

5.2 건조

정제된 젖은 생성물로부터 용매(물 또는 유기용매)를 제거하는 것을 건조(drying)라 한다. 건조를 하는 일반적인 목적은 제품의 운반 경비를 줄이고, 제품의 취급과 포장에 용이하게 하며, 보존시 안정성을 높이기 위함이다. 생물 제품의 건조 목적은 위의 목적 외에도 박테리아 세포 내의 효소활성을 보존하며 고가의 용매를 회수하는 것이 포함된다. 다른 제품을 건조할 때와는 달리 생물 제품은 열에 민감하기 때문에 주의하여야 한다. 건조를 하기 위해서는 현재 고체 내에 포함되어 있는 수분의 양, 수분이 제거되는 속도, 제품이 변성되는 속도에 대한 정보가 필요하다.

고체 내에 포함된 수분의 양은 고체-증기의 증기 평형에 관한 열역학적인 정보이다. 고체 내의 수분은 두 가지로서 비결합수(자유수)와 결합수가 있다. 결합수(bound water)는 물질의 내부에 포함되어 있는 것으로 일반적인 물과 달라서 유동적이지 못하며, 증발시키는 데에도 많은 열을 필요로 하고, 비결합수(unbound water)보다 작은 증기압을 갖는다. 각 고체물질은 일정한 온도 및 습도의 공기 중에 오래 놓아두면 일정량의 수분을 잃거나 얻어서 주변의 공기와 평형에 도달한다. 비결합수에 대해 기액 평형은 보통 습도도표(humidity chart)에 주어진다. 습도란 건조공기 단위질량당 포함되어 있는 수분의 질량이다.

건조속도의 계산

건조속도(drying rate)란 열이 전달되는 속도(가열속도)에 대응되는 수분의 증발이 일어나는 열 및 물질전달 속도이다. 온도가 T 이고 습도가 H 인 열풍 공기로 건조시키며 항률 건조기간(constant drying rate)중에 대상물질의 표면온도가 T_m , 습도가 H_m 이라 할 때 항률 건조속도는 다음과 같이 표현된다.

$$R_c = -\frac{dW}{dt} = k(H_m - H) = \frac{h_t}{m} (T - T_m) \quad (57)$$

여기서, h_t 는 총괄 열전달 계수(overall heat transfer coefficient), k 는 물질전달 계수, m 는 T_m 에 대응되는 증발 잠열(latent heat of vaporization)이다.

건조 대상물질을 건조하면서 재료의 중량 감소를 그래프로 그리면 그림 14과 같다. 이 그림에서 I은 예열기간, II는 항률(constant rate) 건조기간, III는 감률(falling-rate) 건조기간을 나타낸다. 함수율의 변화 곡선의 각 부분에 대한 기울기로부터 건조속도의 변화를 알 수 있고 이것을 도시하면 그림 15와 같다.

건조속도를 그림 16과 같이 표현할 수도 있다. 시간이 지남에 따라 수분함량은 그래프 A처럼 건조대상물질이 기화온도까지 가열되는 예열 기간 후에는 직선적으로 감소하며, 수평방향으로 곡선을 그리다가 평평해진다. 건조속도는 그래프 B와 같다. 처음에 건조속도가 약간 증가하다가 중간부분에서 수평을 나타내는데 이것은 건조속도가 일정함을 나타낸다. 그 후 감소하다가 물질이 평형 수분함량에 이르렀을 때에는 건조속도가 0에 도달한다.

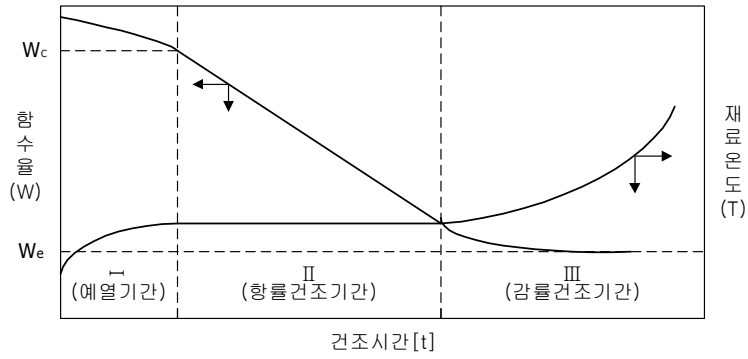


그림 14 건조실험 곡선(W_e : 평형함수율, W_c : 한계함수율)

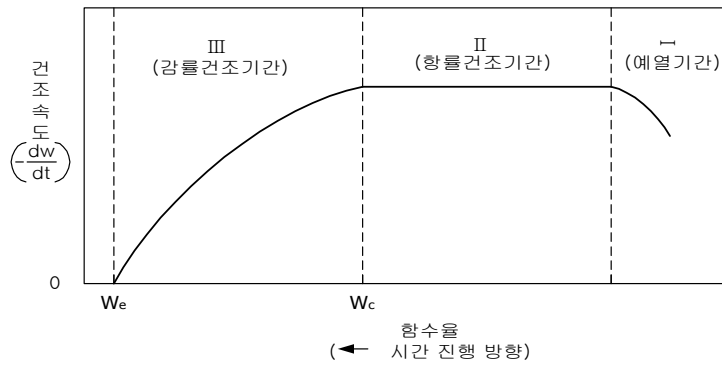


그림 15 건조 특성 곡선(W_e : 평형함수율, W_c : 한계함수율)

