

증류탑의 설계

1. 증류 공정의 설계 순서

1.1 설계 조건의 정리

먼저 원료와 제품의 규격을 알고 처리용량을 어느 정도 할 것인가를 정한 후 운전방법(회분/연속 조업), 자동화 정도를 결정한다.

1.2 문헌조사

처리하고자 하는 유체에 관한 기액평형, 비열, 증발잠열, 점도, 표면장력, 열전도도 등의 물성과 반응 여부, safety에 관한 자료 및 부식 data를 조사한다.

1.3 공정도 작성

control loop가 포함된 공정도를 작성하고 물질 및 열수지를 계산한다.

1.4 단수 및 reflux ratio 결정

간단한 2성분계인 경우는 기액평형도를 작성하고 결정하고 다성분계인 경우는 Simulation program을 이용하여 단수 및 reflux ratio를 결정한다.

1.5 증류탑 설계

증류탑은 증류공정의 핵심부이므로 탑 내부의 조건을 정확히 예측하여서 tray와 column을 설계한다. tower size 및 tray는 hydraulics를 이용하여 계산한 후 주변상황을 고려하여 설계한다.

1.6 부속장치 설계

공정도에 포함된 모든 장치를 설계한다. 주요 장치인 condenser와 reboiler는 feed condition의 변화를 고려하여 안전하게 설계해야한다.

1.7 Equipment lay-out

동력비, 배관비, 설치비 및 미관을 고려해서 작성한다.

1.8 P & I 작성

배관 size와 장치의 크기 및 위치, valve의 종류, 계기등 공장건설에 필요한 모든 자료가 포함되어야 한다.

1.9 사양서 작성

장치, 기계류, 계장, 배관에 필요한 자재들을 제작 또는 구매할 수 있도록 사양서를 상세하게 작성한다.

1.10 Manual 작성

공정, 조업방법, start-up, shut-down, 비상조치 방법 등을 상세하고 알기 쉽게 작성한다.

2. 증류탑의 선정방법

2.1 증류탑의 분류

증류탑은 그 구조에 따라 그림 2.1과 같이 나눌 수 있다. 이중에서 현재 가장 많이 이용되고 있는 것은 crossflow plate이다.

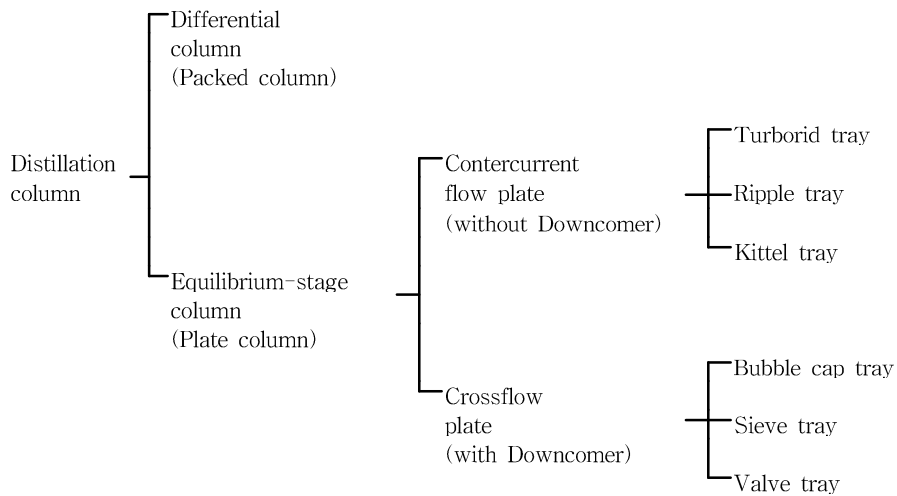


그림 2.1 증류탑의 분류

2.2 Column 선정방법(Packed 및 plate column의 비교)

packed column에서는 기액 간의 물질전달이 연속으로 행해지며 plate column에서는 기액 간 접촉이 stage-wise하게 이루어진다. 이 두 종류의 column은 기액의 접촉방법 뿐만 아니라 구조도 다르므로 design engineer는 유체의 foamability, 부식성 및 허용되는 압력 손실 등의 system factor를 참고하여 column을 선정하여야 한다.

1) packed column 선정

- column diameter가 작을 경우 (600 ϕ 이하)
- foam이 잘 형성되는 유체를 취급하는 경우
- 부식성이 있는 유체를 취급할 경우
- 낮은 압력 손실이 요구되는 경우
- liquid hold-up이 커서는 안 될 경우

(System control의 응답시간이 짧아야 하거나 취급하는 유체가 열적으로 불안정한 경우에는 liquid hold-up이 작아야한다.)

2) Plate column 선정

- feed load가 변하는 경우
- suspended solid나 sludge 등이 함유된 유체를 취급할 경우
- 증류공정 중 열이 발생하여 이를 제거하기 위해 column 내에 cooling coil을 설치해야 할 경우
- liquid 유량이 vapor 유량에 비해 작을 경우
- 단수가 많이 필요한 경우

System factor 이외에도 column 선정에 고려해야 할 사항으로 maintenance, 설치비등이 있다.

2.3 Tray with downcomer

1) Bubble cap tray

30 ~ 40년 전까지 많이 이용되었던 tray로 현재에는 Sieve tray 또는 Valve tray로 대체되고 있다. Plate, riser, cap, downcomer 등으로 구성되어 있으며, bubble cap의 구조는 그림 2.2과 같다.

- 장 점
 - 역사가 길어 그 성능에 대해 신뢰성이 높다.
 - 부하의 변동에 따른 탄력성이 있다.
- 단 점
 - 구조가 복잡하고 제작비가 비싸다.
 - 압력손실이 크다.
 - 기액의 접촉 면적이 bubble cap 주위에 한정되어 있어 탐경이 커지므로 경제적이다.



그림 2.2

2) Sieve tray

그림 2.3에서 보는 바와 같이 downcomer와 1 ~ 20mm 직경의 hole이 일정한 간격으로 배치되어 있는 plate로 구성되어 있는 것으로 perforated tray라고도 한다. 구조가 간단하고 제작비가 낮기 때문에 현재 가장 많이 이용되고 있다.

- 장 점
 - 구조가 간단하므로 경제적이다.
 - 압력 손실이 적다.
 - tray 전체에서 기액 접촉이 균일하게 일어나기 때문에 효율이 좋다.
- 단 점
 - 부하의 변화에 따라 효율이 현저하게 감소한다.
 - 부식성이 있는 유체에는 부적당하다.

그림 2.3

3) Valve tray

Ballast tray, flexi tray, float valve tray 등이 이 형식의 tray에 속한다. 부하의 변화에 따라 valve lift가 자동으로 조절되므로 부하의 변동에 따른 plate 효율이 거의 감소하지 않는다는 특징을 가지고 있다.

- 장 점

- 구조가 비교적 간단하다.
- 부하의 변동에 따른 탄력성이 있다.

- 단 점

- Valve가 항상 움직이므로 부식, 마모가 일어나기 쉽다.

① Ballast tray

Glitsch 사가 개발한 것으로 구조는 그림 2.4와 같다.

② Flexi tray

Koch engineering Co. 가 개발한 것으로 구조는 그림 2.5와 같다.

③ Float valve tray

Nutter Co. 가 개발한 것으로 구조는 그림 2.6과 같다.

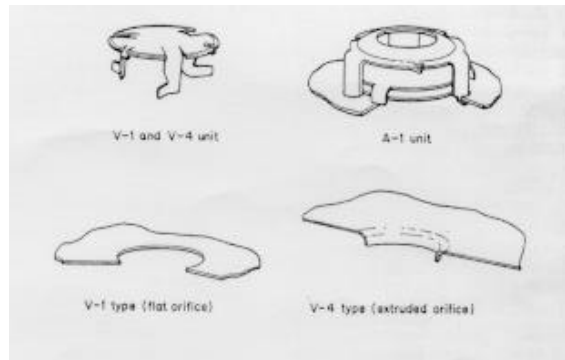


그림 2.4 ballast tray

그림 2.5 flexi tray

그림 2.6 float valve tray

4) Tray 의 성능 비교

bubble cap, sieve tray, valve tray의 성능을 비교하여 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 Comparison of tray types

Tray type	Capacity	Turndown	Efficiency	Cost
Bubble cap	Third	Second	Third	Third
Sieve tray	Second	Third	Second	First
Valve tray	First	First	First	Second

2.4) Tray without downcomer

1) Turbogrid tray

- Shell development Co. 가 개발한 것으로 그림 2.7과 같은 구조로 되어 있다.

