要旨： 精溜においては一般に塔壁は断熱被覆を施す。塔壁からの熱損失が精溜効果を減殺することは比較的旧くから知られているが、その影響を数量的に解いた文献は見当たらないようである。本報はこの問題を検討し、McCabe-Thiele の階段作図法に準拠し、これに塔壁熱損失のための補正を施こして、比較的簡単にこの場合の理論段数を求める方法を提出したのである。塔壁断熱の場合の理論段数と比較してその影響を数値的に知ることができる。なお実験室における小型のものでは塔壁を加熱することが少なくないが、本法はかかる場合にも適用し得るのである。

一般に精溜操作においては、加熱は罐液加熱と原料予熱とを以てし、冷却は塔頂の分縮器および全縮器で行ない、塔壁は断熱保温を施こすのが普通であり、これが精溜効果のために望ましいことである。塔壁からの熱損失が精溜効果を減殺することは旧く Young¹⁾ および Hausbrand²⁾ の著書にも記されており、筆者³⁾ もその著書にこれを論じた。しかし熱損失と精溜効果との数値的關係の文献は見当たらないようである。本報はこの問題の一解法である。すなわち McCabe-Thiele⁴⁾ の階段作図法に準拠し、熱損失のための補正を施こしたる操作線を用いることによりこの場合の理論段数を求めるのであり、原理は極めて簡明であり、操作も比較的簡単である。その結果を塔壁断熱の場合の理論段数と比較することにより、熱損失の影響が数量的に解るから、断熱被覆の経済的厚さの判定などに役立つはずである。なお実験室における小型の塔では塔壁を電熱線などで加熱することが少なくないが、本報はかかる場合の量的關係の検討にも適用し得るのである。

塔壁より熱損失ある場合の理論段数の解法

本報の解法は McCabe-Thiele⁴⁾ の階段作図法の応用である。すなわち先ず Lewis⁵⁾ に従つてモル蒸発熱を一定と見做し、温度変化による顕熱の差異も省略する。しかし熱損失のために精溜塔内で分縮が起こるから、蒸気量は上段ほど減少するわけであり、このための補正を施こすのである。

いま、溜出物 $D=1$ [kg·mol/hr] を基準とし、段番号は最上段を 1 として下方へ数えるとする。まず濃縮部に

おける、物質収支を考える
と（記号の説明は末尾にある）、McCabe-Thiele と同様に

$$V_{n+1} = O_n + 1 \quad (1)$$

$$y_{n+1} = \frac{O_n}{O_n + 1} x_n + \frac{1}{O_n + 1} x_d \quad (2)$$

しかるに塔壁から熱損失があると V および O は一定でなく下段ほど増大する。いま問題を簡単にするために 1 段毎の凝縮モル数を一定と見做し、これを K [kg·mol/(hr)(kg·mol 溜出物)] とすれば

$$O_n = R + Kn \quad (3)$$

$$V_{n+1} = O_n + 1 = R + 1 + Kn \quad (4)$$

ゆえに (2) 式は

$$y_{n+1} = \frac{R + Kn}{R + 1 + Kn} x_n + \frac{1}{R + 1 + Kn} x_d \quad (5)$$

これがこの場合の x_n 対 y_{n+1} の操作線（濃縮線）である。これによれば操作線は 1 段毎に別々の直線となる。しかし本式は $x=y=x_d$ を満足し、すなわち必ず D 点（第 1 図）を通るのである。

同様にして回収部においては

$$V_{m'+1} = O_{m'} - W \quad (6)$$

$$y_{m'+1} = \frac{O_{m'}}{O_{m'} - W} x_m - \frac{W}{O_{m'} - W} x_w \quad (7)$$

しかるに塔壁の熱損失のために (m も塔頂より数えた番号)

$$O_{m'} = R + qF + Km \quad (8)$$

$$V_{m'+1} = R + qF + Km - W \quad (9)$$

ただし q および $1-q$ は原料中の液および蒸気のモル分率である。これを (7) 式に入れたら

$$y_{m'+1} = \frac{R + qF + Km}{R + qF + Km - W} x_m - \frac{W}{R + qF + Km - W} x_w \quad (10)$$

これが回収部における x_m 対 $y_{m'+1}$ の操作線（回収線）である。本式の傾斜は m の増すとともに減少する。しかし常に $x=y=x_w$ の W 点（第 1 図）を通るのである。

