振動条件下におけるトレーの流動特性

頼 実 正 弘・吉 田 英 人
Nonot Soewarno・三 吉 伸 幸

広島大学工学部 化学工学科*

振動条件下でのトレーの流動特性に関し、ウィーピング、エントレイメント、安定操作範囲および仕切り板を入れた場合について実験的に検討した。その結果エントレイメント量は低液量領域で振動条件下の方が多いが、高液量領域では水平静止した場合の方が多くなり、また振動周期が短いほどエントレイメント量は増加した。ウィーピング量はFファクター 1 以下の領域では振動条件下の方が多いが、1 以上の領域では逆の傾向を示し、またウィーピング、エントレイメント量で規定される安定領域については、実験条件下では塔が振動すると幾分狭くなることがわかった。さらに仕切り板の枚数および高さに関しては最適値が存在し、枚数については 2 枚程度、高さについては出口堰程度がよい。また仕切り板を入れるとエントレイメント、ウィーピング量、圧損および静液深は塔を水平静止させた場合より若干多くなるが圧損変動幅は低下させることができるという知見を得た。

緒 言

多孔板トレーが水平静止している場合に対する流動特性に関しては、多くの詳細な研究^{2,3,4,5)}があるが、振動条件下での塔内液の流動特性については、ほとんど検討されていない⁶⁾。将来洋上または船上プラント設計を行い海底資源採集などをする場合に対する設計データを得るためにも、振動条件下での多孔板上の液の流動特性を知る必要がある。

圧損特性については前報⁶⁾で検討したので本報では、水-空気系で塔が周期的に振動した場合と水平静止している場合との比較を、エントレイメント、ウィーピング、安定操作範囲について調べ、またトレー内に仕切り板を設けその枚数、高さ、設置方法などを変えた場合の流動特性を検討し、新しい知見を得たので報告する。

1. 実験装置

使用した実験装置を Fig. 1 に示す。装置は 6 cm × 99 cm の塔内断面をもち透明塩化ビニール製で、段間隔は 50 cm である。段は 3 段設け中央を試験段とし、最上部にはミスト捕集用のワイヤメッシュ (9) を、最下部には空気整流用の多孔板 (8) を設けた。エントレイメントおよびウィーピング量は捕集瓶 (11), (13) を用いた。特にエントレイメント量測定には、塔上部ワイヤメッシュを用いると同時に、円孔ノズルから塔壁側へ、ミストを含んだ気流を衝突させることにより液を分離捕集した。実験は液流量 100~700 l/hr (3.13~21.87 l/hr・cm 堰) の条件で、空気流量は空塔基準 F ファクター 0.5~

2.5 の範囲で行った。左右の振動角は 5° とし、振動周期は 6, 13 および 18 秒とした。用いた多孔板の開口比は 6% であり、出口堰高さは 75 mm, ダウンカマークリアランスは 10 mm, ダウンカマーの幅は 32 mm とした。また塔内に入れる仕切り板については、その高さを 50 mm, 75 mm, 150 mm と変化させ、さらに枚数およびその設置方法を変えて実験を行った。液深測定は Fig. 1 に示されるように塔の中央および左右の 3 個所で行った。

2. 実験結果および考察

2.1 エントレイメント量

Fig. 2 は振動周期を変えた場合、エントレイメントの割合が F ファクターによりどう変化するかを、液量 100 l/hr の条件で調べた結果である。図中のエントレイメント割合とは、液量に対するエントレイメント量の比で定義したものである。Fig. 2 より水平静止の場合より振動した場合のほうがエントレイメント量が多くなること、および振動周期が短いほどその程度が大きくなることがわかる。

Fig. 3 は周期が 13 秒の条件で液量を 500 l/hr と大きくした場合の結果であり、この場合は Fig. 2 の低液流量の結果とは逆に、振動条件下のほうが水平静止の場合よりエントレイメント割合が小さくなることがわかる。エントレイメント割合は Eq. (1) の Hunt ら⁷⁾の式で示されるように泡沫の高さが主に影響すると考えられ、泡沫高さが高いほどエントレイメント割合が多くなるといえる。

$$e_h = 7.74 \times 10^{-5} \left(\frac{73}{\sigma} \right) \left(\frac{U_a}{S_e} \right)^{3.2}, \quad S_e = Z_t - h_f \quad (1)$$

* 〒730 広島市中区千田町 3-8-2

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Relation between entrainment ratio and F-factor (In case of different time period of oscillation)

