

<제12회>

食品工學計算法

卜 裕 亮

<延世大 工大 食品工學科 教授>

5. 증 발

증발(evaporation)은 일반적으로 수용액을 끓는 점까지 가열하여 수분을 氣化시켜 제거하여 농축된 용액을 얻는 조작을 말한다. 식품공업에서 증발은 설탕, 우유, 과일 주우스의 농축등에 이용되고 있으며 원료의 성질에 따라 여러가지 형태의 증발기가 사용되고 있다.

증발에는 많은 에너지가 필요로 하므로 최근에는 大型化, 多重效用化, 증발된 증기의 再利用化가 적극적으로 이루어지고 있다.

5-1. 증기압과 끓는 점 오름

5-1-1. 증기압

순수한 액체의 증기압과 온도 사이에는 다음의 Clausius-Clapeyron式이 성립된다.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T(v_g - v_l)} \quad (5-1)$$

여기서 ΔH_v 는 증발열, v_g 와 v_l 는 각각 증기와 액체의 比容積(specific volume)이다. 액체의 비용적을 무시하고 온도 T_1 및 T_2 에서의 증기압을 각각 P_1 및 P_2 라 하면

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (5-2)$$

이 식은 주어진 온도에서 증기압을 알고 있을 때 임의의 다른 온도에서의 증기압을 계산하는데 이용된다.

[예제 5-1] 100°C, 대기압에서 물의 증발열은 2,257 kJ/kg이다. 80°C에서 물의 증기압을 구하라.

(풀이) 식 (5-2)에서 $P_1=101.35\text{kPa}$, $\Delta H_v=2,257 \times 18 \text{ kJ/kgmol}$, $T_1=373.2 \text{ K}$, $T_2=353.2 \text{ K}$, $R=8.314 \text{ kJ/kgmol} \cdot \text{K}$ 이므로

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 \exp \left[-\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] \\ &= 101.35 \exp \left[-\frac{2,257 \times 18}{8.314} \left(\frac{1}{353.2} - \frac{1}{373.2} \right) \right] \\ &= 48.3 \text{ kPa} \end{aligned}$$

5-1-2. 끓는점 오름

수용액의 끓는 점은 동일 압력에서 물의 끓는 점보다 높는데 수용액의 끓는점과 물의 끓는 점과의 차를 끓는 점 오름(boiling point rise)이라 한다.

대부분의 식품에서 가용성 고형분은 고분자 유기물로서 끓는 점 오름은 Rault의 법칙을 이용하여 다음의 근사식으로 구할 수 있다.

$$\Delta T_b = 0.51m \quad (5-3)$$

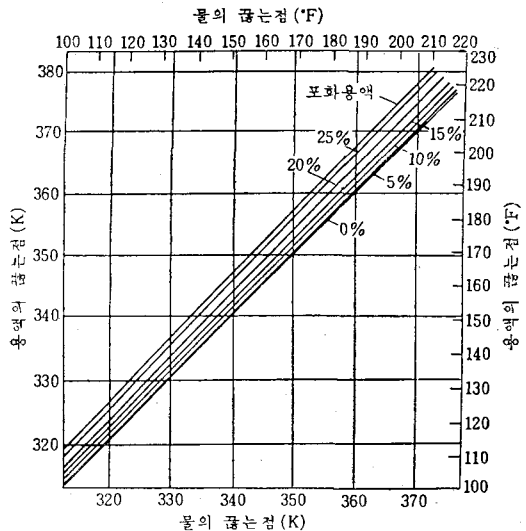


그림 5-1. 물의 끓는 점의 함수로서 소금물 용액의 끓는점(Dühring lines)

여기서 m 은 용질의 몰랄 농도이다.

그러나 이 근사식은 적용 범위가 좁다. 실제 용액의 끓는 점은 Dühring의 법칙이란 실험 법칙으로부터 근사적으로 구할 수 있다. Dühring 법칙은 용액의 끓는 점과 순수한 용매의 끓는 점 사이에는 직선 관계가 성립한다는 것으로, 그림 5-1에 그 보기를 나타내었다.