* 昭和 28 年 9 月 10 日受理

** 東北大学工学部応用化学科

以上の結果によれば、濃縮線がD点を通り、回収線がW点を通ることは塔壁断熱の場合と同様であり、熱損失の影響は操作線が1段毎に傾斜の異なる直線となることである。

ちなみに、原料供給段は $n=m$ の場合に相当するからこの場合の両操作線(5)，(10)の交点の軌跡を求める。

$$qx + (1-q)y = x_f \quad (11)$$

となり、これは熱損失なき場合の両操作線の交点の軌跡(原料線)と同じものである。

塔壁からの熱損失のために分縮を伴う場合に x_n ， y_n が平衡関係を満足するかどうかは多少疑問の余地があろう。しかし実際の精溜段上では、液と蒸気とは激しい攪拌混合状態にあり、液相には大小多数の気泡があり気相には大小多数の液滴があるから、たとえ塔壁に或る程度に分縮が起る場合でも液と蒸気とは、理論段上では平衡を満足すると見做しても著しい誤ではなからう。もしかように仮定しないと段数の解法は本報の如く簡単にできないのである。

階段作図法による解法

上記の結果を利用すれば、熱損失ある場合も McCabe-Thiele 法に倣つて次の如くして階段作図法を適用し得る。

まず Fig. 1 の $x \sim y$ 線図に平衡曲線および $D(x_d)$ ， $F(x_f)$ ， $W(x_w)$ の諸点と原料線(11)式とを画くことは熱損失なき場合と同様である。

つぎに階段作図を行なうため濃縮線を書くのが少々厄介であるが、次の如くすると比較的容易である。すなわち濃縮線(5)式の傾斜は

$$\text{濃縮線の傾斜} = \frac{R+Kn}{R+1+Kn} = 1 - \frac{1}{R+1+Kn} \quad (12)$$

で表わされるから、Fig. 1 において、 y 軸上に $B'N = 1/(R+1+Kn)$ なるように N 点を取り、 AN に平行に DE を画けばこれが x_n 対 y_{n+1} の操作線となる。何となればこの線の傾斜は本図によれば

$$\frac{GA}{NG(=1)} = NB = B'B - B'N = 1 - \frac{1}{R+1+Kn} \quad (13)$$

であり、(12)式と一致するからである。 $n=1, 2, \dots$ と順次にかような操作線を描き、平衡曲線との間に階段作図を行なえばよいのである。

つぎに回収線(10)式の傾斜は

$$\begin{aligned} \text{回収線の傾斜} &= \frac{R+qF+Km}{R+qF+Km-W} \\ &= \frac{1}{1-W/(R+qF+Km)} \end{aligned} \quad (14)$$

で表わされるから、Fig. 2 において、上辺 AB 線上に

Fig. 1 Representation of Enrichment Line: x_n vs. y_{n+1} (with Heat Loss from Tower Wall).

Fig. 2 Representation of Stripping Line: x_m vs. y_{m+1} (with Heat Loss from Tower Wall).

$MA = W/(R+qF+Km)$ なるように M 点を取り、 B' M に平行に WJ を画けばこれが x_m 対 y_{m+1} の操作線となる。何となればこの線の傾斜は

$$\begin{aligned} \frac{HM(=1)}{B'H} &= \frac{1}{B'A' - HA'} \\ &= \frac{1}{1-MA} = \frac{1}{1-W/(R+qF+Km)} \end{aligned} \quad (15)$$

となり(14)式と一致するからである。

以上の結果を総合すると、熱損失ある場合の階段作図法は Fig. 3 の如くなる。本図はベンゾール-トルオール系 ($\alpha_{av}=2.46$) で $x_f=0.400$ ， $x_d=0.950$ ， $x_w=0.040$ (従つて $D=1$ につき $F=2.53$ ， $W=1.53$)， $q=0.65$ なる

$$\frac{1}{R+1+Kn} = \frac{1}{1+0.3n}$$
$$\frac{W}{R+qF+Km} = \frac{1.53}{(0.65)(2.53)+0.3m}$$

$$= \frac{1}{1.07+0.196m}$$

Fig. 4 Effect of Wall Heating upon Plate Number (Operating Lines are omitted).