Fig. 3 Relation between entrainment ratio and F-factor

そこで泡沫部体積と F ファクターの関係の実験結果を Fig. 4 に示す。泡沫部体積を実験で求めるに際し、塔が水平静止している時は泡沫部分の写真撮影より、一方振動条件下では塔が入口堰側に傾いた場合、水平になった場合、出口堰に傾いた場合、再び水平になった場合の 4 段階について写真撮影を行い、各段階の泡沫部分の面積

を図上積分し算術平均することにより泡沫部体積を決定した。Fig. 4 より液流量 500 l/hr の場合は塔が静止している方が泡沫量が多いが、一方液量が 100 l/hr の場合で F ファクター 0.8 以上の領域では逆に振動している方が泡沫量が多いことがわかり、エントレイメントの大小関係と一致している。したがって Figs. 2, 3 と Fig. 4 を比較することにより、塔が振動していても水平静止時と同様に泡沫の量が主にエントレイメント量に影響していることがわかる。

2・2 ウィーピング量

Fig. 4 Relation between froth hold up and F-factor ($L=100$ l/hr and $L=500$ l/hr)

Fig. 5 Relation between weeping ratio and F-factor (In case of different time period of oscillation)

次に塔が振動した場合、ウィーピング量がどう変化するかを検討した。Fig. 5は振動周期を変えた場合にウィーピングの割合がFファクターによりどう変わるかを調べたものであり、液量は 100 l/hr の条件である。ここでウィーピング割合とは液量に対するウィーピング量の比で定義した。Fig. 5よりFファクターの小さい領域では、ウィーピング割合は塔が水平静止した場合に最も小さく、また振動した条件下では振動周期が短くなるにつれてウィーピング割合が増加することがわかる。

Fig. 6は液量 500 l/hr の条件下におけるウィーピング割合とFファクターの関係を示した結果である。この場合Fファクター 1.0 以下では Fig. 5と同様に振動条件下のほうが水平静止の場合よりウィーピング割合は大

Fig. 6 Relation between weeping ratio and F-factor

Fig. 7 Change of static liquid seal for F-factor

きいが、 1.0 以上のFファクターの領域ではむしろ振動条件下のほうがウィーピング割合が小さくなっている。この理由を考えるために、ウィーピングに対し影響が強いと考えられる静液深を調べてみた。

Fig. 7は静液深とFファクターの関係を Fig. 6と同様の条件下で調べた結果である。なお振動している条件の静液深は塔が入口堰側に傾いた場合、水平になった場合、出口堰側に傾いた場合、再び水平になった場合のおののについて Fig. 1に示されている3本の静液深計の平均値を算術平均することにより求めた。この図よりFファクター 0.9 以上での静液深は塔が静止している場合が大きい、Fファクター 0.9 以下では逆に振動条件下の方が大きくなっている。したがって Fig. 6でFフ

Fig. 8 Stable operating region with oscillating and without oscillating conditions

Fig. 9 Relation between pressure drop difference and F-factor (In case of different numbers of baffle)

ファクターが 1.0 近くでウィーピングの傾向が逆転していたのは、静液深がこの F ファクターの領域で逆転しているためと推定される。

3. 安定操作領域

次に塔が静止した場合と振動した場合とで安定領域がどう変化するかを検討した。

Fig. 8 は塔が水平静止している場合と、振動している場合との安定操作範囲を示したものであり、縦軸は液流量を横軸は F ファクターを表す。塔の操作は、ウィーピングおよびエントレイメントの両者を低くした領域で行うのが望ましいと考えられる。ここでエントレイメントに関しては実験条件上、エントレイメント量に対する蒸気量の比 e_h が 0.02 以下*を、またウィーピングに関してはウィーピング割合 W/L が 0.05 以下をそれぞれ安定領域と決めた。Fig. 8 より本実験では、塔を水平静止させた場合と、振動させた場合とで安定領域に大差

* $e_h=0.1$ 程度まではトレイ効率にエントレイメントは影響を及ぼさないといわれているが、本報の実験条件下では $e_h=0.1$ 以下の値しか得られなかったためである。

** 塔が左右に振動した場合の 1 段あたりの圧損の最大値と最小値の差をいう。

Fig. 10 Relation between pressure drop difference and F-factor (In case of different heights of baffle)

Fig. 11 Relation between pressure drop and F-factor for different types of baffle