액체와 증기는 폭이 3 ~ 4mm 정도인 slit을 통하여 하강하고 상승하여 기액의 유동상황은 잘 밝혀져 있지 않으나 tray 효율은 40%에서 최고 75% 정도 되는 것으로 알려져 있다.

- 장 점

- 구조가 간단하므로 제작비가 낮다.
- tray 청소가 용이하다.

- 용량이 크다.
- 압력 손실이 작다. (tray 당 1.5 mmHg 정도)

그림 2.7

2) Ripple tray

Stone and Webster사가 개발한 것으로 구조는 그림 2.8과 같다.

부의 구멍으로는 증기가 상승하고 부의 구멍으로는 액체가 하강한다.

효율은 60 ~ 80% 정도로 양호한 편이며 plate가 파형으로 되어 있어 강도가 좋아 직경이 3 ~ 4m 인 대형의 tray에도 보강을 할 필요가 없다.

- 장 점

- 구조가 간단하다.
- 압력 손실이 작다.
- 효율이 높다.
- 처리 용량에 대해 탄력성이 있다.

그림 2.8 ripple tray

3) Kittel tray

Kittel과 Schneider가 개발한 것으로 구조는 그림 2.9와 같다.

원심형 (B)와 구심형 (A)의 Plate가 교대로 설치되어 있으며 경사진 Solt의 상측을 따라 증기가 상승하고 하측으로는 액체가 하강한다.

- 장 점

- 기액의 접촉이 좋다.
- 비말 동반이 거의 없으므로 tray spacing이 좁아도 된다.
- tray 위의 액이 구심 또는 원심 유동을 하므로 고형분이 함유되어 있는 유제에도 적용 가능하다.

그림 2.9 kittel tray

3. Tray hydraulics

column을 제대로 설계하기 위해서는 tray hydraulics를 알아야 한다.

tray hydraulics는 column의 크기, 압력 손실 등 설계에 관한 정보를 제공해 준다. 본 장에서는 computer를 이용하여 tray hydraulics를 계산할 수 있도록 그림으로 표시되어 있는 자료들을 문헌조사하여 수식으로 나타내 보았다.

그림 3.1에 tray hydraulics를 위한 bubble cap tray의 schematic diagram을 도식하였다. (sieve tray와 valve tray의 schematic diagram은 bubble cap tray와 비슷하므로 생략한다.)

3.1 Foaming

tray dynamics에 있어서 system의 foaming property는 매우 중요하다.

foaming을 나타내는 척도로는 물질이 aeration 되었을 때 액체가 팽창하는 정도를 나타내는 foamability와 aeration에 의해 형성된 foam이 소멸되는 속도와 관계있는 foam stability가 있다.

물질전달 속도는 기액간의 접촉면적에 비례하여 증가하므로 foam이 잘 생성되는 물질, 즉 foamability가 큰 물질이 물질전달이 잘 된다. 그러나 foamability가 너무 크면 entrainment나 flooding을 일으키기

쉬워 단 효율을 떨어뜨리는 역효과를 가져올 수 있다.

foam stability는 downcomer 설계 시 매우 중요한 인자로 foam이 잘 소멸되지 않는 물질을 취급할 경우에는 downcomer의 부피를 크게하여 foam이 거의 소멸될 정도의 체류시간을 주어야 한다. foamability와 foam stability의 예측은 대단히 어렵기 때문에 실험이나 문헌을 통해 system의 foaming 정도를 알아 내어야 한다.

표 3.1에 foaming 정도에 따른 foaming factor의 값을 보였다.

표 3.1 Foaming System Factors

<i>Service</i>	<i>Example</i>	<i>System factor</i>
Non-foaming	Hydrocabons, regular systems	1.00
Fluorine	Freon, BF ₃	0.90
Moderate foaming	Oil absorbers, amine regenerators	0.85
Heavy foaming	Amine absorbers	0.73
Severs foaming	MEK units	0.60
Foam-stable systems	Caustie regenerators	0.30

3.2 Column 운전 범위

column이 효율적으로 운전되기 위해서는 운전조건 즉, liquid rate와 vapor rate가 적절한 범위 내에 있어야 한다. 그림 3.2에 liq. , vapor 유량에 따른 plate column의 안전 조업 범위를 표시하였다.

운전 조업범위의 형태와 크기는 tray의 종류에 따라 다르다.

그림 3.2에서 보는 바와 같이 column의 maximum allowable capacity는 flooding에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

flooding은 liquid rate가 상대적으로 큰 경우에 일어나는 entrainment flooding과 liquid rate가 상대적으로 큰 경우에 일어나는 downflow flooding으로 나눌 수 있다.

또 column의 minimum allowable capacity는 weeping에 의해 결정되는데 valve tray에서는 weeping이 일어나기 쉬우므로 주의를 요한다.



그림 3.2

flooding 또는 weeping이 일어나면 column의 압력 손실이 급격하게 증가하고 단 효율이 현저하게 감소하므로, column 설계 시에는 feed flow rate가 어느 정도의 범위에서 변화할 것인지를 예측하여 이 범위에서 flooding이나 weeping이 일어나는지 확인해 보아야 한다.

3.3 Tray spacing

tray spacing은 tray의 조립방법, 탑의 열손실, 탑의 높이, hold-up 등 여러 인자에 의해 결정되나 일반적으로 표 3.2와 같이 탑경으로 결정하는 것이 보통이다.

표 3.2 탑경에 따른 tray spacing (unit : mm)

탑경 \ 형태	sieve tray	bubble cap tray	valve tray
750 ~ 1500	300 ~ 450	450 이상	300 ~ 450
1500 이상	600 ~ 900	600 ~ 900	600 ~ 900

* feed plate 또는 man-hole이 있는 단은 600 이상

cryogenic process와 같이 열손실이 매우 작아야 하는 공정에서는 tray spacing을 150이하로 한다. 표 3.2는 경험을 토대로 작성되었기 때문에 이것을 기준으로 정한 tray spacing이 적절한 지 downcomer backup(h_{dc})을 계산하여 확인해 보아야 한다.

$$downcomer\ backup(h_{dc}) = liq.\ phase\ drop(h_{dc}) + vapor\ phase\ drop(h) \quad (3.1)$$

h_{dc} 는 clear liquid를 기준으로 한 것이므로 downcomer aerated liquid height(h_{fd})는 h_{dc} 를 froth density(ψ)로 나누어야 한다. ψ 값은 0.5이상이다.

$$h_{fd} = h_{dc} / \psi \leq 2 h_{dc} \quad (3.2)$$

h_{fd} 가 tray spacing(h_{ts})보다 크면 liquid가 윗 단으로 역류하므로 tray spacing은 h_{fd} 보다 커야 된다.

$$h_{ts} > h_{fd} \quad (3.3)$$

3.4 column diameter

column diameter를 구하는 방법은

column diameter는 tray를 통과하는 증기의 최대허용 속도, 즉 flooding velocity로부터 구할 수 있다.

1) Fair's method

flooding point에서 column의 net area(A_{nf})는 다음 식으로 표시된다.

$$A_{nf} = \frac{Q \sqrt{\rho_v / (\rho_l - \rho_v)}}{C_{sb}} \quad (3.4)$$

C_{sb} 는 capacity parameter로 Fair의 flood-capacity graph (그림 3.3)나 이 graph에서 유도한 식 (3.5)에서 구할 수 있다.

$$C_{sb} = \text{the smaller of } \begin{cases} 0.118 \exp(0.0479 h_{ts}) \\ 0.425 \exp(0.0479 h_{ts}) [0.1092 - 0.058 \ln(F_{lv})] \end{cases} \quad (3.5)$$

F_{lv} 는 liquid-vapor flow parameter로 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$F_{lv} = \frac{w}{W} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}} = \frac{LM_l}{VM_v} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}} \quad (3.6)$$

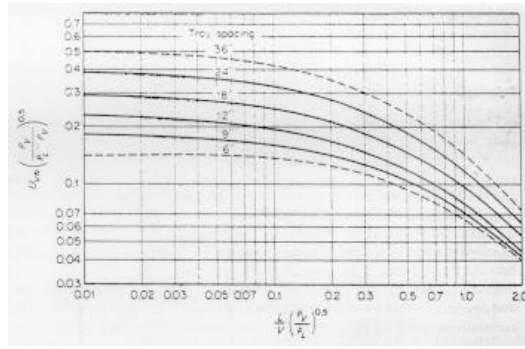


그림 3.3 Generalized correlation of flooding on crossflow plate

그림 3.3이나 식(3.5)는 다음과 같은 몇 가지의 제약 하에서 사용이 가능하다.