塔壁加熱の影響

実験室の小型の塔は多くの場合に電熱線で加熱するがこれは自然冷却を防止するのが目的であり、普通には真の加熱ではない。しかしその加熱が著しい場合には塔内への伝熱のために蒸発が起り、蒸気量は上段ほど増大する。かような場合も熱損失の場合と同じ原理と方法によつて解くことができる。ただ K の符号が反対になるだけであり、

$$\text{濃縮線の傾斜} = \frac{R - Kn}{R + 1 - Kn} = 1 - \frac{1}{R + 1 - Kn} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{回収線の傾斜} &= \frac{R + qF - Km}{R + qF - Km - W} \\ &= \frac{1}{1 - W/(R + qF - Km)} \quad (19) \end{aligned}$$

となる。ここに K は 1 モルの溜出物につき 1 段毎の蒸発モル数である。

実際の図解法は省略するが、結果の状態を Fig. 4 に示す。もし壁が断熱ならば両操作線は DF_3 , F_2W の如くなるべきであり、これよりも所要段数が減少すること

は当然である。しかしもし全熱量を罐のみに与えるならば両操作線は DF_3 , F_3W の如くなり、所要段数が一層減少すべきであり、これに比べて精溜効果が低いのである。

むすび

精溜における塔壁の加熱または冷却が精溜効果に及ぼす影響を数値的に解くために McCabe-Thiele 法に準拠した階段作図法を提出した。本法によると操作線は 1 段毎に傾斜の異なる直線となるが、濃縮線が x_d で、回収線が x_w で、それぞれ $x=y$ の対角線と交わることは壁の断熱の場合と同様である。

かくして求めたる所要段数を塔壁断熱の場合の理論段数と比較するのが加熱冷却の影響を判定するに最も合理的であろう。

符 号：—

F, W, R : 溜出物 $D=1$ [kg·mol/hr] を基準として原料、罐出物および還流のモル数。

K : D の 1 モルにつき、熱損失のために 1 段毎に凝縮するモル数 (加熱による蒸発量は $-K$)。

x_d, x_f, x_w : 溜出物、原料、罐出物の組成。

n, m : 最上段を 1 としたる濃縮部、回収部の段番号。

$q, 1-q$: 原料中の液および蒸気のモル分率。

N : 塔の総段数。

文 献：—

- 1) Young, S., "Distillation Principles and Processes." (1922).
- 2) Hausbrand, E., "Die Wirkungsweise der Destillier- und Rektifizier-Apparate." 4. Aufl. (1921)
- 3) 八田四郎次: 「蒸溜・吸収」(1936); 化学と工業, 7, 63(1954).
- 4) McCabe, W. L., and Thiele, E. W., *Ind. Eng. Chem.*, 17, 605 (1925).
- 5) Lewis, W. K., *Ind. Eng. Chem.*, 14, 492 (1922).

質 疑 応 答 (通信による)

平田(東京工大): 本文中にも既に指摘されておられますが、熱損失のある場合には、プレートとプレートとの間で分縮が起りますから、平衡関係について McCabe-Thiele 法はそのままでは、適用できなくなるのではないのでしょうか。すなわち、プレートから立上る蒸気はプレート上の液と平衡にありますから、その上の段に入る蒸気の組成は分縮のために少しく濃くなっております。このことを考慮にいれて、報文中に与えられました例題につき計算いたしますと附図の如くなり、熱損失の影響は

小さくなつて参ります。

八田: 私は簡単に、塔壁に伝熱の起る場合でも平衡関係: $f(x_n, y_n) = 0$ (1) が満足されるとみなした。これに対して平田氏は x_n と y_n との関係を

$$(V_n - K)y_n + Kx_n' = V_n y_n^* \quad (2)$$

$$f(x_n, y_n^*) = f(x_n', y_n) = 0 \quad (3)$$

によつて求むべきだと云われるのである。

しかし、私は、平田氏の見解の如くなるためには、塔

第 1 図

第 4 図

内の状態は第 2 図の如くでなければならぬと思う。すなわち、(1) 各段上では液層と気相とは明確に分かれており、気相部には飛沫を全く含んでいないこと。(2) 伝熱は気相部の壁面のみで起こり、液相からの伝熱が、全くないこと。しかるに塔内の実態はむしろ第 3 図の如くである。E. Kirschbaum, "Destillier- und Rektifizier-Technik"¹⁾, (1940) の Figs. 142-4, 156-7, 160 及び亀井三郎氏らの報文 (本誌, 15, 19 (1951)) の Fig. 3 の諸写真によっても解るごとく、各段上の液とガスとは激しい攪拌混合状態にあり、下方では液中に大小無数の気相があり、上方では気相中に大小無数の液滴飛沫が浮遊している。これらの飛沫は絶えず更新生成されるのであるから、その組成は下方の液本体と同じとみなしても差支えないと思われる。かつ壁の内面は大部分絶えず液で洗われているから、伝熱の大部分は直接には液の冷却に費やされ、分縮はむしろ間接の結果と思われる。以上の理由により、私は、塔壁に伝熱がある場合でも、液ガスの