はないが、全体的には幾分振動している方が安定領域が狭くなっている。ただし振動条件下で F ファクターの大きい領域で安定領域がむしろ広がっているのは、Figs. 3, 4 で示されるように、振動させることにより出口ダウンカマーへ液が流出することが多くなり、トレイ上の液滞留量が少なくなるため、みかけ上エントレイメントが塔を水平静止させた場合より少なくなるために生じた結果と考えられる。

4. トレー内に仕切り板を入れた場合 (枚数, 高さの影響)

圧損変動幅を小さくし、塔内で気液接触を一様に行わせる目的で等間隔に仕切り板を設けた場合の実験結果を次に示す。

Fig. 9 は仕切り板の高さ 75 mm と一定として、仕切り板の枚数を変化させた場合の圧損変動幅 ΔP^{**} と F

Fig. 12 Relation between entrainment ratio and F-factor for different types of baffle

Fig. 13 Weeping ratio vs. F-factor for different types of baffle

ファクターの関係を示したものである。この図より仕切り板を入れた場合1段あたりの圧損は若干増加するが、圧損変動幅は低下することがわかる。仕切り板の枚数に関しては2枚程度が最適で、それより多いと圧損が増加し、また少ない場合は圧損変動幅が増加するといえる。

Fig. 10 は仕切り板の枚数は2枚として、その高さを50, 75, 150 mm と変化した場合の圧損変動幅 $\Delta P'$ と F ファクターの関係を示した実験結果である。この図よ

Fig. 14 Static liquid seal vs. F-factor for different types of baffle

Fig. 15 Pressure drop difference vs. F-factor for different types of baffle

り仕切り板の高さに関しては、高すぎると圧損が大きくかつウィーピングも激しくなり、また低すぎると圧損変動幅が大きくなることより出口堰程度が好ましいといえる。

5. トレー内に仕切り板を入れた場合 (圧損, ウィーピング, エントレインメント, 静液深, 圧損変動幅について)

Fig. 11 は圧損と F ファクターの関係について塔内に仕切り板を入れた場合と入れない場合とを比較して調べた実験結果である。仕切り板を入れた場合は次の3とりの方法で実験した。以後本報ではA, B, C型として呼

ぶ。

A型；等間隔で枚数は2枚，仕切り板の開口比 0%，浮かさず設置する。

B型；等間隔で枚数は2枚，仕切り板の開口比 33%，（穴径 9mm で正方形配列）浮かさず設置する。

C型；等間隔で枚数は2枚，仕切り板の開口比 0%，2 cm 浮かして設置する。

Fig. 11 より塔が振動した場合は仕切り板の有無に依らず圧損は最大値，最小値を示すことおよびA型の仕切り板を用いると圧損値が若干他と比較して高くなることなどが認められる。

Fig. 12 はエントレインメント割合とFファクターの関係を示した実験結果である。この図より仕切り板を入れるとエントレインメント割合が仕切り板を入れない場合と比べ増加することがわかる。このことは仕切り板を入れたために若干泡沫部体積が増加したことによるものと推定される。

Fig. 13 はウィーピング割合とFファクターの関係の実験結果である。この図よりFファクター1以下の領域では仕切り板を入れた場合はない場合と比べウィーピング割合が増加することがわかり，A型の仕切り板で最もウィーピング割合が高く，次にC型，B型の順となっている。A型でウィーピング割合が高くなる理由を調べるために静液深を測定した。

Fig. 14 は静液深とFファクターの関係を調べた実験結果である。この図より静液深はFファクターの増加と共に低下しており，またA型の仕切り板を用いた場合が最も静液深が高いことがわかる。このことは Fig. 13 でA型の仕切り板が最もウィーピング量が大きかったことと一致している。またFファクター1以上の領域ではA型，B型の順で静液深が高くなっており，これらの値は仕切り板を入れない場合より幾分高くなっている。また Fig. 11 で圧損の最大および最小値がA型の仕切り板の場合他者と比較して高かったのは，Fig. 14 より考慮して静液深が高かったためと考えられる。

Fig. 15 は仕切り板を入れた場合どの程度圧損変動幅をおさえることができるかを調べた実験結果である。図中には流量を変えて実験値を整理してある。圧損変動幅は流量の増加と共に増大し一方Fファクターの増加と共に低下するといえる。また仕切り板を入れることにより圧損変動幅を小さくすることができ，その効果はA型の仕切り板が最もよく，B型とC型とであまり大差はないといえる。

