대한설비공학회 2009 하계학술발표대회 논문집 pp. 0242 ~ 0247

09-S-042

복합 냉풍 건조기 개발

최 현 웅†, 김 영 일*, 박 승 태, 유 경 록
(주) 에이티이엔지 기술연구소, 서울산업대학교 건축학부

Development of the mixed desiccant cooling dryer

Hyunwoong Choi†, Youngil Kim*, Seungtae Park, Kyungrok Yoo
Air-Tech Engineering Co., Ltd, Seongnam 462-806, Korea
**School of Architecture, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea*

ABSTRACT : The present study has been conducted to reduce the cold air drying rate. According to the cold air drying method, the quality-excellent product could be made and there would be little change of color, taste and smell. As compared with the hot air drying, the cold air drying equipment has the superior dehumidification in a constant drying zone. However, in a falling drying zone that equipment is not energy-efficient because the drying period could be longer by the dehumidificated.

Key words: Drying(건조), Mixed desiccant cooling dryer(복합식 건조기), Constant drying rate period(항률건조구간), Falling drying rate period(감률건조구간)

기 호 설 명

R_c : 항률건조속도 [kg/m^{2}h],
R_d : 감률건조속도 [kg/m^{2}h]
W : 무수재료의 중량 [kg]
A : 표면적 [m^2]
K : 물질이동계수 [kg/hm^2℃]
G :공기의 물질속도 [kg/hm^2]
H_w : 재료표면일정온도에서의 포화절대습도 [kg/kg']
H : 재료주변공기의 절대습도 [kg/kg']
h : 열전도율 [kg/m^{2}h℃]
C_h : 공기의 습윤비열 [kcal/kg℃]
t : (재료주변공기의) 온도 [℃]
t_w : 습구온도 [℃]
w : 함수율
W_c : 한계함수율
W_e : 평형함수율
θ_c : 항률건조시간 [h],
θ_d : 감률건조시간 [h]
λ_w : 습구온도에서의 증발잠열 [kcal/kg]

† Corresponding author
Tel.: +82-31-777-9241; fax: +82-31-777-9240
E-mail address: desikant@naver.com

1. 서 론

최근에는 식생활의 합리화에 따라 다양한 건조식품이 만들어지고 있으나, 소비자의 요구에 따라 고품질의 것이 요구되어지고 있다. 식품건조의 저장·운반의 향상을 목적으로 한 시대는 지나가고 오늘날 식품과학의 발전과 같이 복원성·풍미 등에 대한 품질향상이 추구되고 있다. 그리고 예로부터 비교적 안정된 가격의 식품을 경제적이면서 대량으로 건조하는 방법으로 천일이나 열풍건조가 많이 이용되어져 왔으며, 현재에도 천일이나 열풍건조가 주류를 이루고 있으나, 천일에서는 기후에 좌우되어 균일한 건조물이 얻어지지 못하고, 또 열풍건조는 수분에 열을 가해 증발시켜 고온에서 건조하므로, 건조물의 품질, 맛, 향, 기능성 등이 변화하고, 외국제품에 비해 에너지 손실 또한 커서 이에 대응하는 냉풍건조기술과 데시칸트 제습기술의 장점들을 조합한 고효율 데시칸트 냉풍건조기 개발하게 되었다. 본고에서는 건조실내 습도제어와 건조시간 및 에너지 절감 효과에 대해 기술한다.

2. 냉풍건조시스템에서의 고찰

2.1 건조에 대한 고찰

어느 물질을 정상조건하(온도, 습도, 풍속)에서 **Fig.1**처럼 건조속도곡선을 나타내었다. 단시간의 예열시간 후 AB 구간은 건조속도가 일정하고, 공기로 부터의 열은 물질표면의 수분증발에만 사용되어 표면온도는 일정하다. 이것은 초기의 자유함수율이 높기 때문에 나타나는 현상으로 표면온도는 공기의 습구온도가 된다. 그러한 건조 상태에 있는 기간을 항률건조라 한다. 그러나 어느 함수율까지 저하한 것에서 급격하게 건조속도가 감소한, BC와 같은 곡선을 나타낸다. 이 건조기간을 감률건조 1단계라고 부르며, 조금 더 건조속도가 감소한 CD와 같은 건조특성을 나타내는 것을 감률건조 제2단계라고 부른다. 이 감률건조 구간에 들어가면 표면의 물질이동저항 때문에 증발수분의 보급이 충분하게 일어나지 않기 때문에 피건조물의 표면온도가 상승한다. B에 있어 함수율을 한계함수율이라 하고, D점을 평형함수율이라고 한다.

