II－94　冷水塔の最適設計

京都大学工学部　正員　高松武一郎　○正員　佐山隼敏
学生員　外池孝雄　学生員　早値外幸

1 緒言

前報[1]では物質および熱移動操作に広く適用できる装置効率を定義し，その特性を明らかにした。一般に装置効率の概念を用いると，物質移動操作（ガス吸収，放散，抽出，蒸留），熱移動操作（熱交換器），熱と物質移動操作（冷水，調湿），および接触装置（充填塔，スクラバー等）接触方式（完全混合槽，並流，向流，十字流）等のすべての場合を包含して一般性を持たせることができる。ここでは特に冷水操作をとりあげ，装置効率の概念を適用して最適設計をおこなう。

2. 目的関数

一般に装置の経済的な最適条件を求めるには，目的関数として全年間経費（Total Annual Cost : T.A.C.）を選ぶのが最も合理的であろう。T.A.C. は一般に次の二項目からなる。

$$T.A.C. = \text{Annual capital cost} + \text{Annual operating cost} \tag{1}$$

Annual capital cost として，装置本体と，その附属設備，据付費等を考えると，

$$\text{Annual capital cost} = (1+i)eC_1SZ = C_1'SZ \quad (\text{円/年}) \tag{2}$$

ここで装置断面積 $S\,(m^2)$，高さ $Z\,(m)$，単位容積当りの値段 $C_1\,(\text{円}/m^3)$，
附属設備，据付費の装置本体に対する割合 i，金利，償却修理等の合計年率 e
次に Annual operating cost としては，ファン動力費，ポンプ動力費が考えられるが，液量を一定とする時には，ポンプ動力費は一定になるので，最適操作条件にはファン動力費のみを考える。圧力損失 $\Delta P\,(kg/m^2)$ には実験式 $\Delta p = bZG^n/\rho_G$ を用いると，ファン所要動力として

$$\text{Annual operating cost} = 2.724\times10^{-6}\times\frac{bC_2\theta}{\rho_G^2E_f}\times SZG^{n+1} = C_2'SZG^{n+1} \tag{3}$$

ここでガス量 $V\,(kg/hr)$，密度 $\rho_G\,(kg/m^3)$，ファン効率 E_f，平均運転時間 θ（時間/年），電力費 C_2（円/kw-hr）
$G = V/S\ (kg/m^2hr)$，n，b，定数，(2)，(3)式を(1)式へ代入して

$$T.A.C. = SZ(C_1' + C_2'G^{n+1}) \tag{4}$$

したがって T.A.C. を最小にするには，$SZ(C_1'+C_2'G^{n+1})$ の最小値を求めればよい。
ところで冷水操作では，冷却すべき水の流量 $R\,(kg/hr)$ と E_L，すなわち，入口，出口水温，入口空気の湿球温度の三変数があらかじめ与えられていて，最適ガス流量 $V\,(kg/hr)$ を決定する場合が多い。そこで，ここでは，R と E_L を最初に与えて，最適な V を決定する問題を考える。
即ち λ，Z はそれぞれ $\lambda = mV/R$，$Z = H_{OL}\cdot N_{OL}$ で与えられるから，装置容積は次のようになる。

$$SZ = \frac{R}{mG}\lambda H_{OL}\cdot N_{OL} \tag{5}$$

3. T.A.C の表示

目的関数(4)式に装置容積(5)式を代入すると

$$T.A.C. = \frac{R}{m}H_{OL}\cdot\lambda N_{OL}\left(\frac{C_1'}{G} + C_2'G^{n}\right) \tag{6}$$