- foaming이 잘 일어나지 않는 system
- weir height (tray apacing의 15%)
- weir 사이이 면적의 대부분이 active area일 것
- $\sigma = 20$ dynes/cm

그러므로 실제 column의 net area (A_n)는 식(3.4)에서 구한 A_{nf} 를 보정해 주어야 한다.

$$A_n = \frac{A_{nf}}{F_f S_f \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2}} \quad (3.7)$$

위 식에서 F_f 는 flood factor이며 S_f 는 표 1에 보인 바 있는 foaming factor이다.

sieve tray의 경우에는 hole area / active area = 0.1 이라는 제약이 더 있으므로 추가 보정하여야 한다.

$$A_n = \frac{A_{nf}}{F_f S_f \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} a_f} \quad (3.8)$$

식(3.8)에서 a_f 는 hole area (A_h) / active area (A_a) 와 관계 있는 factor이다.

A_h / A_a	a_f
0.10	1.00
0.08	0.90
0.06	0.80

A_n 이 계산되면 column diameter(D_t)를 구할 수 있다.

예를 들어 splash baffle이 없는 single crossflow plate에서는 downcomer area를 A_d 라 하면 column area(A_t)는 다음과 같은 관계식으로 표시된다.

$$A_t = A_n + A_d$$

$$A_d \approx 0.1 A_t$$

$$A_t = \frac{A_n}{0.9}$$

그러므로 column diameter는 다음과 같이 된다.

$$D_t = \sqrt{\frac{4 A_t}{\pi}}$$

2) Glitsch's method

① Active area

fooding point에서 column의 active area (A_{af})를 다음과 같은 식으로부터 구한다.

$$A_{af} = \frac{Q\sqrt{\rho_v / (\rho_l - \rho_v)} + q' L_f / 1083}{C_{sb}} \quad (3.9)$$

C_{sb} 는 그림 3.4나 이 그림을 수식화 한 식(3.20)으로부터 구한다.

$$C_{sb} = \text{the smaller of } \begin{cases} (h_{ts})^{0.65}(\rho_v)^{0.167}/12 \\ 0.3174 + 0.04122(h_{ts} - 12)^{0.483} - 10^{-6}\rho_v(245 + 661h_{ts}) \\ 0.595 - 0.0596\rho_v \end{cases} \quad (3.10)$$

$$L_f = \frac{0.75 D_t}{N_p}$$

D_t 와 N_p 는 각각 tower diameter와 no. of flow path이다.

실제 필요한 active area (A_a)는 A_{af} 를 보정 하여야 한다.

$$A_a = \frac{A_{af}}{F_f S_f \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} a_f} \quad (3.11)$$

그림 3.4 flood capacity of tray

② Downcomer area

Downcomer area(A_d)는 다음 식으로 구한다.

$$A_d = \text{the smaller of } \begin{cases} 0.11 A_a \\ q' / (VD_{dsg} F_f) \end{cases} \quad (3.12)$$

VD_{dsg} 는 downcomer design velocity로 그림 3.5 또는 이것을 수식화한 식(3.13)을 이용하여 구한다.

VD_{dsg} 의 단위는 gpm/ft^2 이다.

$$VD_{dsg} = \text{the smaller of } \begin{cases} 250S_f \\ 41\sqrt{\rho_l - \rho_v} S_f \\ 7.5\sqrt{h_{ts}(\rho_l - \rho_v)} S_f \end{cases}$$

그림 3.5 downcomer design velocity

③ Column area와 column diameter

column area와 column diameter는 다음과 같은 방법으로 결정한다.

$$A_t = \text{the large of } \begin{cases} A_a + 2A_d \\ \frac{Q\sqrt{\rho_v / (\rho_l - \rho_v)}}{0.78 C_{sb} F_c S_f \left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2} a_c} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$D_t = \sqrt{4 A_t / \pi} \quad (3.15)$$

entrainment는 vapor에 의해 아랫단에서 윗 단으로 이동한 liquid의 양으로 정의되며, plate efficiency를 떨어뜨리고 휘발도가 낮은 성분을 탑정으로 올라가게 해서 top product의 순도를 낮게 하는 요인으로 작용한다.

entrainment를 e 라 할 때 fractional entrainment (ψ) 다음 식으로 표시된다.

$$\psi = \frac{e}{L + e}$$

ψ 는 유량, 밀도, flood factor의 함수로 그림 3.6이나 이것을 수식화한 식(3.16)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\psi = \exp[-(6.692 + 1.956 F_f)(F_{lv})^{(-0.132 + 0.654 F_f)}] \quad (3.16)$$

위에 설명한 바와 같이 ψ 를 계산하여 이 값이 0.15 이하가 되도록 하는 것이 바람직하다.

그림 3.6 Fractional entrainment

3.6 Weeping

증기의 속도가 어떤 값 이하가 되면 weeping이 일어나서 단 효율이 급격히 저하한다. weeping는 bubble cap이나 valve tray에서는 거의 문제가 되지 않으나 sieve tray에서는 중요한 요인이 된다.

증기의 속도는 명확하게 규정하기는 어려우나 근사적으로 추정할 수 있다.

Fair는 Hutchinson과 Mayfield의 실험결과 (그림 3.7)를 이용하여 weeping point에서는 다음과 같은 관계식을 만족한다고 제안하였다.

$$h_h + h_\sigma = 0.35 (h_w + h_{ow})^{0.573} \quad (3.17)$$

그러므로 3.7절과 3.8절에서 h_h , h_σ , h_{ow} 를 계산하여 식 (3.17)의 좌변이 우변보다 크면 weeping이 일어나지 않는다고 볼 수 있다.

따라서 tray 설계식에는 이 점을 유의해야 한다.

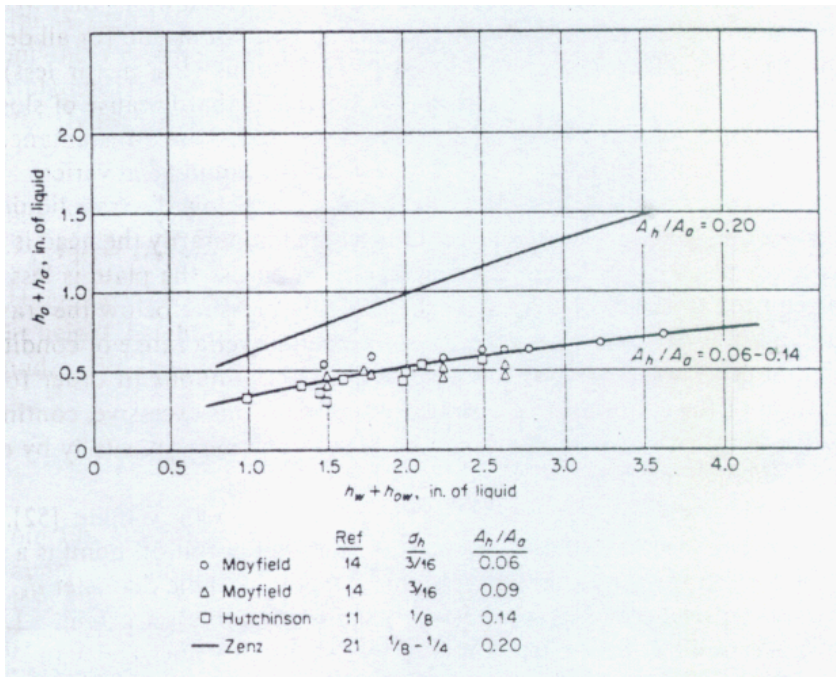


그림 3.7 weeping, sieve trays

3.7 Liquid phase drop

liquid phase drop(h_s)은 그림 3.1에서 보는 바와 같이 weir height(h_w) liquid gradient(Δ), downcomer apron head loss(h_{da}), liquid crest over weir(h_{ow})의 합으로 표시된다.

$$h_s = h_w + h_{ow} + \Delta + h_{da} \quad (3.18)$$

h_{ow} , h_{da} 는 tray 형태에 관계 없으므로 일반적인 식으로 표시가 가능하나 Δ 는 tray 형태에 따라 다르므로 각각의 경우에 대해 설명하기로 한다.