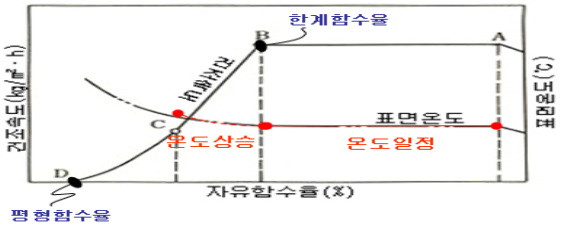


Fig.1 건조속도 곡선

AB구간에서는 비결합수가 증발하고, BC구간은 결합수분이다. 이상에서와 같이 피건조물은 항률건조에서는 습구온도에 영향을 받고, 물건의 온도상승은 없지만 한계함수율을 지나면 감률건조가 되어 물건의 온도가 상승하기 때문에 고온에서 변질이 일어나는 물질은 주의가 필요하게 된다. 그런 까닭에 건조에 있어서는 온도, 습구온도와 함께 한계함수율은 매우 중요한 요소가 된다. 그러나 한계함수율은 일반적으로 예지하는 방법은 아직 확립되어 있지 않기 때문에 실험(적)으로 구할 필요가 있다.

2.2 건조속도

건조속도는 피건조품의 내부요소(크기, 형상, 성분, 수분 등의 물리적, 화학적 성질의 상이)와 외부요소(온도, 습구온도, 풍속)가 있으며, 이 두 요소에 의해 영향을 받는다. 그러나 내부요소는 재료 특유의 것으로 되어 있어 외부요소를 변화시켜 최적의 건조속도를 결정하는 것이 된다.

건조시간은 항률건조시간과 감률건조시간의 합이 된다. 그 기본식을 먼저 단순한 **Fig.2**에 의한 감률 건조속도가 함수율에 비례하는 경우에 대해 기술한다.

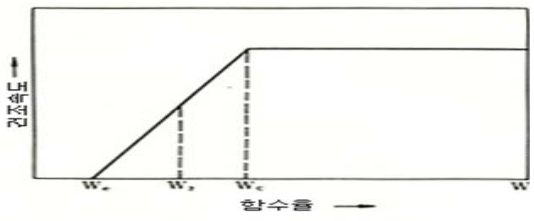


Fig.2 건조곡선과 함수율의 관계

$$R_c = K(H_w - H) = \left(\frac{h}{C_h}\right)(H_w - H)$$

$$= \frac{h(t - t_w)}{\lambda_w} \quad \text{----------(1)}$$

$$R_d = \frac{A \cdot R_c}{W(W_c - W_e)}(W - W_e) \quad \text{----------(2)}$$

위 식에서 항률건조시간, 감률건조시간은 아래식에서 구할 수 있다

$$\theta_c = \frac{W(W_1 - W_c)}{A \cdot R_c} \quad \text{----------(3)}$$

$$\theta_d = \frac{W(W_c - W_e)}{A \cdot R_c} ln \frac{W_c - W_e}{W_2 - W_e} \quad \text{----------(4)}$$

$$\theta = \theta_c + \theta_d = \frac{W}{A \cdot R_c}(W_1 - W_c)$$

$$= (W_c - W_e) \ln \frac{W_c - W_e}{W_2 - W_e} \quad \text{----------(5)}$$

식(1)에서 명확히 알 수 있듯이 공기속도가 일정한 경우, h, k는 거의 일정하지 보이기 때문에 건조속도에는 영향을 주지 않지만, $(t - t_w)$ 또 $(H_w - H)$는 추진력으로써 상당히 건조속도에 영향을 준다.