第 2 図

第 3 図

組成は (1) 式を満足するに近いと思う。一層厳密に考えれば、(1) 式と (2), (3) 式との中間にあるであろうが、(1) 式の方が実態に近いと考える。

次に、平田氏の解は私の解よりも著しく複雑である。平田氏の理論では y_n から x_n を求めるには次の如き方法によるものである。まず (2) 式を変化すると

$$\frac{y_n - y_n^*}{y_n^* - x_n'} = \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (4)$$

$$\text{ここに } \beta = \frac{K}{V_n} = \frac{K}{R + 1 + nK} \quad (5)$$

となるから、これと (3) 式とによつて第 4 図の解法が得られる。

まず $BL = \beta$ なるように L 点を探り、水平線 LM と対角線 $B'A$ との交点を M とすれば BM 線の傾斜は、 $-\beta/(1-\beta)$ となる。ゆえに $P(y=y_n, x=x_n')$ 点から BM に平行に PQ を引いて対角線との交点を Q とすれば、 Q 点は $y=y_n^*$ を満足する。よつて水平線 QP' と平衡線との交点 P' において $x=x_n$ が得られるのである。

これに比して、私の解では P 点をそのまま (x_n, y_n) とみなしたので極めて簡単である。

さて本文に挙げたる計算例は、還流を全廃しかつ壁の伝熱も異常に大なる場合であるが、一般の場合には β の値がさほど小さくなくて、結果は平田氏の方法でも私の方法でも著しい差異はなからうと思う。

最後に、本討議は「壁に伝熱ある場合の理論段とはいかなるものか」との定義に関する問題と考えることができよう。そして私は、塔内の液ガス接触の実態と解法の簡易さを考慮して「塔壁の伝熱の有無に拘らず、理論段は (1) 式を満足するもの」と定義するのが適當かと考える。しかし壁の伝熱による分縮の影響は或る程度存在するはずであり、これに關しての平田氏の着眼に敬意を表したい。

Graphical Solution for the Number of Theoretical Plates of a Rectifier with Heat Transfer through the Column Wall.

Sirōzi Hatta*

Rectifying columns are usually coated with insulating materials to prevent heat loss. It is generally supposed that the heat loss through the column wall lowers the rectifying efficiency; the author, however, has found no paper yet concerning the quantitative relation between the heat loss and the rectifying efficiency.

In the present paper the author wishes to explain a graphical method for solving the number of theoretical plates (N. T. P.) based on McCabe-Thiele's method with some modification due to heat loss. The relation between x_n and y_{n+1} is represented by a straight line passing through a definite point, the slope of which, however, changes successively at every plate; so that for the entire enrichment column there are to be a number of operating lines through a definite point. The same is the case with the stripping column.

The author has proposed a relatively simple graphical method of representing these operating lines. Using these operating lines and the equilibrium curve, N. T. P. is obtained by McCabe-Thiele's method.

Finally, comparing the N. T. P. thus obtained with that of the adiabatic column under the same condition, the effect of heat loss may be represented by plate efficiency.

In laboratory stills, the rectifying column is usually electrically heated to prevent natural cooling. When strongly heated, partial evaporation will take place in the column; and the same principle of graphical solution will be applied to this case, too.

* Department of Applied Chemistry, Tohoku University.

資料:

ドイツの大学における化学機械関係の講義内容

上記のような題で Chem. Ing. Tech. の1952年11月号に O. Fuchs 教授が書いておられるのを見ると、教育体系としてアメリカほどには進んでいない部門だけに、わが国としても参考になりそうである。詳細は本誌 136 ページと 137 ページとに掲示した工科大学と総合大学とに分類した表をみていただくことにして、補足的な説明をしておくと、これらの表は1952年の夏学期の講義表によつてつくり、表中の数字は講義時間数を、I, II, 等は学期を、“特”は特別講義を、() 内は冬学期のみに行

われるものを、またはつきりしないものは+印であらわしてある。特に学期のかいてないものは2学期に亘るものである。物理化学は多いことが望ましく、力学や熱学の代りに光学や電気学に多くを費やすことは危険であるとのべてある。ドイツの総合大学では工学部がはつきり独立していないので、わが国との比較はできないが、いずれの場合でも化学工学的講義を充実する方向に進んでいる。なお訳語の不適當なものについては、ご叱正いただければ幸である。(井伊谷 鋼一)