1) liquid crest over weir

① straight segmental weir인 경우

$$h_{ow} = 0.48 F_w \left(\frac{q'}{l_w} \right)^{2/3} \quad (3.19)$$

위 식에서 F_w 는 보정계수로 multipass tray인 경우는 1로 가정하여도 Bolles의 관계식 (3.20)을 이용하여 구하면 된다.

$$\frac{q'}{(L_w)^{2.5}} = 485 \left[\frac{\sqrt{1 - (R_w)^2 / (F_w^2)} - \sqrt{1 - (R_w)^2}}{R_w - F_w} \right] \quad (3.20)$$

$$R_w = L_w / D_t$$

그림 3.8 weir correction factor for segmental downcomers

② notched segmental weir인 경우

notch 위를 액이 차서 흐를 경우에는 식(3.21)을 액이 다 차지 않을 경우에는 식(3.22)를 이용하여 구

한다.

$$q' = 1.2 \frac{l_w}{h_n} [h_{ow}^{5/2} - (h_{ow} - h_n)^{5/2}] \quad (3.21)$$

$$h_{ow} = 0.96 \left(\frac{q' h_n}{l_w} \right)^{2/5} \quad (3.22)$$

③ Circular weir인 경우

$h_{ow} < 0.2 d_w$ 일 경우에는 식 (3.23)을 $0.2d_w < h_{ow} < 1.5d_w$ 일 경우에는 식 (3.24)를 이용한다.

$$h_{ow} = 0.18 \left(\frac{q'}{d_w} \right)^{2/3} \quad (3.23)$$

$$h_{ow} = 0.13 \left(\frac{q'}{d_w} \right)^2 \quad (3.24)$$

2) downcomer apron head loss

$$h_{da} = 0.03 \left(\frac{q'}{100A_{da}} \right)^2 \quad (3.25)$$

만약 inlet weir가 있으면 식(3.25)로 구한 h_{da} 의 약 20%를 증가하여야 한다.

3) liquid gradient

tray에서 액이 흐르는 길이가 길 경우에는 상류와 하류의 액면의 차, 즉 liquid gradient(Δ)를 무시할 수 없다. Δ 는 liquid depth, skirt clearance, bubble 간격, 액유량 등 여러 인자의 영향을 받는다.

Δ 가 크면 vapor maldistribution과 liquid weeping이 일어나게 된다. bubble cap tray에서는 Δ 가 큰 영향을 미치나 sieve 또는 valve tray에서는 Δ 의 영향은 무시할 정도이다.

① bubble cap tray에서의 Δ

Devies가 다음과 같은 식을 발표하였다.

$$\Delta = C_v \Delta'$$

triangular pitch인 경우에는 $R_{cc}=1$ 이다.

C_d 와 C_v 는 상수로 그림 3.9와 그림 3.10을 이용하여 구한다.

그림 3.9 Liquid gradient factor

그림 3.10 Vapor-load correction factor for liquid gradient

② Sieve 또는 valve tray에서의 Δ

Hughmark - O'Connell이 Hucks - Thomson, Hutchinson의 실험결과를 분석하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$\Delta = \frac{fU_f^2 L_f}{12gR_h} \quad (3.28)$$

$$R_h = \frac{h_f D_f}{2h_f + 12D_f} \quad (3.29)$$

$$D_f = \frac{D_t + D_w}{2} \quad (3.30)$$

$$U_f = \frac{12q}{h_f \phi D_f} = \frac{12q}{h_l D_f} \quad (3.31)$$

f는 Reynolds no. (R_{eh})와 h_w 의 함수로 그림 3.11을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_{eh} = \frac{R_h U_f \rho_l}{\mu_l} \quad (3.32)$$

식 (3.31)에서 h_l 에 대한 것은 3.8절에서 언급하기로 한다.

그림 3.1 Friction factor for froth crossflow trays

3.8 Vapor phase drop

Vapor phase drop은 tray 종류에 따라 다르므로 각각의 tray에 대해 설명하기로 한다.

1) bubble cap tray 의 경우

Vapor phase drop (h_l)

$$= \text{dry cap drop}(h_{cd}) + \text{slot opening} (h_{so}) + \text{aerated liquid head}(h_{al})$$

① dry cap drop (h_{cd})

Dauphine 이 제안한 식은 다음과 같다.

$$h_{cd} = h_r + h_{ra} \quad (3.34)$$

h_r 과 h_{ra} 는 각각 vapor가 riser를 통과할 때의 head loss의 cap을 통과할 때의 head loss로 식(3.34), 식 (3.35)로 표시된다.

$$h_r = 0.111 \frac{d_r}{\rho_l} \left(\sqrt{\rho_v} \frac{Q}{A_r} \right)^{2.09} \quad (3.34)$$

$$h_{ar} = \frac{0.68}{\rho_l} \left(\frac{2a_r^2}{a_e a_c} \sqrt{\rho_v} \frac{Q}{A_r} \right)^{1.71} \quad (3.35)$$

Bolles가 발표한 식은 다음과 같다

$$h_{cd} = K_c \frac{\rho_v}{\rho_l} \left(\frac{Q}{A_r} \right)^2 \quad (3.36)$$

K_c 는 dry-cap coefficient로 그림 3.12를 이용하여 구하면 된다.

computer를 이용하여 h_{cd} 를 구하고자 하는 경우에는 그림 3.12를 수식화하여야 하므로 Bolles 방법은 불편하다.

[그림 3.12 Dry-cap head-loss coefficient]

② Slot opening(h_{so})

Rogers 와 Thiele가 Slot opening을 계산하는 식을 발표하였으며 후에 Winn과 Bolles가 이 식을 단순화하였다.

이들에 의하면 trapezoidal slot 의 Slot opening은 다음과 같은 식을 사용하여 구할 수 있다고 하였다.

$$Q = 2.36 \frac{A_s}{h_{st}} \sqrt{\frac{r_l - r_v}{r_v}} \left\{ \frac{2}{3} \left[\frac{R_s}{1 + R_s} \right] h_{so}^{\frac{3}{2}} + \frac{4}{15} \left[\frac{1 - R_s}{1 + R_s} \right] \frac{h_{so}^{\frac{5}{2}}}{h_{st}} \right\} \quad (3.27)$$

$$R_s = \frac{d_{st}}{d_{sb}}$$

rectangular slot와 triangular slot는 trapezoidal slot의 특수한 형태로 Rs가 각각 1과 0이다.
 식 (3.27) 대신에 그림 3.13을 이용하여 h_{so}를 구할 수도 있다.

[그림 3.13 Generalized correlation for slot opening]

③ Aerated liquid head (h_{al})

Fair, Foss-Gester, Hughmark-O'conell등이 h_{al}을 구하는 식을 발표하였다.

. Fair의 방법은 다음과 같다

$$h_{al} = b \left(h_w + h_{ow} + \frac{\Delta}{2} \right)$$

β는 그림 3.14 또는 이 그림을 근사적으로 만족하는 식 (3.28)을 사용하여 구할 수 있다.

$$b = 0.977 - 0.619 F_{va} + 0.341 F_{va}^2 - 0.0636 F_{va}^3 \quad (3.28)$$

$$F_{va} = U_a \sqrt{r_v}$$

[그림 3.14 Aeration factor for crossflow trays]

. Foss 와 Gerster는 다음 식을 제안하였다.

$$h_{al} = 0.24 + 0.725 h_w - 0.29 h_w U_a \sqrt{r_v} + 0.01 \frac{L_f}{A_a} q' \quad (3.29)$$

. Hughmark과 O'conell이 제안한 식은 다음과 같다.