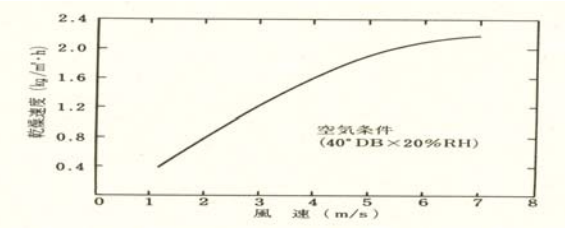


Fig.3 건조속도에 대한 풍속의 효과

공기속도에 의한 건조의 영향은 평판에 공기가 병행으로 흐를 경우 다음의 식이 성립한다.

$$h = 0.0176 G^{0.8} \quad \text{----------(6)}$$

이상의 식에서 명확하게 알 수 있듯이 형상이 같으면 공기 속도를 빠르게 하여 절대 습도차, 온도차를 크게 하면 건조속도를 빠르게 하는 것이 가능하다. 건조속도에 대한 풍속의 효과에 대해 **Fig. 3**에 나타내며, 적용하는 풍속은 풍량이 증가함에 따라 팬 운전비가 증가하므로 4m/s 이내에서 설계하는 것이 바람직하다.

2.3 냉풍건조의 특징

2.3.1 냉풍건조의 원리

건조속도를 빠르게 하기 위해서는 공기 온도차($t-t_w$)를 크게 한다. 이 원리를 이용한 것이 열풍건조기이지만 고온으로 되어 식품중의 지방분의 산화에 의한 변색, 방향(芳香)이 손실, 이상한 냄새가 발생하는 단점이 있다. 이상의 단점을 보완하기 위해 절대습도(H_w-H)차를 크게 하는 방법으로 냉각제습건조가 있다. 냉각제습건조가 설비비용이 싸고 취급이 간편한 것은 공기노점온도 이하까지 냉각하고 제습하는 냉각제습방법이 있다. 이 냉각제습방법을 이용한 것이 냉풍건조이다.

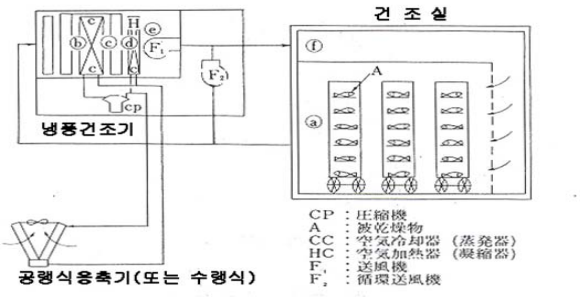


Fig.4 냉풍 건조기 계통도

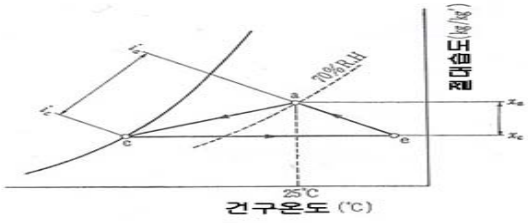


Fig.5 공기 선도상의 상태점 표기(냉각+재열)

냉풍건조기의 기본적인 계통도를 **Fig.4**에 나타내었으며, **Fig. 5**는 이 장치 각점의 공기상태를 습공기선도상에서 설명한 것이다. 건조실내 공기 ⓐ는 공기냉각기에서 냉각제습 되어 ⓒ가 된다. 이 공기는 냉동사이클의 응축열 이용에 의해 공기가열기로 ⓔ까지 가열하고 송풍기에서 건조실로 송풍시킨다.

순환송풍기는 건조실내의 통기속도를 올려 건조속도를 증가시키는 것으로 건조실의 상류와 하류의 온습도차를 작게 하고 건조얼룩(고르지 못한 것)을 방지 목적으로 설치하는 경우가 많다. 결국 건조실 송풍 공기는 ⓔ와 ⓐ의 공기를 혼합한 ⓕ의 상태로 실내에 들어가 피건조물에 의한 수분을 취하는 것으로 증발잠열로 온도가 낮게 되어 습구온도가 일정한 상태에서 ⓐ가 된다.

2.3.2 냉풍건조의 특징

(1) 건조용 온도가 15~25℃ 정도로 낮기 때문에 단백질, 유지류가 많은 식품건조에 최적으로 열풍건조에 비교하여 색, 맛, 향 등의 변화가 적고 품질이 좋은 건조식품을 얻는다.

(2) 냉동기 사용에 의한 피건조물에 적당한 온습도조건을 임의로 설계되기 때문에, 외기조건의 영향을 받기 쉬운 열풍건조, 천일 건조에 비교하여 조업도는 안정되고 품질이 고르다.