용액의 끓는 점은 용질의 존재에 의해서 뿐만 아니라 깊이에 따라 끓는 점 오름이 생긴다. 즉, 어떤 압력에서 액체가 끓을 때 표면의 액은 그 압력에 상당하는 끓는점에서 끓으나 표면보다 깊은 곳의 액체는 그 깊이의 액층에 상당하는 靜水壓(hydrostatic pressure)만큼 큰 압력을 받게 되므로 액면에서의 끓는 점 보다 높은 온도에서 끓는다. 액체의 깊이 h 에 의하여 작용하는 압력 P_h 는 다음 식으로 주어진다.

$$P_h = \rho gh \quad (5-4)$$

여기서 ρ 는 액체의 밀도, g 는 중력 가속도이다.

[예제 5-2] 20wt% 소금물의 대기압 및 20 kPa (160mmHg)에서의 끓는 점을 각각 구하라.

(풀이) 물의 대기압에서의 끓는 점은 100°C이므로 그림 5-1에서 373 K에서 수선을 올려 20wt%선과 만나는 점에서 왼쪽의 소금물의 끓는 점을 읽으면 378 K이다. 즉 105°C로서, 끓는 점 상승은 105-100=5°C이다. 20 kPa에서 물의 끓는 점은 333 K(60°C)이므로 같은 방법으로 소금물의 끓는 점을 구하면 337 K(64°C)이다.

[예제 5-3] 내부 압력이 33.8 kPa(절대)인 증발기에서 액면보다 1.514m 아래에 있는 용액의 끓는 점을 구하라. 이 용액의 밀도는 933 kg/m³이며, 고형분으로서 포도당을 30% 함유하고 있다.

(풀이) 포도당의 분자량은 180이므로 몰랄농도를 구하면

$$m = \frac{0.3/180}{0.7/1000} = 2.38$$

식 (5-3)에 의하여 끓는 점 오름 ΔT_b 는

$$\Delta T_b = 0.51(2.38) = 1.21^\circ\text{C}$$

1.524 m 아래의 액면에 작용하는 절대압은 액면 표면에 작용하는 압력과 靜水壓을 합한 것이므로

$$P = 33.8 \times 10^3 + (933)(9.80665)(1.524) \\ = 47.7 \times 10^3 \text{ Pa}$$

수증기 표에서 47.7×10³ Pa에서의 물의 끓는 점은 80.15°C이다.

따라서 용액의 끓는 점은 80.15+1.21=81.36°C이다.

[예제 5-4] 어떤 증발기에서 물을 증발시킨다. 액면에서의 압력이 760 mmHg 및 100mmHg인 경우에 액체 깊이 1m 위치에서의 물의 끓는 점을 각각 구하라.

(풀이) 식 (5-4)에서 물기둥에 의한 압력을 수은 기둥의 압력으로 바꾸면

$$P_h = \rho_{\text{Hg}} g h_{\text{Hg}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} g h_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$h_{\text{Hg}} = \left(\frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{Hg}}} \right) h_{\text{H}_2\text{O}} = \left(\frac{1.00}{13.6} \right) (1000) \\ = 73.5 \text{ mmHg}$$

따라서 1 m 위치에서의 절대 압력은 760+73.5=833.6 mmHg이며 수증기 표에 의하면 이 압력에서 물의 끓는 점은 102.6°C이다. 따라서 끓는 점 오름은 102.6-100=2.6°C이다.

같은 방법으로 액면의 압력이 100 mmHg일 때

$$100 + (1,000)(1.0/13.6) = 173.5 \text{ mmHg}$$

이 압력에 상당하는 물의 끓는 점은 63.2°C이다. 100mmHg에서 물의 끓는 점은 51.6°C이므로 끓는 점 오름은 63.2-51.6=11.6°C이다.

이 예제에서 알 수 있는 것처럼 액체 깊이에 의한 끓는 점 오름은 감압 상태일 수록 현저하므로 진공 증발에서 주의하여야 한다.

5-2. 단일효용 증발기의 계산

단일 효용 증발기의 모형을 그림 5-2에 나타내었다. F, V, L, S 는 각각 공급액량, 발생

증기량, 농축액량 및 수증기량(kg/h)이며, H 와 h 는 각각 기상 및 액상의 엔탈피를 나타낸다.