F_{va} ≥ 1.4 인 경우

$$h_{al} = 0.377 + 0.955 \left(h_w + h_{ow} \right) - 0.22 \left(h_w + h_{ow} \right)^2 + 0.024 \left(h_w + h_{ow} \right)^3 - h_s \quad (3.29)$$

F_{va} < 1.4 인 경우

$$h_{al} = 0.374 + 1.12 \left(h_w + h_{ow} \right) - 0.266 \left(h_w + h_{ow} \right)^2 + 0.027 \left(h_w + h_{ow} \right)^3 - h_s \quad (3.29)$$

bubble cap tray에서는 h_σ의 값은 무시해도 된다.

2) sieve tray인 경우

vapor phase drop(h_v) = dry hole drop(h_h) + surface tension head(h_σ)

① dry hole drop(h_h)

Hughmark-O'conell, Hunt, Leibson등이 발표한 식이 있다.

. Hugmark-O'conell의 식

$$h_h = 0.186 \frac{r_v}{r_l} \left(\frac{U_h}{C_{vo}} \right)^2 \quad (3.32)$$

C_{vo}는 dryorifice coefficient로 그림 3.15 나 이것을 수식화한 식 (3.33)을 이용하여 구하면 된다.

$$C_{vo} = \frac{880.6 - 67.7 \left(\frac{d_h}{t_l} \right) + 7.32 \left(\frac{d_h}{t_l} \right)^2 - 0.338 \left(\frac{d_h}{t_l} \right)^3}{1000 \sqrt{1 - \left(\frac{A_h}{A_a} \right)^2}} \quad (3.33)$$

[그림 3.15 discharge coefficients for vapor flow, sieve trays, {I.Liebson, R.E.Kelley and L.A. Bullington, Petrol. Refiner, 36(2), 127(February, 1957);36(3),288(1957)}]

. Leibson의 식

$$h_h = 0.186 \frac{r_v}{r_l} \left(\frac{U_h}{C_{vo}} \right)^2 \quad [3.32]$$

$$C_{vo} = \left[0.836 + 0.273 \frac{t_v}{d_h} \right] \left[0.674 + 0.717 \frac{A_h}{A_a} \right] \quad [3.34]$$

② surface tension head(h_s)

$$h_s = \frac{0.04s}{r_l} \quad [3.35]$$

③ Aerated liquid head(h_{al})

bubble cap tray의 경우와 동일하다.

3) valve tray (ballast tray)의 경우

vapor phase drop(h_t) = dry valve drop(h_v) + aerated liquid head(h_{al})

① dry valve drop(h_v)

valve가 완전히 열리지 않는 경우에는 h_v 는 valve weight에 비례하여 valve가 완전히 열리는 경우에는 h_v 는 hole을 통과하는 증기의 속도의 제곱에 비례한다.

h_v 는 그림 (3.16)이나 이것을 수식화한 식 (3.36)을 이용하여 구한다.

$$h_v = \text{the larger of } \left\{ \begin{array}{l} 1.35 t_m \frac{\rho_m}{r_l} + K_1 U_h^2 \frac{r_v}{r_l} \\ K_2 U_h^2 \frac{r_v}{r_l} \end{array} \right. \quad [3.36]$$

식 (3.36)에서

ρ_m = valve metal density (lb/ft³)

t_m = valve thickness (in)

U_h = vapor velocity through valve (ft/sec)

K_1, K_2 = coefficient

이다

K_1, K_2 의 값을 표 3.3에 t_m 과 ρ_m 의 값을 표 3.4에 나타내었다.

표3.3 Pressure Drop Coefficients

Type of unit	K1	K2 for deck thickness(A.A. Units)				K1	K2 [SI Units]			
		14G (0.74 in)	12G (0.104 in)	10G (0.134 in)	0.25		14 s.w.g (1.88 mm)	12 s.w.g (2.65 mm)	10 s.w.g (3.3 mm)	1 in (6.35 mm)
v-1	0.2	1.05	0.92	0.82	0.55	5.46	28.7	25.1	22.4	15.8
v-4	0.1	0.5	0.39	0.38	-	2.73	13.6	10.6	10.4	-

표3.4 Data for Materials of Construction

Gauge	Thickness		Density of Valve Materials		
	(in)	(cm)	Metal	ρ_m (lb/ft)	ρ_m (kg/m ³)
20	0.037	0.094	Mild steel	480	7700
18	0.050	0.127	Stainless steel	510	8180
12	0.104	0.264	Titanium	283	4540
10	0.134	0.340	Hastelloy	560	8980
1in	0.250	0.635	Aluminium	168	2695
			Copper	560	8980
			Lead	708	11350

[그림 3.16 Ballast tray valve drop]

② aerated liquid head(h_{al})

bubble cap tray 의 경우와 동일한 식으로 표시할 수 있다.

3.9 Downcomer dynamics

1) downcomer backup(h_{dc})

downcomer backup 은 vapor phase drop(h_t)과 liquid phase drop(h_s)의 합으로 표시된다.

$$h_{dc} = h_t + h_s \quad \text{[3.37]}$$

h_{dc} 는 clear liquid를 기준으로 한 것이므로 downcomer의 aerated liquid height(h_{fd})는 h_{dc} 를 froth density(φ)로 나누어야 한다

$$h_{fd} = \frac{h_{dc}}{\varphi} \quad \text{[3.38]}$$

φ 의 값은 0.5이상으로 예측되므로 h_{fd} 는 h_{dc} 의 2배 이하이다.

따라서 tray spacing은 h_{dc} 의 2배 이상이며 충분하다.

$$h_{ts} \geq 2h_{dc}$$

2) liquid residence time in downcomer (t_{dc})

downcomer로 들어가는 액은 기포를 포함하고 있으므로 기포를 없애기 위해서는 액을 downcomer내에서 3sec, 발포성이 심한 액은 5sec이상 체류시간은 다음 식을 이용하여 구한다.

$$t_{dc} = \frac{A_d h_{fd} / 12}{q / j} = \frac{A_d h_{dc}}{12q} \quad \text{[3.39]}$$

3) liquid throw over weir(d_{tw})

downcomer로 흘러 들어가는 액은 기포가 적은 것이 바람직하다.

d_{tw} 가 column wall과 weir사이의 간격보다 크면 액이 벽면에 부딪쳐서 사이의 간격을 넓히거나 anti-jump baffle을 설치하는 것이 좋다.

d_{tw} 는 다음 식으로 계산된다.

$$d_{tw} = 0.8 \sqrt{h_{ow} h_{ff}} \quad \text{[3.40]}$$

$$h_{ff} = h_{ts} - h_w - h_{fd} \quad \text{[3.41]}$$

4. Column 설계 방법

4.1 설계일반

column 설계에서 designer가 결정해야 할 사항들을 표 4.1에 column 설계에 필요한 자료들을 표 4.2 - 표 4.9 와 그림 4.1 - 그림 4.2 에 수록하였다

표4.1 Check list of Design Items for Bubble-cap, Perforated, and Valve Tray

Column
<ol style="list-style-type: none"> 1. Operating temperature and pressure 2. Reflux ratio 3. Number of trays 4. Feed and draw off trays location 5. Column diameter 6. Tray spacing
Tray
<ol style="list-style-type: none"> 7. liquid-flow arrangement or tray type 8. Active area 9. Downcomer type, area, and clearance 10. Tray outlet weir type, height, and length 11. Tray inlet weir, type, height, and length (if any) 12. Tray outlet splash baffle, antijump baffles 13. Tray and weir level tolerances 14. Materials of construction

For specific types of trays

Bubble cap	Perforated	Valve
15. Bubble-cap diameter number	15. Free hole area	15. Size holes and valve type
16. Cap layout, pitch, and spacing	16. Hole size, pitch, pattern	16. Number of valves and spacing
17. skirt clearance	17. Tray thickness	17. Tray thickness
18. Static seal	18. Hole blanking	
19. Riser dimensions		
20. Tray baffles		
21. Tray drain holes		
22. Leakage		