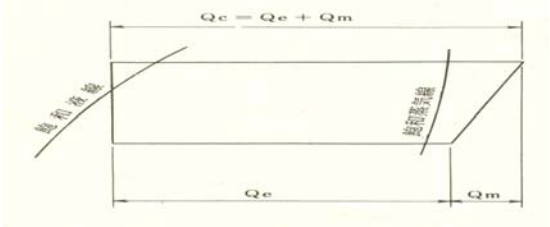


Fig.6 냉동기 P-H선도

(3) 냉풍건조 장치에 따른 열의 수지는 **Fig.6**에 표시한 냉동사이클에서 원리적으로 설명하면은 냉각제습으로 공기 중에서 빼앗은 열 Qe는 응축기에서 Qc = Qe + Qm 의 형태로 버려지지만, 이 Qc에서 냉각제습 후의 공기를 가열한다. 이 때문에 냉풍건조 장치에서는 다른 가열원이 필요 없고, 또 COP=3 정도의 히트펌프가 되어 운전비가 저렴하다.

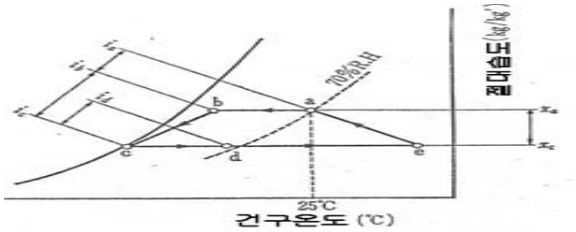
(4) 냉풍건조 장치는 완전히 Closed System으로 되어 외부로 나가는 것은 피건조물의 수분이 드레인 되어 배출되는 것으로 되어 있어 무공해형의 건조기라고 부른다. 또 화기는 사용 없고, 냉동사이클 중 최고로 온도가 높은 것도 압축기 토출 배관온도로 80℃ 정도이므로 화재에 대해서도 대단히 안전하다.

2.4.3 냉풍건조기의 변화

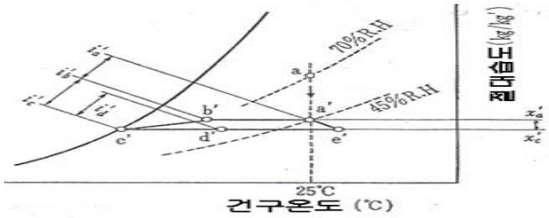
(1) **1978년 이전** : 냉동기에서 냉각열을 이용

하고, 재열열원은 일반열원사용을 사용하는 것으로 추정하며, **Fig.5**와 같이 공기선도에 표시된다. 그리고 **Fig.5**와 비슷하지만 냉각열과 재열에 응축기배열을 이용하는 리커버리 냉각제습기가 주류를 이루었다..

(3) **1981년 전후** : **Fig.7**의 형태로 에너지 절감형으로 하여 프리쿨링/프리히팅 장치를 적용하여 사용하였으며 프리쿨링/프리히팅 장치로는 a. 냉온수열교환기코일 이용, b.히트파이프 이용, c. 판형 현열교환기를 이용하였으나, 에너지절감 이용열원에 비해 이들 열교환기에 의해 공기압력손실이 증가하여 송풍기동력이 증가하여 투자비에 비해 효과가 적어지므로 점차적으로 적용하지 않는 추세이며, 1993년 이후부터 다시 **Fig.5**의 형태로 돌아오고 있는 추세이다.



(a)항률건조구간에서의 제습량



(b) 감률건조구간에서의 제습량

Fig.7 에너지 절감형 냉각제습기

(3) 대체냉매, 자연냉매 등의 개발로 히트펌프를 이용한 고온 가능한 응축기를 사용하여 열풍건조운전으로도 개발이 진행되고 있다.

(4) 마이크로웨이브(전자렌지)와 냉풍건조를 조합하는 경우가 있다.

2.4.4 기존 냉풍건조의 감율건조에서의 단점

피건조물의 건조과정에는 초기의 항률건조와 말기의 감률건조가 있으며 기존의 배열이용 냉풍건조시스템에 있어서 항률건조구간에서는 **Fig.7**의 (a)에서처럼 냉각열량이 잠열부하를 제거하는데 많이 사용되며 피건조물의 수분증발에 이용되는 가열부하는 응축기의 배열부하를 이용하고, 냉각코일의 입출구의 절대습도가 차가 커 효율적인데 반하여 감률건조구간에서는 **Fig.7**의 (b)에서처럼 투입되는 냉각열에 비해 현열냉각부하가 크고 제습되는 절대습도차가 작아져 건조시간이 길어지는 단점이 있다.

