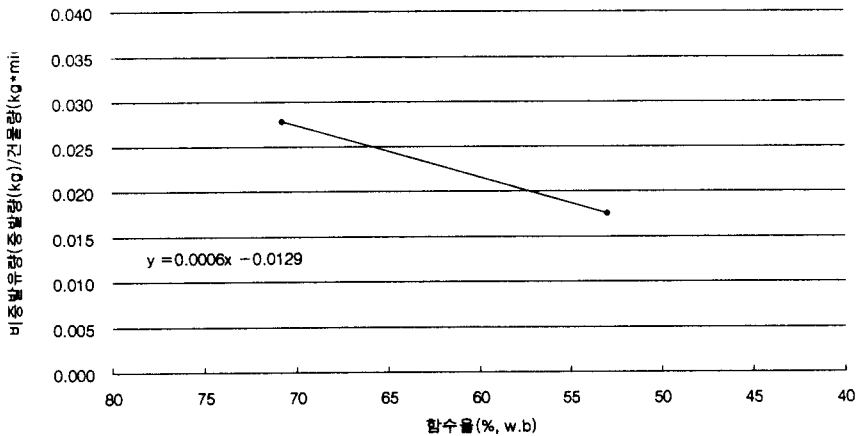


그림 6. 가온후(60 °C) 진공건조기내 함수율에 따른 비중발유량(100kg 공급)

그림 6와 표 4에 근거하여 함수율 70%(w.b.)와 57%(w.b.)의 두 경우에 있어서 증기유량을 계산한 결과 6.3 m³/min 와 5.87 m³/min 로서 10% 내의 범위에서 비슷한 유량을 나타내어 재료의 증기온도가 44 °C인 경우에 비해 증기 유량은 2배 정도가 되었다.

따라서 재료의 증기온도가 44 °C인 경우 진공펌프의 유량을 줄여 절대 압력을 높이면 재료의 온도를 적정수준 까지 높일 수 있을 것이다.

라. 진공건조기의 열효율

진공건조기내 에서는 대기압의 경우보다 낮은 온도에서 수분이 증발하므로 재료의 온도를 낮게 유지하여 건조할 수 있으며 따라서 재료를 가열하는 연료비를 절감할 수 있는 장점이 있다. 본 실험장치는 투입재료가 80%(w.b.) 정도에서 50%(w.b.)로 감소되는데 2시간 정도 소요되며 이경우 화실의 온도를 400 °C로 고정하여 버너의 작동을 자동으로 조정되도록 하였다. 실험과정에서 버너의 열소모량을 측정 한 결과 100kg의 재료를 건조하는데 2시간동안 6.3l의 연료가 소모되었으며 버너의 커짐시간은 전체시간의 50%이었다. 함수율 80%(w.b.)의 재료 100kg을 50%(w.b.)로 감소할 때 수분은 60kg이 증발되며 재료의 건조기내의 온도는 평균적으로 53 °C를 유지하였다. 진공시 비점온도가 53 °C로 가정하고 60kg의

물을 수증기화 하는데 드는 이론적인 열량은 비열 과 증발잠열로 계산한 결과 열효율 53.6%로 나타났다.

5. 결론 및 요약

본 연구의 목적은 진공건조기의 효율성을 높일 수 있는 적정 작동 조건을 구명하는데 있었으며 소형 진공건조기를 제작하여 실험한 결과는 다음과 같다.

가. 진공건조기 내의 증기 압력과 증기온도의 변화는 증기표에서의 값과 비례하는 결과를 보여 건조로 내의 압력은 건조물의 온도를 나타내는 지수가 될 수 있다. 또한 건조로 내의 발생하는 증기의 체적은 흡입되는 증기의 온도를 낮추어 작은 용량의 진공펌프로 큰 진공도를 얻을 수 있다.

나. 진공건조기를 소형으로 제작하여 실험한 결과 진공도가 커짐에 따라 낮아진 증기 온도가 증기표의 압력에 비례한 비점 온도 보다 7 °C에서 10 °C도정도 낮은 값을 보였다.

다. 진공건조기 내에서 재료를 건조할 때 분당 비 증발량은 대기압에서의 비 증발량과 비슷한 지수감소 경향을 보여 압력에 상관없이 함수율의 감소에 따라 비 증발량도 감소하였다.

라. 재료가 건조됨에 따라 증발량이 감소하는 현상을 기초로 하여 건조기내의 온도 와 압력의 적정수준을 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

마. 2시간동안 화실의 온도를 400 °C로 고정하고 투입재료를 80%(w.b.) 정도에서 50%(w.b.)로 건조할때 열효율 53.6%이었다.

참고문헌

1. 건조의 이론과 실제, 한국식품개발원, 101-168, (1988)
2. 고태균, 금동혁, 김만수, 노상하, 문성홍, 박경규, 장동일, 농산가공기계학, (1996)
3. 김명배, 고효율 건조시스템 개발을 위한 기획 연구, 12-124, (1997)
4. 박경규, 서상용, 축산기계학, (1996)
5. 박재철, 이광만, 임병국, 자동화용 센서, (1995)
6. 변유량, 식품공학, (1998)
7. 송재철, 박현정, 최신 식품 가공학, (1997)
8. 신명교, 김홍균, 음식물쓰레기 감량화 규제에 대한 연구, 4(2) 29 (1994)
9. 최성주, Labview 입문, (1998)
10. Gordon J.Van Wylen, Richard E.Sonntag, Fundamentals of classical thermodynamics, 3rd edition, (1976)
11. Paul. De Smet, Vacuum Drying, 31, (1989)