4.2 Recommended Limits : Tray and Column Design

	Bubble-cap trays		Perforated trays	Valve trays[4]
Column	1-24 ft		1-24 ft	1-24 ft
Diameter	80-85% NF		80-85% NF	82% NF
Basis: %flood	70-75% NF		70-75% F	60% F
				77% vacuum service
				65-75% col. diam, 3.0ft
Tray spacing	Fig. 13.21		Fig 12.21	12-36in
	12-48 in		12-36in	Col. diam 2.0-4.0ft:12-18in
	Col. diam 2.5-4.0ft:18in		Col. diam 2.0-4.0ft:12-18in	Col. diam 5.0-24ft:24-36in
	Col. diam 5.0-24ft:24-36in		Col. diam 5.0-24.0ft:24-36in	Check:liquid backup, entrainment
	Check:liquid backup, entrainment		Check:liquid backup, entrainment	
Tray	(Table 14.3)		(Table 14.3)	
Flow arrangement	Cross flow		Cross flow	Cross flow
General	DP. cascade		DP	5-6ft DP
Med. diam 6-112ft	Multiple pass, cascade		Multiple pass	8-15ft multiple pass
large diam 12-24ft	Bubble cap diam	Tray diam	Hole diam:	Standard manufacture
Tray layout	3in	2.5-4.0ft	Hole area:6-15% Col. area	Specification, in
	4in	5-16ft	Spacing:pitch/hole diam 2-4	diam. holes
	6in	16ft and over	Tray thickness:16page to ¼in	Special up to 6in
	Slot area 10-20%, Col. area			Tray thickness:1/14-1/4in
	Spacing 1-3in, between caps			
	Pattern equilateral triangular			
	Skirt clearance 0.5-1.5in			
	Cap clearance		Hole clearance:	
	Cap-tower wall, 1.5in, min		Hole-tower wall, 1.5in	
	Cap-weir, 3.0in, min		Hole-weir, 2.0in. min	
	Cap-apron, 3.0in, min		Hole-apron, 2.0in. min	
	Ave. dynamic seal, h_{ds}		Ave. dynamic seal h_{ds}	Ave. dynamics at h_{ds}
	Vacuum, 0.5-1.5in		Vacuum, 0.5-0.60in	Vacuum, 0.5-0.75in
	Atmospheric, 1.0-2.5in		Atmospheric, 0.5-1.5in	Atmospheric, 1.0-2.5in
	50-100psig, 1.5-3.0in		Pressure, 1.5-3.0in	Pressure, 2.0-6.0in
	200-500paig, 2.0-4.0in			
	Solt opening $w_s=0.25-0.5in$			
	$h_s=1.0-1.5in$			
Downcomers				
Type	Segmental		Segmental	Segmental
Apron	Vertical		Vertical	Vertical
Liquid				
Residence				
Time	5 sec, min, F		5 sec, min, F	5 sec, min, F
	3 sec, min, NF		3 sec, min, NF	3 sec. min, NF
Liquid velocity	0.3-1.0fps		0.3-1.0fps	0.5-3.0fps
Apron clearance	Weir to baffle distance, to 6ft-0.5in		weir height	Seal area:½-⅓ downcomer area
	Weir to baffle distance, 6-12ft-1.0in			
	Weir to baffle distance, over 12ft-1.5in			

	Bubble-cap trays	Perfurated trays	Valve trays[4]
Weirs-outlet			
Type	Segmental	Segmental	Segmental
Height	2.0-6.0in	1.0-3.0in	0.75-3in
Adjustment	1.0-2.0in	1.0-2.0in	1.0-2.0in
Length, %col. diam	Cross flow, 60-75%	Cross flow, 60-75%	Cross flow, 60-75%
	DP. 50-60%	DP. 50-60%	DP, 50-60%
	Center, 8-12in, wide	Center, 8-12in, wide	Center, 8-12in, wide
Intermediate	Optional hw \geq h liquid downstream	Not recommended	Not recommended
Splash battles	Optional, bottom 2-3in, above	Optional, bottom 2-3in, above	Optional, recommended for
	outlet weir	outlet weir	high vapor reates
Antijump baffles	Recommended for DP trays		
	Extend to elevation of top of weir	Extend to elevation of top of weir	Extend to elevation of top of weir
		Not recommended	Not recommended
	Height 2 \times clear head, min		
Miscellaneous			
Drainholes	diam. 4sq in./100sq ft tray area	Not recommended	Not recommended
Leakage	Max. fall 1in. below top of weir	-	-
	in 20min with drain holes plugged		
Construction tolerances	1/4 in. max	1/4 in. max	1/4 in. max
Tray lever	1/8 in. max	1/8 in. max	1/8 in. max

- * NF - nonfoaming
F - foaming
DP - double pass

☒ 4.3 Tray-type Selection Based on Liquid-handling capacity

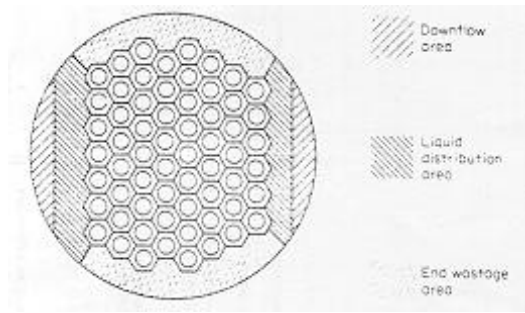
Tower diameter, ft	Reverse	Cross	Double pass	Cascade double pass
3	0-30	30-200	-	-
4	0-10	40-300	-	-
6	0-50	50-400	400-700	-
8	0-50	50-500	500-800	-
10	0-50	50-500	500-900	900-1400
12	0-50	50-500	500-1000	1000-1600
15	0-50	50-500	500-1100	1100-1800
20	0-50	50-500	500-1100	1100-2000

- * Range of liquid capacity, gallons minute

☒ 4.4 Approximate Distribution of Area as Percent of Tower Area

Tower diameter ft	Downflow area		Liquid dist. area			End wastaget
	Cross	Double pass	Cross	Double pass	Cascade double pass	
3	10-20	-	10-25	-	-	10-30
4	10-20	-	8-20	-	-	7-22
6	10-20	20-30	5-12	15-20	-	5-18
8	10-20	18-27	4-10	12-16	-	4-15
10	10-20	16-24	3-8	9-13	20-30	3-12
12	10-20	14-21	3-6	8-11	15-25	3-10
15	10-20	12-18	2-5	6-9	12-20	2-8
20	-	10-15	-	5-7	9-15	2-6

- * Allocated cap area(active area)
=tower area-(downflow area \div liquid distribution area-end wastage)
From Fig 4.1



[그림 4.1 Area designations-bubble-cap plate]

[그림 4.2 Tray types by liquid paths]