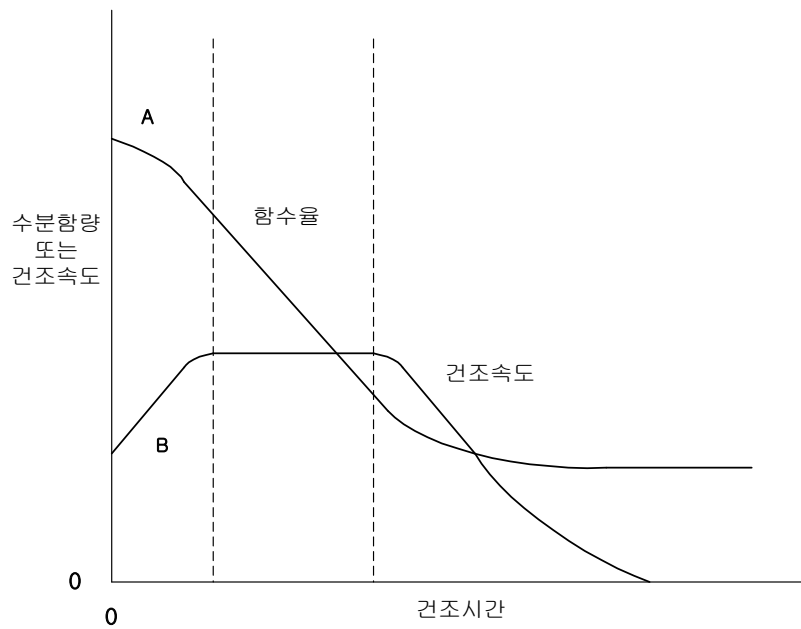


그림 16 건조시간에 따른 수분함량(A) 및 건조속도(B)의 변화

생물 공정제품을 건조할 때 흔히 생기는 문제점은 표면경화(surface hardening), 화학적 탈수(chemical dehydration) 및 단백질 변성(protein denaturation)이다. 초기에 건조가 너무 빠르게 진행되어 건조된 겉껍질이 형성된 것이 표면경화인데 그 결과 내부가 미처 건조되지 않은 상태에서 건조가 중지된다. 이 문제는 초기 건조속도를 늦추면 해결될 수 있다. 화학적 탈수는 국부적으로 지나치게 가열이 되어 생기는 현상이다. 이 문제 역시 건조속도를 천천히 해주면 된다. 생물 제품의 건조시 가장 심각한 문제인 단백질 변성인데 변성속도는 건조온도, 시간 및 수분함량의 함수로서 흔히 1차 속도식을 따른다고 가정한다. 변성되지 않은 단백질의 함량을 [P]라 하면

$$\frac{d[P]}{dt} = k_0 e^{-E/RT} [P] \quad (58)$$

여기서 k는 속도상수로서 다음과 같은 온도의 함수이다.

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (9.59)$$

변성을 줄이기 위해 고온에서 짧은 시간을 건조하던가, 저온에서 오랜 시간을 건조할 수 있는데 대개 후자의 경우가 더 효과적이다.

건조장치

발효 생성물의 건조에 사용되는 건조기의 주요 형태는 열풍건조기(hot air dryer), 진공건조기(vacuum dryer), 동결건조기(freeze dryer), 분무건조기(spray dryer) 등이 있다.

- 1) 진공판 건조기(vacuum tray dryer)는 가열된 선반(shelf)을 사용하여 진공에서 건조하며 보통 제약 생성물에 사용된다.
- 2) 동결건조(freeze drying)는 얼어 있는 용액으로부터 승화에 의해 수분을 제거하는 방법으로 항생제, 효소액, 박테리아 현탁액 등에 사용된다.
- 3) 회전통 건조기(rotary-drum dryer)는 증기로 가열된 회전통의 표면 위에 용액을 얇은 막의 형태로 공급하여 열전도에 의해 수분이 제거된다. 결정용액에 사용하기에 좋지 않다.
- 4) 분무 건조기(spray dryer)는 생성물용액을 분사구(nozzle)를 통해 가열된 용기로 분무시키는 것으로 용기 내의 뜨거운 기체가 액체를 증발시킨다.
- 5) 기류수송식 건조기(pneumatic conveyor dryer)는 입자를 부유시키고 이동시키는 데 뜨거운 공기의 흐름을 사용한다. 이 시스템은 표면건조에는 잘 적용되지만, 확산에 의한 수분제거가 필요한 큰 다공성 입자(porous particles)의 건조에 필요한 건조시간을 제공하지 못한다.