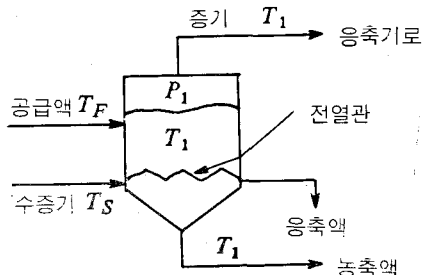


그림 5-2. 단일효용증발기의 개략도

그리고 x 는 고형분의 질량 분율(mass fraction)이다. 증발기 내의 압력은 P_1 (Pka), 용액의 끓는 점은 T_1 , 증발기에서 액의 손실, 끓는 점 오름, 외부로의 열손실을 무시하면 물질 및 열수지식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{전체 물질 수지} \quad F=L+V \quad (5-5)$$

$$\text{고형분에 대한 물질수지} \quad Fx_F=Lx_L \quad (5-6)$$

엔탈피 수지

$$Fh_F+Sh_S=Lh_L+VH_V+Sh_s \quad (5-7)$$

수증기는 잠열 λ 만을 공급한다고 하면 전열 속도식은

$$q=S(H_s-h_s)=S\lambda=UA(T_s-T_1) \quad (5-8)$$

[예제 5-5] 연속單一效用 증발기에 1.0wt%의 소금물용액을 73.8°C에서 9072 kg/h의 유량으로 공급하여 1.5wt%까지 농축하고자 한다. 증발기 내부의 압력은 101.325 kPa(1.0 atm절대)이고, 사용하는 포화수증기의 압력은 143.3kPa(절대)이며, 증발기의 총괄열전달계수 $U=1704 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ 이다. 소요 수증기량과 전열면적을 구하라. 단, 용액은 끓기 때문에 물의 끓는점과 동일하다고 가정한다.

(풀이) 식(5-5)와 (5-6)에 의하면

$$9072=L+V$$

$$(9072)(0.01)=L(0.015)$$

$$L=6048 \text{ kg/h}, \quad V=3024 \text{ kg/h}$$

공급액의 비열 $C_{pF}=4.14 \text{ kJ/kg} \cdot \text{°C}$ 라 가정한다. 식(5-7)에 의하여 엔탈피 수지식을 쓰기 위하여 증발기 내의 끓는점 즉 100°C를

기준 온도(datum temperature)로 잡으면 H_v 는 단순히 100°C에 물의 증발잠열이 되며, 이를 수증기 표에서 구하면 2257 kJ/kg이다. 그리고 기준온도가 100°C이므로 h_L 은 0이 된다. 공급액의 엔탈피는

$$h_F=C_{pF}(T_F-T_1)=4.14(37.8-100)$$

수증기는 잠열만 공급한다고 하면 수증기표에서 143.3 kPa(포화온도 110°C) 수증기의 잠열은 2230 kJ/kg 즉,

$$H_s-h_s=2230$$

따라서

$$9072(4.14)(37.8-100)+S(2230)$$

$$=6048(0)+3024(2257)$$

$$S=4108 \text{ kgsteam/h}$$

식(5-8)에 의하여

$$q=S\lambda=UA(T_s-T_1)$$

$$=4108(2230)(1000/3600)$$

$$=(1704)(A)(110-100)$$

$$A=149.3 \text{ m}^2$$

[예제 5-6] 고형분 10%의 원료액을 250kg/h의 유량으로 단일효용증발기에 연속적으로 공급하여 30%로 농축하려고 한다. 증발기의 내부압력은 77 kPa(절대)이고 수증기의 압력은 200 kPa(게이지)이다. 이 증발기의 총괄열전달계수가 $1700 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{°C}$ 일 때 시간당 소비되는 수증기량과 필요한 전열면적을 구하라. 공급액의 온도는 18°C, 77 kPa(절대)에서 용액의 끓는 점은 91°C이며, 용액의 비열은 4.186 kJ/kg, 용액의 증발열은 동일조건에서 물의 증발열과 같다고 가정한다.

(풀이) 수증기표에 의하면 200 kPa(게이지) 수증기의 응축온도는 134°C, 응축잠열은 2164 kJ/kg, 77 kPa(절대)에서 잠열은 2281 kJ/kg, 응축온도는 91°C이다.