2.6 복합식 냉풍건조장치의 개발

복합식 냉풍건조기의 제품사진과 구성도를 **Fig.8**와 **Fig.9**에 개략적으로 나타내었다.

Fig.8 복합식 냉풍건조 시스템의 제품사진

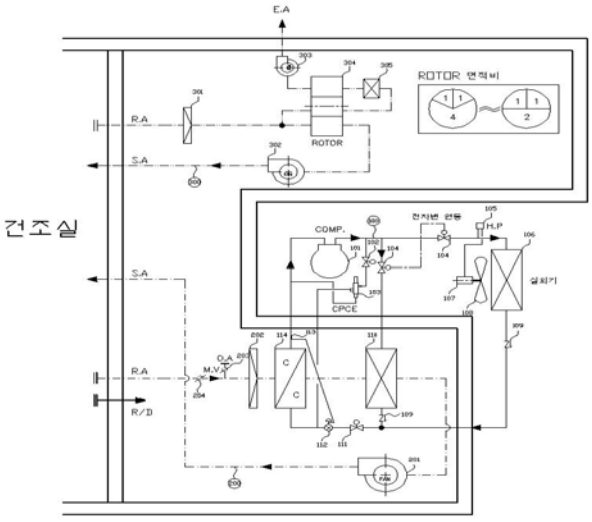


Fig.9 복합식 냉풍건조시스템의 구성도

(1) 항률건조(냉풍건조운전+데시칸트건조정지)

건조실내에 피건조물을 건조시키기 위해 냉풍건조기를 동작하여 건조실내의 습한 환기를 냉각코일에서 제습되며 응결수는 드레인 배관을 통해 외부로 배출되고, 냉각건조된 공기는 응축 재열코일에서 낮아진 건조공기온도와 피건조물에서의 증발(건조)을 돕기 위한 가열열량을 포함하여 가열되어 건조실내 온도를 유지하도록 급기팬을 통하여 건조실내로 공급된다. 건조실내는 피건조물

의 건조를 돕도록 건조실내 순환형팬은 피건조물에 적정하도록 풍량이 조절되어 운전되도록 한다.

(2) 항률건조(냉풍건조운전+데시칸트건조운전)

피건조물을 빠른 시간내에 건조하기위해 냉풍건조는 상기 (1)과 같이 운전되나 이때는 외기공급댐퍼가 열어 데시칸트건조에 필요한 재생배기로 하여 외기를 유입하고 데시칸트건조는 건조실내의 습한 환기를 데시칸트로터를 통해 가열 제습된 공기가 급기팬을 통해 건조실내로 공급된다. 습한 공기의 일부는 데시칸트을 통과하여 상승한 온도를 재생가열기에서 140℃ 내외로 가열한 후 데시칸트로터 재생측을 통해 데시칸트로터를 건조한 후 재생배기팬을 통해 고온고습의 공기는 배출된다.

(3) 감률건조(냉풍건조운전+데시칸트건조운전)

피건조물이 항률건조구간을 지나 일정습도이하에서는 감률건조가 시작되어 건조실의 습도가 천천히 떨어지면서 냉풍건조는 건조실내의 온도에 의해 운전되며, 외기공급댐퍼를 열어 데시칸트건조에 필요한 재생배기로 하여 외기를 유입하고, 데시칸트건조는 건조실 내의 습도가 낮아진 공기를 데시칸트로터를 통해 가열 제습된 공기가 급기팬을 통해 건조실내로 공급된다. 습도가 낮아진 공기의 일부는 데시칸트를 통과하여 상승한 온도를 재생가열기에서 140℃ 내외로 가열한 후 데시칸트로터 재생측을 통해 데시칸트로터를 건조한 후 재생 배기팬을 통해 고온고습의 공기는 배출된다.

