- 5) Hengstebeck, R.J.: Distillation '61
- 6) 広田圭昇: 化学装置, 11月号, 1969
- 7) 今井茂博: 石油と石油化学, 第7巻, 9月号
- 8) 今井茂博: ケミカル・エンジニア, 9月号, 1964
- 9) 岩村一正: 石油と石油化学, Vol. 6, No. 8
- 10) 児島, 広田: ケミカル・エンジニア, 12月号, 1966
- 11) 村岡昭郎: ナットレイ実験計画書, 1968
- 12) 西山, 今井, 梅田: 第8回化学機械談話会, 1965
- 13) 野口雅章: ケミカル・エンジニア, 10月号, 1967
- 14) 大江, 横山, 中村: 石川島播磨技報, 9巻, 5号
- 15) 佐野司朗: 化学技術, 2巻, 10号
- 16) 佐野司朗: 化学機械技術, 15巻
- 17) 関 為之: ケミカル・エンジニア, 7月号, 1963
- 18) 梅田宏之: ケミカル・エンジニア, 7月号, 1963
- 19) 平田, 頼実, 岩村, 佐野ら: 蒸留工学ハンドブック(初版), 朝倉書店

無 せ き 多 孔 板 ト レ イ の 特 性*

橋 本 尚 人**・増 田 貞 夫**

緒 言

蒸留塔, 吸収塔などに使用される気液接触用トレイとしては, 主として溢流管のある十字流型が使用されているが, 向流型トレイの着想も古くよりあり, 溢流管のない多孔板トレイ(無せき多孔板トレイ)もその一型式である。筆者らは1960年頃より開発に着手し, 現在では約30基の実績を有するに至った。すでにこのトレイについては2, 3発表しているが, 以下に最近の研究結果を含めてその特性を述べる。

1. 開 発 の 目 的

新しいトレイを開発するための予備研究として, 十字流型, 向流型を含む7種のトレイについて同一条件において比較実験を行なった結果, きわめて大ざっぱであるが次の様な知見を得た。

1. 同一物質系を用いた場合の段効率は, 最適運転条件においてはどのトレイについても大体同一である。
2. 圧力損失はトレイの構造により相違があるが, 気液接触に費やされる正味の圧力損失は各トレイにおいて大差はない。
3. 操作範囲は十字流型の方が向流型より相対的に広いが, 向流型でも実用的には差支えない程度の操作範囲は得られる。

これらの知見を検討し, 次の開発目標を導き出した。

1. トレイの構造を複雑にしても段効率の

- 向上はあまり期待できず, むしろコストアップをまねく。
2. 圧力損失を低減するためには, 気液接触以外に費やされる損失を最小限度にする。
3. 操作範囲は特別広いことを要求しない。

以上の目的には向流型トレイが適していると考えられた。たまたまリップのないリップトレイ(すなわち無せき多孔板トレイ)を試用した所, 通常のリップトレイとあまり変らない特性を示したので, これを「無せき多孔板トレイ」と名づけて開発に着手し, 1964年に直径700mm, 段数50のメタノール蒸留塔を最初の実用装置として納入した。

2. 構 造

図1に示すごとく, きわめて単純な構造であるが, 孔

図 1 無 せ き 多 孔 板 ト レ イ

* 昭和45年3月9日 受理

** Naoto Hashimoto, Sadao Masuda (株)日立製作所 笠戸工場

図2 空塔ガス速度と圧力損失

径と孔数の決め方が特性を決定する。孔径は3~25mm, 開口比は10~30%の範囲が使用される。板厚も特性に影響を及ぼし, 通常2~6mmが使用される。トレイの取付方法は大型のものでは分割式, 小型のものはスパーサーロッド式であるが, シートパッキンは原則として使用しない。トレイの水平度は通常の十字流型と同程度である。

3. 流動特性

3.1 圧力損失と液滞留量

すでに種々発表しているので^{1,2)}ここでは簡単に述べる。トレイ一段当りの圧力損失は次式で表わされる。

$$\Delta p = \Delta p_a + H\rho_L + \Delta p_o \quad (1)$$

但し Δp は全圧力損失, Δp_a は乾き圧力損失, Δp_o は表面張力による圧力損失である。

$$\Delta p_a = C_1(\rho_G/2g)(u_h/\tau)^2 \quad (2)$$

但し τ はガスが上昇している部分の割合である。

$$\Delta p_o = C_2(4\sigma/dg) \quad (3)$$

実験結果より $C_1 \approx 2.5$, $C_2 \approx 1$, τ は1に近くて0.9以上であることが分っている。水~空気系における圧力損失と空塔ガス速度の関係を図2に示す。ガス速度および液量が増大すると Δp は増加するが, これは主として液滞留量の増大によるものである。液滞留量を予測する事は圧力損失や段効率を予測するために重要であるが, 挙動が複雑で理論的に解析することはむづかしい。物性, 操作条件, トレイの寸法等より大体実験式により推算できる様にはなっているが, できれば実験により測定することが好ましい。