먼저 물질수지를 취하면 식(5-5)와 (5-6)에 의하여

$$250=L+U$$

$$(250)(0.1)=L(0.3)$$

$$L=83 \text{ kg/h}, \quad V=167 \text{ kg/h}$$

이 예제에서는 [예제 5-5]와는 달리 증발기 중

의 용액의 끓는점이 91°C로서 수증기의 응축 온도 134°C보다 상당히 낮기 때문에 응축액이 포화온도로 나가는 것이 아니라 냉각되어 배출될 것이므로 이때 공급되는 현열을 무시하지 않고 고려하며 수증기 1kg이 공급할 수 있는 열량은

$$(H_s - h_s) = \text{잠열} + 91^\circ\text{C까지 냉각되면서 방출하는 현열}$$

$$= 2164 + 4.186(134 - 91) = 2340 \text{ kJ}$$

기준온도를 91°C로 잡고 엔탈피수지를 취하면

$$250 \times 4.186(18 - 91) + S(2340) = 83(0) + 167(2281)$$

$$S = 995 \text{ kg/h}$$

물 1kg을 증발시키는데 소비된 수증기량
 $= 195/167 = 1.17 \text{ kg steam/kg water}$

식(5-8)에서

$$q = S(H_s - h_s) = UA(T_s - T_1)$$

$$(195)(2340)(1000/3600) = 1700 \times A$$

$$(134 - 91)$$

$$A = 1.74 \text{ m}^2$$

[예제 5-7] 과일주우스를 강제순환형 증발기에서 10%에서 40%까지 농축하려고 한다. 주우스의 공급유량은 2497 kg/h이며, 가열에 사용한 수증기의 응축온도는 121.1°C이고, 증발기 내의 발생 증기의 온도가 54.4°C가 되도록 조업한다. 주우스의 비열은 2679 J/kg·K이고, 공급온도는 51.7°C이며, 증발기의 총괄열전달계수는 2839 W/m²·K이다. 수증기 경제성과 필요한 전열면적을 구하라. 끓는점 오름의 계산에서 가용성고형분은 6탄당이라 가정한다.

(풀이) 먼저 물질수지를 취하면

$$2497 = L + V$$

$$2497(0.1) = L(0.45)$$

$$L = 555 \text{ kg/h}, V = 1942 \text{ kg/h}$$

식(5-3)에 의하여 끓는점 오름을 계산한다.

$$m = \frac{45/180}{55/1000} = 4.545$$

$$\Delta T_b = 0.51(4.545) = 2.32$$

증발기에서 배출되는 농축액의 온도는 증기의 온도와 끓는점오름을 합한 온도 즉, (54.4

+ 2.32) = 56.72°C이다.

엔탈피수지의 기준 온도를 51.7°C로 잡으면 $h_F = 0$ 이며, h_L 는 다음과 같아진다.

$$h_L = C_p(56.72 - 51.7)$$

$$= 2.679(56.72 - 51.7)$$

수증기표에서 54.4°C에서 증기의 엔탈피는 2679 kJ/kg이고 51.7°C 물의 엔탈피 216 kJ/kg 이므로

$$H_V = H(54.4^\circ\text{C 증기}) - h(51.7^\circ\text{C 물})$$

$$= 2679 - 216$$

또한 수증기표에서 121.1°C 수증기의 응축 잠열은 2199 kJ/kg이고, 응축액은 포화온도에서 나간다고 가정하면

$$2467(0) + S(2199) = 555 \times 2.679(56.72$$

$$- 51.7) + 1942(2679 - 216)$$

$$S(2199) = 4790609$$

$$S = 2178 \text{ kg/h}$$

$$(4790609)(1000/3600) = 2839 \times A(12.1$$

$$- 56.72)$$

$$A = 7.28 \text{ m}^2$$

수증기 경제 = 1942/2178 = 0.89 kg H₂O/kg steam

5-3. 응축기

응축기에는 표면응축기와 접촉응축기가 있다. 표면응축기는 shell and tube heat exchanger와 같이 금속벽을 사이에 두고 열교환을 한다. 이에 대하여 접촉식 응축기는 barometric leg condenser에서와 같이 증기와 냉각수가 직접 접촉하여 응축된다.

만약 접촉 응축기에 온도 T_2 의 증기가 V kg/h로 공급되고 냉각수의 유량은 W kg/h이고 T_1 에서 들어와 T_2 로 나간다고 하면 다음과 같이 열수지식을 쓸 수 있다.

$$VH_s + WC_p(T_1 - T_0) = (V + W)C_p(T_2 - T_0) \quad (5-9)$$

여기서 T_0 는 기준온도이고 H_s 는 수증기표에서 구한 온도 T_s 인 증기의 엔탈피이다.

$$\frac{W}{V} = \frac{\text{kg water}}{\text{kg vapor}} = \frac{H_s - C_p(T_2 - T_0)}{C_p(T_2 - T_1)} \quad (5-10)$$

[예제 5-8] 20 kPa(절대)의 감압 상태에서 5000kg/h의 물을 증발시키는 증발기에서 발생하는 증기를 응축시키기 위하여 젯트응축기(jet condenser)를 사용한다. 냉각수의 공급온도는 18°C이고 응축기에서 허용 최고 배출온도는 35°C일 때 소요 냉각수량을 구하라.