3. 복합식 냉풍건조장치의 실험적고찰 및 결론

실험) 피건조물 노가리 100kg
(생태 95.2kg+세척물 4.8kg 기준)
중량감소 74%,건조중량 28.6kg 완전건조
(생태 함수율 80.3%,건조품 함수율 11.3%,건조함수율 69%)
냉풍건조기 1HP(소요입력1kw) 풍량 480kg/h,
건조실 내 순환팬 0.75kw
데시칸트건조 재생히터 2.7kw+팬 0.3kw

피건조물의 한 예로 노가리를 냉풍건조시의 실제운전 실태를 살펴보면 생태함수율 80.3% 건조물 함수율 11.3%이며, 이때 4일에 걸쳐 74%의 중량이 감소하였는데 이는 실질중량 감소량이 69%에서 생태 세척시 5%정도 수분이 증가하여 74% 중량이 감소하였다. 1일차에는 50%, 2일차에는 14%, 3일차에는 7%, 4일차에는 3%로 실내건조조건은 25~26℃ DB, 25~30% RH이다. 이 자료에 의해 제습상태량을 계산하여 보면 1일차는 항률건조로 운전하며 50/3=16.67kg, 2일차는 14/3 =4.67kg, 3일차에는 7/3=2.33kg, 4일차에는 1kg으로 초기와 말기의 제습량의 차이는 16.67배에 달한다. 실내조건을 25℃, 30%를 기준으로 하면 절대습도 5.89g/kg′ 25℃, 80%, 15.96g/kg′ 이므로 같은 조건으로 운전한다면 △x=15.96-5.89 =10.07 g/kg′ 그러므로 4일차 절대 습도차는 △x= 10.07 /16.67=0.6g/kg′, 3일차에는△x= 0.6*2.33= 1.4 g/kg′, 2일차에는 △x=0.6*4.67 =2.8g/kg′, 1일차에는 △x=0.6*16.76 =10.06g/kg′ 이다. 이를 보면 1일차면 항률건조로 운전되며 2일차부터는 감률건조로 운전되었다고 판단된다.

이를 개발한 복합식 냉풍건조시스템인 냉풍건조+데시칸트건조로 건조하여 결과를 **Table 1**에 나타내었다.

Table 1 건조방식에 따른 습도변화와 건조시간

냉풍건조			기준 필요 제습량	복합식 냉풍건조 : 분리건조				복합식 냉풍건조 : 동시건조		
건조일	습도 변화 (%)	노가리 건조 중량		건조 시간	습도 변화 (%)	냉풍건조	데시칸트 건조	건조 시간	습도 변화 (%)	냉풍건조 데시칸트 건조
1일차	80 ~43	50% 감량	2,083	24h	80 ~43	50% 감량		9h	80 ~43	50% 감량
2일차	43 ~36	14% 감량	583	9h	43 ~30	~	24% 감량	9h	43 ~30	24% 감량
3일차	36 ~32	7% 감량	291							
4일차	32 ~30	3% 감량	125							

(1) 개발한 복합식 냉풍건조시스템은 냉풍건조(제습)가 갖는 장점을 살리면서 데시칸트 건조(제습)와 개별운전 및 병행운전을 통해 피건조물의 항률건조에서 효과적인 냉풍건조(제습)기와 감률건조에서 최대의 효과를 얻는 데시칸트 건조(제습)기의 조합에 의해 피건조물의 건조시간을 최대 50% 이상 줄임으로써 사용자에서 생산성 향상을 가져다주는 것을 알았다.
결과를 **Table 2**에 나타내었다.

Table 2 건조방식에 따른 운전시간비율

건조방식	동력(kW)	건조시간(h)	운전비율(%)
냉풍건조 단독운전	1.75	96	100
복합식 냉풍건조 분리운전	1.75/4.75	24/11	36.5
복합식 냉풍건조 동시운전	4.75	21	21.9

(2) 복합식 냉풍건조시스템은 냉풍건조분야에 있어서 세계적인 기술로 냉풍건조가 갖는 맛, 향, 품질, 색 등이 우수하면서 항률건조에서 효과적인 냉풍건조(제습)기와 감률건조에서 최대의 효

과를 얻는 데시칸트 건조(제습)기의 조합에 의해 운전비 절감을 40% 이상하며, 기존의 냉풍건조온도보다 건조실 내를 낮은 온도와 낮은 습도로 운전이 가능하여 건조에 효과적이다.
결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 건조방식에 따른 사용동력비율

건조방식	동력(kW)	사용동력(kWh)	운전비율(%)
냉풍건조 단독운전	1.75	168	100
복합식 냉풍건조 분리운전	1.75/4.75	94.3	56.1
복합식 냉풍건조 동시운전	4.75	99.8	59.4

(3) 기존의 냉풍건조는 피건조물을 건조 후 일정 저온온도로 보관이 용이하나, 복합식 냉풍건조시스템은 온도를 포함하여 습도를 제어 할 수 있으므로 피건조물의 손상 없이 장기간 보관에도 용이하다는 것을 알았다.