一般に $H_{OL} = {}^{R/S}\!/_{K_{OL}a}$ は一定でなく、液ガス比の影響をかなり受ける。ここでは従来、数多く発表されている実験結果を用いて、H_{OL} と λ との関係式を導き、H_{OL} が λN_{OL} にどのような影響を与えるかを各接触方式について考察する。ところで $K_{OG}a$ は

$$K_{OG}a = K_0 (R/S)^a (V/S)^b \qquad (7)$$

で表わされるが、実験結果から、$a+b \fallingdotseq 1$ が成立するので、(7)式は

$$K_{OG}a = K_0 (R/V)^a (V/S) \qquad (7)'$$

となる。従って H_{OG} は

$$H_{OG} = \frac{V/S}{K_{OG}a} = \frac{V/S}{K_0 (R/V)^a (V/S)} = \frac{1}{K_0}(V/R)^a = \frac{1}{m^a K_0}\lambda^a \qquad (8)$$

故に H_{OL} は

$$H_{OL} = \frac{H_{OG}}{\lambda} = \frac{1}{m^a K_0}\lambda^{-b} \qquad (9)$$

$$T.A.C. = \frac{R}{m^{a+1} K_0}\lambda^{1-b} N_{OL}\left(\frac{C_1'}{G} + C_2' G^n\right) \qquad (10)$$

ここで、$\lambda^{1-b}N_{OL}$ は λ 即ち V のみの関数であり、$\left(\frac{C_1'}{G}+C_2'G^n\right)$ は G のみの関数、${}^{R}\!/_{m^{a+1}K_0}$ は定数である。ところで V と G には $V=GS$ という関係があり、V, G, S 共に未知変数であるが、それらは互いに独立であり、この中の二つは任意に定めることができる。したがって、この場合には V と G はそれぞれ独立に決めることができるので $\lambda^{1-b}N_{OL}$ を最小にする λ と $(C_1'/G + C_2'G^n)$ を最小にする G を求めれば、その値が T.A.C. を最小にするものである。

表-1 T.A.C. 表示

完全混合槽	$C'\dfrac{\lambda^{2-b}\lambda_{max}}{\lambda-\lambda_{max}}$
並　流	$C'\dfrac{\lambda^{2-b}}{1+\lambda}\ln\dfrac{\lambda}{\lambda-\lambda_{max}}(1+\lambda_{max})$
向　流	$C'\dfrac{\lambda^{2-b}}{1-\lambda}\ln\dfrac{\lambda}{\lambda-\lambda_{max}}(1-\lambda_{max})$
$C' = \dfrac{1.5\,C_1'R}{m^{a+1}G_{opt}K_0}$	

そこで $(C_1'/G + C_2'G^n)$ を最小にする経済的なガス質量速度 G_{opt} を求める。

$$\frac{d}{dG}(C_1'/G + C_2'G^n) = 0 \quad から \quad G_{opt} = (C_1'/C_2'n)^{n+1}$$

ところが、実験によると $n=2$ であるから、(10)式は次のようになる。

$$T.A.C. = \frac{1.5\,C_1'R}{m^{a+1}G_{opt}K_0}\lambda^{1-b}N_{OL} \qquad (11)$$

ここで、λN_{OL} を λ_{max} で表わせば、T.A.C. は各接触方式に対して、表-1 のようになる。
したがって、次に、T.A.C. を最小にする λ を求めればよいが、先ず完全混合槽の場合、

$$\frac{d}{d\lambda}(T.A.C.) = 0 \quad から \quad \frac{\lambda}{\lambda_{max}} = \frac{2-b}{1-b} \qquad (12)$$

即ち完全混合槽の場合には、λ が (12)式の時に、T.A.C. は最小となる。他の接触方式については、解析的には求められないので、グラフから λ_{opt} を求めるが、これについては発表の際にゆずる。

以上のような解析により、Annual capital cost の他に Annual operating cost をも考慮に入れて、H_{OL} が変化する場合にも、装置効率の概念を用いて、最適設計をおこなうことができる。

(1). 高松、佐山、吉井; 冷水操作における装置効率とその最適化への応用に関する研究、土木学会 第18回年次学術講演会概要集 昭和38年度