(풀이) 수증기표에서 20 kPa 압력에서 $H_s=2609.6$ kJ/kg이고, 응축온도는 60°C이다. 물의 비열은 4.186 kJ/kg이므로 식(5-10)에 의하여

$$W=5000\left[\frac{2609.6-4.186(35-0)}{4.186(35-18)}\right]$$

$$=1.7 \times 10^5 \text{ kg/h}$$

[예제 5-9] 예제 5-8에서 젯트 응축기와 같은 조건에서 조작되는 표면 응축기의 전열면적을 구하라. 응축기의 총괄열전달계수 $U=2270$ W/m²·°C로 가정한다.

(풀이) 온도차가 크지 않으므로 산술평균 온도차를 사용하여도 된다. 산술평균온도차는

$$(60-18)/2+(60-35)/2=33.5^\circ\text{C}$$

앞의 예제에서 제거하여야 할 열량

$$5000[2609.6-4.186(35)](1000/3600)$$

$$=2270 \times A \times 33.5$$

$$A=45\text{m}^2$$

이 크기의 전열면적을 가진 응축기는 대단히 큰 것이다. 따라서 접촉식 응축기가 유리하다.

[예제 5-9] 고품분 12%의 토마토 쥬우스를 길이 3 m, 지름 4 cm의 상승박막형 증발기에서 고품분 28%까지 농축한다. 토마토쥬우스의 최대 허용온도는 57°C이고 쥬우스는 이 온도에서 증발기에 공급된다. 증발기의 재킷에

공급되는 수증기의 압력도 170 kPa(절대)이고, 증발기의 총괄열전달계수가 6000 J/m²·s·°C이라면 1시간당 공급하여야 하는 원료 쥬우스의 유량을 구하라. 전열면적은 높이 3 m, 지름 0.04 m로 생각한다. 또한, 발생하는 증기는 응축시키기 위하여 barometric leg condenser에 공급하여야 하는 냉각수량과 barometric leg의 수주의 최소 높이를 구하라. 냉각수는 18°C에서 공급되며, 허용 최고 배출온도는 32°C이다.

(풀이) (a) 원료 쥬우스 100kg을 기준으로 물 질수지를 취하면 $L=43\text{kg}$, $V=57\text{kg}$ 이다.

$$\text{증발기의 전열면적}=\pi \times 0.04 \times 3=0.38\text{m}^2$$

수증기표에서 170 kPa(게이지) 수증기의 응축온도는 115°C이다. 증발기의 전열식

$$q=UA\Delta T$$

$$=6000 \times 0.38 \times (115-57)=1.32 \times 10^5 \text{ J/S}$$

원료 쥬우스 1kg당 증발에 필요한 열량

$$=0.57 \times 2366 \times 10^3=1.34 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{증발되는 양}=\frac{1.32 \times 10^5}{1.34 \times 10^6}=0.1\text{kg/s}$$

$$\text{따라서 원료공급량}=\frac{360}{1} \times 0.1=36\text{kg/h}$$

(b) 수증기 표에서 57°C에서 포화수증기의 절대압은 17.43 kPa이고 $H_s=2604$ kJ/kg이다.

Barometric leg의 수주에 의하여 작용하는 압력은 대기압에서 증발기 내부의 압력을 뺀 것과 맞먹어야 하므로

$$\Delta P=101.3-17.43=83.87 \text{ kPa}$$

$$h=\frac{\Delta P}{\rho g}=\left(\frac{83870 \text{ kg}\cdot\text{m}}{\text{S}^2\cdot\text{m}^2}\right)/(995\text{kg/m}^3)$$

$$(9.8\text{m/s}^2)=8.6\text{m}$$

$$\text{발생증기량 } V=(57)(360/100)=205.2\text{kg/h}$$

$$W=205.2\left[\frac{2604-4.186(32-0)}{4.186(32-18)}\right]=8649\text{kg/h}$$

서로 서로 지킨질서 맑은마음 밝은마음