(4) 복합식 냉풍건조시스템은 항률건조시에는 냉풍건조의 냉각코일에 응결수가 발생하는 습코일이나 감률건조구간에서 데시칸트 건조에 의해 일정습도가 이하가 되면 냉각코일 노점온도이하가 되기 때문에 응결수가 생기지 않는 건코일화 되어 습한 냉각코일에서의 세균번식이나 곰팡이 번식이 예방되어 위생적으로 식품안전에 이상적인 효과를 갖는다. 이를 정리하여보면 냉풍건조의 냉각코일은 건조초기의 항률건조하에서는 습코일로 운전되다가 건조말기인 감률건조시에는 건조실내의 습도에 의해 냉각코일이 건조되는 건코일이 되어 습한 환경에서의 곰팡이나 세균을 예방하는데 효과적이다.

(5) 복합식 냉풍건조시스템의 장점으로 데시칸트건조시에 데시칸트로터는 회전하며 습한 환기는 상온저습으로 실내에 공급되고 로터를 지난 공기는 로터를 140℃ 까지 가열되므로 재생 시에 고온으로 살균하는 효과가 있어 건조실내 공기질 향상을 도모한다.

(6) 복합식 냉풍건조시스템은 항률건조시의 냉풍건조는 냉각열과 응축배열을 이용하는 우수한 에너지절약시스템이며, 데시칸트건조는 에너지절약을 도모하여 낮은 습도에서도 냉풍건조에 비해 2배 이상의 제습능력을 가짐으로써 이를 조합한 국내 최초의 제품이다.

(7) 복합식 냉풍건조시스템에서 냉풍건조에서는 노점온도 10℃(7.63g/kg′) 이하에서는 제습되는 절대습도차가 1g/kg′ 이하가 되어 소비에너지에 비해 제습효율이 떨어지나 데시칸트 건조에서는 노점온도 0℃(3.77g/kg′)에서도 절대 습도차 3.0g/kg′이상이며, 노점온도-10℃(1.6g/kg′) 에서 절대습도차가 1.3g/kg′이상이 되어 노점온도 10℃에서는 데시칸트 건조가 유리하다는 것을 알았으며, 냉풍건조과 데시칸트 건조를 복합한 건조시스템은 기존의 시스템에 비해 생산성, 품질, 제품가격, 운전비 등이 절감되어 사용자에게 필요한 제품이다.

(8) 복합식 냉풍건조시스템은 피건조물의 건조는 물론 건조 비수기에 있어서 건조물의 보관, 저장에도 이용될 수 있어 아주 효율적이다.

(9) 국내와 같이 4계절이 있는 곳에서나 다양한 기후에도 적합하도록 개발되었으며, 국내의 동절기에는 외기를 이용하여 운전비를 최대한 절감되도록 하였으며, 이는 동절기의 저온저습의 외기를 냉풍건조기에 도입하고 데시칸트 건조에서 배기와 제습처리공기의 상승되는 온도를 피건조물의 증발을 돕도록 하였고, 건조실내에 가압되는 공기는 릴리프댐퍼(차압댐퍼)를 부착하여 건조실내의 압력상승을 차압에 의해 자연 배기되도록 하여 냉풍건조의 압축기운전을 줄여 운전비를 절감을 도모하였다.

후기

본고는 중소기업청 중소기업기술혁신과제인 “제습 소재(Desiccant)이용 고효율 건조기 (제습공조) 기술개발”의 일환으로 작성되었습니다.

참고문헌

1. HEAT PUMP TYPE건조(제습)기술, 2001, 홍정성, 남양저온건조연구실
2. 冷凍空調裝置の設計例, 1978, 日本冷凍協會, pp.191-194
3. 冷凍空調便覽 第4版, 1981, 日本冷凍協會, pp.668-672
4. 冷凍空調便覽 第5版, 1993, 日本冷凍協會, pp.331-336
5. Humidity Control Design Guide, 2001, ASHRAE, pp.16-17
6. ASHRAE Journal, 2007, January, pp.34-49.