표 4.5 Tray Design Guide for Bubble Caps

<p>Materials of Construction</p> <p>TypeLight gage metal</p> <p>Material.....Determined by corrosion conditions</p>	<p>Tray Dynamics</p> <p>Mean slot opening</p> <p>Maximum.....100% slot height</p> <p>Manium.....0.5in</p> <p>Mean dynamic slot submergence</p> <p>Vacuum operation.....0.25-1.5in</p> <p>Atmosphere.....0.50-2.0in</p> <p>50-100psig.....1.0-3.0in</p> <p>200-500psig.....1.5-4.0in</p> <p>Vapor distribution ratio(Δ/h_c).....0.5maximum</p> <p>Height clear liquid in downcomers</p> <p>.....50% downflow height, maximum</p> <p>Downflow residence time.....5 seconds, minimum</p> <p>Liquid throw over weir.....60% downflow width, maximum</p> <p>Pressure drop.....As limited by process</p>
<p>Tray Type</p> <p>General use.....Cross-flow</p> <p>Low L/V ratio.....Reverse-flow</p> <p>High L/V or large towers.....Double-pass</p> <p>Very high L/V or very large towers.....Double-pass, cascade</p>	<p>Tray Spacing</p> <p>For towers 2.5-10ft.....18in</p> <p>For tower 4-20ft.....24in</p> <p>Miscellaneous Design Factors</p> <p>Inlet weirs.....Use as required for liquid distribution</p> <p>Intermediage weirs;</p> <p>Minimum height > height liquid downstream</p> <p>Reverse-flow baffles;</p> <p>Minimum height twice clear liquid</p> <p>Redistribution baffles</p> <p>Location;</p> <p>All rows where end space is 1in>cap spacing</p> <p>Clearance to caps.....Same as cap spacing</p> <p>Height.....Twice height clear liquid</p> <p>Downflow baffle seal</p> <p>Weir to baffle < 5ft.....0.5in</p> <p>Weir to baffle 5-10ft.....1.0ft</p> <p>Weir to baffle >10ft.....1.5in</p> <p>Tray design deflection(structural).....$\frac{1}{8}$in</p> <p>Drain holes</p> <p>Size.....$\frac{3}{8}$-$\frac{5}{8}$in</p> <p>Area.....4 sq. in/100 sq. ft. tray area</p> <p>Leakage.....Max. fall 1.0in. from top of weir in 20 min with drain holes plugged</p> <p>Construction Tolerances</p> <p>Tray levelness.....$\frac{1}{8}$ inch Max. under 36inch Dia.</p> <p>3/16 inch Max. 36-60inch Dia</p> <p>Weir levelness.....$\pm 1/16$in</p>
<p>Downcomers and weirs</p> <p>Downcomer type.....Segmental</p> <p>Downflow battle.....Vertical</p> <p>Weirs for normal loads.....Straight</p> <p>Weirs for low loads.....Notched</p> <p>Length:Cross-flow trays, % Tower Dia.....60-70%</p> <p>Length:Double pass trays, % Tower Dia.....50-60%</p> <p>Downcomer width for double-pass trays.....8-12in</p>	
<p>Bubble-caps</p> <p>Norman size for;</p> <p>2.5-3 ft. towers.....4in</p> <p>4-10 ft. towers.....4in</p> <p>1.0-2.0 ft. towers.....6in</p> <p>Design.....Use suggested standards</p> <p>Pitch.....Equil. triangular, rows normal to flow</p> <p>Spacing.....1-3in</p> <p>Fastening.....Removable design</p> <p>Clearances</p> <p>Cap to tower wall.....1.5 in minium</p> <p>Cap to weirl.....3 in minium</p> <p>Cap to downcomer or downflow baffle.....3 in minium</p>	

** Bolles, W.L., Petroleum Processing, and as modified by this author.

☿ 4.6 Bubble-cap size Slot Area

Cap. size. in.	S_c/d_c			
	0.25	0.3125	0.375	0.50
3	0.39	0.35	0.32	0.27
4	0.56	0.33	0.30	0.25
6	0.29	0.26	0.24	0.20

* Ratio:slot/allocated cap area.

$$\frac{\text{distance between cap walls}}{\text{Cap diameter}} = \frac{s_e}{d_e}$$

☒ 4.7 Proposed Standard Bubble-cap Designs

	Carbon steel, in.			Alloy steel, in.		
	3	4	6	3	4	6
Cap						
U.S. Standard gage	12	12	12	16	16	16
OD, in.	3.093	4.093	6.093	2.999	3.999	5.999
ID, in.	2.875	3.875	5.875	2.875	3.875	5.875
Height over-all, in.	2.500	3.000	3.750	2.500	3.000	3.750
Number of solots	20	26	39	20	26	39
Type of slots	Trpzl.	Trpzl.	Trpzl.	Trpzl.	Trpzl.	Trpzl.
Slot width, in.						
Bottom	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
Top	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167
Slot height, in.	1.000	1.250	1.500	1.000	1.250	1.500
Height shroud ring, in.	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
Riser						
U.S. Standard gage	12	12	12	16	16	16
OD, in.	2.093	2.718	4.093	1.999	2.624	3.999
ID, in.	1.875	2.500	3.875	1.875	2.500	3.875
Standard heights, in.						
0.5in. skirt height	2.250	2.500	2.750	2.250	2.500	2.750
1.0in. skirt height	2.750	3.000	3.250	2.750	3.000	3.250
1.5in. skirt height	3.250	3.500	3.750	3.250	3.500	3.750
Riser-slot seal, in.	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
Cap areas. sq. in.						
Riser	2.65	4.80	11.68	2.65	4.80	11.68
Reversal	3.99	7.30	17.40	4.18	7.55	17.80
Annular	3.05	5.99	13.95	3.35	6.38	14.55
Slot	5.00	8.12	14.64	5.00	8.12	14.64
Cap	7.50	13.15	29.0	7.07	12.60	28.3
Reversal/riser	1.50	1.52	1.49	1.58	1.57	1.52
Annular/riser	1.15	1.25	1.20	1.26	1.33	1.25
Slot/riser	1.89	1.69	1.25	1.89	1.69	1.25
Slot/cap	0.67	0.62	0.50	0.71	0.65	0.52

☒ 4.8 Recommended Standard Trays

Tower diameter and flow arrangement, %	Up to 6 ft-cross	Over 6 ft-double pass
A _v /A	10	10
A _s /A	17	17
A _d /A	12	12
A _A /A	76	76
l _w /D _s side	77	62
l _w /D _s center	-	97
Z _{L.vb} /D	64	30

* Caps have 4-in diameter

☒ 4.9 Recommended Limits for Sieve Trays

Data	Cross flow	Double pass
Tray diameter, ft	1-8	8-12
d_h , hole diameter, in.		
p_h , hole pitch, in.	2.5-3.0	2.5-3
h_w , weir height, in.	1.0-2.0	1.0-2.0
l_w/D_s , weir length/tower dia.,side	0.68-0.76	0.55-0.63
l_w/D_s , center	-	0.97
A_d/A	0.08-0.12	0.08-0.12
A_b/A	0.06-0.12	0.06-0.12
A_N/A	0.92-0.88	0.92-0.88
A_V/A	0.84-0.76	0.84-0.76
A_A/A	0.84-0.76	0.84-0.76
t_v gage	12-14	12-14

4-2 설계순서

1. 기액평형관계를 이용하여 reflux ratio, 단수, feed plate를 결정한다.
2. 2장을 참조하여 bubble cap, sieve, valve 중 tray를 어느것으로 할것인지 정한다.
3. 표 4.3을 이용하여 tray type을 선정한다.
4. trayspacing을 가정하고 active area 또는 net area를 계산한다.
foaming
5. 표 4.4를 이용하여 tower area를 정한다.
6. tower dia. 를 계산하고 가정한 tray spacing이 적절한지 check 한다
7. 표 4.2를 이용하여 tray-layout을 한다.
bubble cap tray 인 경우는 표 4.5-표 4.8 을 추가 이용한다.
8. 3장을 참고하여 tray hydraulics를 계산한 후 column이 제대로 설계되어 있는지 아래의 조건과 표 4.2를 이용하여 check 한다.
 - . bubble cap tray < 80%
 - % flooding < 0.15
 - slot opening > 0.5 in
 - 1.0 in < dynamic slot seal < 2.5 in
 - vapor distribution ratio = $\Delta/(h_{rc}+h_{so}) < 0.5$
 - downcomer aerated liquid height < 3 sec for nonfoaming system
 - downcomer aerated liquid height > 5 sec for nonfoaming system
 - . Sieve tray and valve tray
 - % flooding < 80%
 - entrainment < 0.15
 - dry hole drop + surface tension head > 0.35(hw+how)
 - downcomer aerated liquid height < tray spacing
 - downcomer residence time > 3 sec for nonfoaming system
 - downcomer residence time > 5 sec for foaming system

4.3 Sample program 수행 결과

sieve tray hydraulics colculation program 을 작성하여 water-MEK-toluene system에 응용해 보았다.

표 4.10의 output에서 밑줄 친 부분은 input data이고 그 외의 값들은 계산된 수치이다.

사용된 단위는 다음과 같다

길이 및 head : mm

유량 : m³/sec

면적 : m²

density : kg/m³

surface tension : dyne/cm

time이 모두 만족할 만하며 downcomer backup을 froth density로 나눈 값이 tray spacing 보다 작으므로 tray 가 적절하게 설계되었음을 알 수 있다.