結 言

振動条件下でのトレーの流動特性でウィーピング，エントレインメント，安定操作範囲および仕切り板を入れた

場合について実験的に検討し次の結論を得た。

(1) エントレインメント量は低流量領域では振動条件下のほうが多いが，高流量領域では塔が水平静止した方が多くなる。また振動周期が短くなるほどエントレインメント量は増加する。

(2) ウィーピング量はFファクター1以下の領域では振動条件の方が多いが，1以上の領域では水平静止させた方が多くなる。なお振動条件下でFファクター1以上の領域でウィーピング量が少なくなるのは主に塔が振動することにより静液深が低下するためである。

(3) ウィーピング，エントレインメント量で規定される安定領域については，本実験条件下では塔が振動すると幾分狭くなる。

(4) 仕切り板の枚数および高さに関しては最適値が存在し，枚数については2枚程度，高さについては出口堰程度が望ましい。

(5) 振動条件下で仕切り板を入れると，エントレインメント，ウィーピング量，圧損，静液深などは仕切り板を入れない場合より若干多くなるが，圧損変動幅は低下させることができる。

Nomenclature

a	= total hole area to cross sectional area of baffle	[%]
E	= amount of entrainment	[l/hr]
e_h	= entrainment ratio	[kg-liq/kg-vap]
F	= F-factor through bubbling area	$[(m/s)(kg/m^3)^{1/2}]$
H	= froth hold up	$[cm^3]$
h	= height of baffle	[mm]
h_f	= froth height	[cm]
h_w	= outlet weir height	[mm]
L	= liquid flow rate	[l/hr]
n	= number of baffle	[—]
ΔP	= total pressure drop through a plate	[mmH ₂ O]
$\Delta P'$	= pressure drop difference	[mmH ₂ O]
S	= angle of oscillation	[deg.]
S_e	= effective tray spacing	[cm]
T	= time period of oscillation	[s]
U_n	= vapor velocity in column	[cm/s]
W	= amount of weeping	[l/hr]
Z_t	= tray spacing	[cm]
σ	= surface tension	[dyne/cm]
β	= total hole area to cross sectional area of plate	[%]

Literature cited

- 1) Hunt, C. d' A., D. N. Hanson and C. R. Wilke: *AIChE J.*, **1**, 4, 441 (1955)
- 2) Kamei, S., T. Takamatsu, S. Mizuno and Y. Tomizawa: *Kagaku Kōgaku*, **18**, 108 (1954)

- 3) Shono, H., I. Suzuki and M. Hirata: *Kagaku Kōgaku*, **31**, 9 (1967)
- 4) Takahashi, T., Y. Akagi and K. Fujita: *J. Chem. Eng. Japan*, **6**, 97 (1973)
- 5) Takahashi, T., Y. Akagi, K. Fujita and T. Kishimoto: *ibid.*, **7**, 223 (1974)
- 6) Yorizane, M., H. Yoshida, M. Hirao, H. Nakanishi and N. Soewarno: *Kagaku Kōgaku Ronbunshu*, **6**, 2 (1980)
(1980 年 5 月 1 日; 化学工学協会第 13 回秋季大会(名古屋, 1979 年 10 月)にて一部発表)

The Hydraulic Characteristics of Trays under Oscillation

Masahiro Yorizane, Hideto Yoshida, Nonot Soewarno
and Nobuyuki Miyoshi

Dept. of Chem. Eng., Hiroshima Univ., Hiroshima 730

Experimental studies of hydraulic characteristics, i.e. weeping, entrainment, stable operating region and the effect of baffles have been conducted in an air-water system using perforated trays. For the low liquid flow region, the amount of entrainment when the tray oscillates is larger than when the tray does not oscillate, but this trend is reversed for the high liquid flow region. The amount of entrainment increases with the decrease in period of oscillation. If the F-factor is less than 1.0, the amount of weeping when the tray oscillates is larger than when it does not, but this trend is reversed if the F-factor is greater than 1.0.

It is found that the stable operating region in which the tray oscillates becomes smaller than that in which it does not oscillate. From the experimental results, it is found that the optimum number of baffles is two and the optimum baffle height is approximately the same as that of the outlet weir. Using baffles decreases the pressure drop difference. However, there is a small increase in the amount of weeping, entrainment, pressure drop and static liquid seal.

~~~~~