표 4.10 tray hydraulics colculation for sieve tray(cross-flow type with segmental weir)

***** TRAY DIMENSIONS(MILI METER) *****					
LENGTH		HEIGHT		AREA(SQ. METER)	
TOWER DIA	750.00	TRAY SPACE	300.00	TOTAL CROS	.44179
OUTLET WEIR	576.28	INLET WEIR	0.00	ACTIVE ZON	.18414
APRON BIM.	549.91	OUTLET WEIR	35.00	VAPOR FLOW	.38771
LIQUID FLOW	480.00	APRON CLRN	25.00	EXIST HOLE	.00825
INLET WEIR	576.28	TRAY THICK	3.00	AVAIL HOLE	.01125
HOLE(TRAING-PITCH)		DOWN COMER		SPACE TO WALL	
HOLE DIAMT	5.00000	INLET AREA	.05408	OUTLET WEIR	135.00
PITCH/HOLE	4.50000	OUTLET AREA	.04563	APRON BTM.	120.00
OPEN RATIO	.04479	D.C VOLUME	.01434	SIDE DED-Z	40.00
EXIST NO.	420	VERTIC HT.	150.00	CALMG ZONE	40.00
AVAIL NO.	572	INCLIN HT.	125.00	INLET WEIR	135.00
***** TRAY HYDRAULICS OF NO. 1 TRAY(EXIT HOLE NO, : 420) *****					
(PROCESS CONDITION)		TEMP(DE-C)		: 95.0000	
		PRESS(KG-A)		: 1.0300	
PHASE	FLUID	MOLE WT. RATE(KG/H)		KG-MOLE/HR	CUB-M/SEC
VAPOR	W-M-T				DENSITY
LIQUID	W-M-T	21.940	513.200	23.391	.1967261
VISCO(C.P.)	: .3290	19.790	443.300	22.400	.0001263
SURF TENS	: 30.4000				974.6000
(HYDRAULICS RESULT)					
VAPOR VELOCITY(M/S)		LIQ. FLOW HEAD LOSS		VAP. FLOW HEAD LOSS	
TOTAL CROS	.4453	LIQ. CREST		2.4399	HOLE DROP
ACTIVE ZON	1.0684	LIQ. GRADT		.0862	C-LIQ HEAD
VAPOR FLOW	.5074	APRON LOSS		.0139	BUBBL-FORM
THROW HOLE	23.8551	DWN-BCK-UP		104.3098	PRESS DROP
TRAY STABILITY		MISEL. FACTORS		OPTIMUM HOL NUMBER	
ENTRAIN(%)	.14	LIQ. THROW		18.9797	NO OF HOLE
FLOODING(%)	151.25	CREST-FACT		1.0048	FLOODING(%)
WEEPING(%)	44.25	AERATION-F		.6450	WEEPING(%)
DC-TIME(S)	56.74	FROTH-DENS		.3827	HOLE DROP

NOMENCLATURE

a = area, in²

ai = inside cross-sectional area of cap, in²

acr = annular area (between cap and riser) per cap, in²

ar = riser area per cap, in²

aw = weep hole area, in²/100ft² tray area.

A = area, ft²

Ada = minimum area under downflow apron, ft²

Am = net cross-sectional area for vapor flow above the tray (generally A1-Ad), ft²

Ar = total riser area per tray, ft²

As = total slot area per tray, ft²

Cd = liquid gradient factor, dimensionless.

Cs = coefficient in maximum slot capacity formula, dimensionless.

Cab = vapor capacity parameter, as defined by Souders and Brown in Eq. (14.7). fps

Cv = vapor load correction factor for liquid gradient, fractional.

d = distance or diameter, in.

dc = inside diameter of cap, in.

dr = inside diameter of risers, in.

ds = slot width, in.

dsb = slot width at bottom, in.

dst = slot width at top, in.

dtw = liquid throw over weir, in.

dw = diameter of circular weir, in.

D = distance or diameter, ft

Df = total flow width across tray normal to flow, ft.

Dt = tower diameter (ID), ft

e = liquid entrainment, lb moles/hr.

Ew = local wet (with entrainment) efficiency, fractional

Eme = local dry (Murphree vapor) plate efficiency, fractional.

Flv = liquid-vapor flow parameter, defined by Eq. (14-6), dimensionless.

Fva = vapor flow parameter based on active area defined by Eq. (14-40), dimensionless.

Fw = weir constriction correction factor, fractional.

g = acceleration of gravity, 32.2 ft/sec²

h = height or head, in.

hal = head loss due to aerated liquid, in. liquid

hc = cap head loss (through riser, reversal, annulus, and slots), in. liquid

hcd = dry cap head loss, excluding slots in. liquid.

hda = head loss due to liquid flow under downflow apron in. liquid.

hdc = height of clear liquid in downcomer, in.

hds = dynamic slot seal, in.

hf = height of froth (aerated mass) on tray, in.

hfd = height of froth (aerated mass) in downcomer, in.

hff = height of liquid free fall in downcomer measured from weir, in.

hl = equivalent height of clear liquid on tray, in.

hti = height of clear liquid at inlet side of tray, in.

hto = height of clear liquid at overflow weir, in.

h_n = height of weir V notches, in.
 h_{bw} = height of liquid crest over weir, measured from top of weir (straight or circular weirs) or from bottom of notches (V-notch weirs), in.
 h_r = head loss through reversal and annulus, in. liquid
 h_{rn} = height of liquid crest over weir, measured from top of weir (straight or circular weirs) or from bottom of notches (V-notch weirs), in.
 h_r = head loss through risers, in. liquid.
 h_{ra} = head loss through reversal and annulus, in. liquid.
 h_{sc} = cap skirt clearance, in.
 h_{sh} = slot height in.
 h_{se} = height of slot opening, in, or slot head loss in liquid.
 h_{ss} = static slot seal, in.
 h_t = total vapor head loss (pressure drop) per tray in liquid.
 h_{ts} = tray spacing, in.
 h_w = height of weir above tray floor, in.
 H = height, ft.
 H_{ts} = tray spacing, ft.
 K_e = dry-cap head-loss coefficient, dimensionless.
 K_s = slot orifice coefficient, dimensionless.
 l = length, in.
 l_e = total free width between caps normal to flow, in.
 l_w = weir length, in.
 L = liquid flow rate, lb moles/hr.
 L_w = weir length, ft.
 L = liquid flow rate, lb moles/hr

q = liquid flow rate, cfs.
 q' = liquid flow rate, gpm.
 Q = vapor flow rate, cfs.
 R_{ce} = ratio of distance between caps on parallel liquid pass to that on oblique liquid pass

R_{ra} = ratio of distance between risers to distance between caps.
 R_s = trapezoidal slot shape ratio. d_{sl}/d_{sh}
 R_w = ratio of weir length to tower
 t = time, sec.
 t_{da} = residence time of aerated mass in downcomer, sec.
 t_l = residence time of liquid in aerated mass on tray, sec.
 t_v = residence time of vapor in aerated mass on tray, sec.
 t' = time, hr,
 $t_{d'}$ = time to drain tower, hr.
 u = liquid velocity, fps.

u_a = liquid velocity based on active area A_a , fps.

U = vapor velocity, fps.

U_a = vapor velocity based on active area A_a , fps.

U_n = vapor velocity based on net area A_n , fps.

U_s = vapor velocity through slots, fps.

U_t = superficial vapor velocity based on total area A_t , fps.

V = vapor flow rate, lb moles/hr.

V_{dr} = volume of aerated mass in downcomer, ft³

w = liquid flow rate, lb/hr

W = vapor flow rate, lb/hr

Greek symbols

β = aeration factor, dimensionless

Δ = liquid gradient for tray or tray section, in.

Δ' = liquid gradient uncorrected for vapor load, in.

ρ_f = average foam density, lb/ft³

ρ_l = density of clear liquid lb/ft³

σ = liquid surface tension, dynes/cm

σ_w = surface tension of water, dynes/cm

φ = relative foam density, ratio of foam density to clear liquid density.

ψ = liquid entrainment ratio, lb/lb(or mole/mole) gross liquid downflow.

참 고 문 헌

1. Smith, "Design of Equilibrium Stage Processes", 1st ed., McGraw-Hill book Co. New York, 1963
2. Backhurst and Harker, "Process Plant Design", 1st ed., Am. Elsevier Publish. Co., Inc., New York, 1973
3. Ernest E. Ludwig. "Applied Process Design for Chem. and Petrochem. Plant/vol 2", 1st ed., Gulf Publish. Co., Texas, 1972
4. Van Winkle, "Distillation", 1st ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1967
5. Ballast tray Manual, Bulletin No. 4900, F.W., Glitsch & Sons, Inc., Dallas, Texas, 1967
6. A.P. Economopoulos, Chem., Eng., Dec., 1978, p109