3.2 液滞留の機構

十字流型トレイと異なり, 無せき多孔板トレイでは同一開口より液が流下しかつガスが上昇するのであるから, 次の条件が満足される必要がある。

$$\text{ガスが流れる条件} \quad \Delta p > \rho_L g H \quad (4)$$

$$\text{液が流下する条件} \quad \Delta p < \rho_L g H \quad (5)$$

この条件はお互に矛盾しているが, これを解決するためには次の2種類の機構が考えられる。

1. Δp は一定であるが, 場所により H が異なり, H の小な所では式(4)が成立してガスが上昇し, H の大な所では式(5)が成立して液が流下する。
2. 液滞留量は一定であるが, Δp が時間的に変化して式(4)(5)の条件が交互に発生する。

前者はエネルギー消費が最小となる条件より, ガスの上昇する部分の割合 τ と液滞留量 H が定まる。後者は塔内の圧力が時間的に変動して一種の振動が発生しているという考え方である。

筆者等の実験によると, 水~空気系では空塔速度が大体1m/s以上においては明らかに上記の1.の現象が観察され, また0.5m/s以下位ではオシログラフで測定すると2~4cycle/sの振動が観察されることより2.の現象が存在することがほぼ実証されている。無せき多孔板トレイは通常空塔速度の高い所で使用されるので, 1.の状態にあると考えられるが, その際の τ の値についてはすでに報告した³⁾。

4. 蒸留特性

4.1 段効率の推算

二重境膜説を採用すれば, トレイ上の物質移動に関して次の式が成立する。

$$1/N_{OG} = 1/N_G + m\alpha/N_L \quad (6)$$

$$N_{OG} = -\ln(1 - E_{OG}) \quad (7)$$

$$E_{OG} = 1 - e^{-N_{OG}} \quad (8)$$

$$E_{MV} = E_{OG} \quad (9)$$

但し式(9)は無せき多孔板上の液混合を完全混合と考えている。

ここで N_G , N_L を理論的に求めるのは不可能であるので実験結果より推算する。図3は NH_3 ~空気~水系の吸収および CO_2 ~空気~水系の放散実験より N_G および N_L を求めたものである。これをガスおよび液の接触時間 t_G および t_L で整理すると, トレイの形状や操作条件が異なった場合でも片対数グラフにおいて大体直線で相関することができる。この結果を用いて任意の場合の段効率を推算するには次の手順による。

1. 操作条件より液滞留量および泡沫高さを推算し, ガスおよび液の接触時間を計算する。
2. 接触時間より実験結果を利用して N_G および N_L を求める。
3. 上記で求めた N_G と N_L はおのおの NH_3 ~空気~水系および CO_2 ~空気~水系についての値であるので, シュミット数により物性の補正を行なう。

図3 移動単位数

図4 段効率の比較

4. 補正した N_G , N_L を式 (6) に代入して N_{OG} を求め、以下式 (8) (9) により E_{MV} を求める。

図4はこの方法でエタノール～水系の段効率を推定して実測値と比較したものであるが、両者はかなり良く一致している。

4.2 段効率の実測値と各種トレイ間の比較

段効率は前述のごとく操作条件（主として接触時間）と物性値（主としてシュミット数）により定まる。前者は設計により最適条件にすることが可能であるが、後者は取り扱う物質系により定まってしまう。図5は各種物質系の段効率を表わしたが、この図より段効率は物質系により大幅に異なることが十分理解できると思う。一方トレイの構造が異なった場合の段効率は1.で述べたごとく大きな差異はなく、むしろ物質系の相違による効率の差の方がはるかに大きい。図6に同一物質系による各種トレイの段効率を比較したが、塔径、段間隔、せき高等異なるにもかかわらず、その最適操作条件においてはきわめて近似した値を示していることがわかる。

No.	物質系	操作圧力	孔径	開口比
1	エタノール～水	大気圧	3 mm	20 %
2	CCl ₄ ～トルエン	同上	4.5 "	同上
3	シクロヘキサノン～シクロヘキサノール	100Torr	3 "	同上
4	シクロヘキサノン～ノルマルヘプタン	大気圧	13.5 "	16.8%
5	酢酸メチル～酢酸ビニル	同上	同上	24.7%

図5 各種物質の段効率

5. 設計法とスケールアップ

無せき多孔板を設計するに当り、次の諸項目の検討が必要であるが、その各々について設計指針を述べる。

1. 孔径 処理物の性状により選択している。スラリーや重合物による目詰りの恐れのない場合は6mmを採用し、恐れのある場合は12.7mm またはそれ以上を採用する。
2. 開口比 特殊な場合を除き15～30%であり、圧力損失の許容値により選定する。負荷範囲の下限としてはトレイ1段当りの圧力損失が15～20mm Aq となる点を目安としている。
3. 段間隔 一般に300～600mm を用い、絶対圧力の低い程大きな段間隔を用いる。
4. 塔径 概略計算では空塔ガス速度基準の F 因子 ($u_t \sqrt{\rho_g}$) が1.5～2.0 になる様に塔径を決めて、開口比、許容圧力損失等より最終的に決定する。

- ① 無せき多孔板……筆者等の実験値
② 多孔板……文献値⁽¹⁾
③ 泡盛板……筆者等の実験値
④ パルトレイ……日曹エンジニアリングのカタログより引用

図6 各種トレイの段効率

図 7 無せきバルブトレイ用バルブユニット

記 号	トレイの種類	孔径mm	開口比%
---	無せきバルブトレイ	12.7	16.4~25.7
---	無せき多孔板	12.7	15.2
---	同 上	12.7	24.7

図 8 無せきバルブトレイの流動特性

表 1 無せき多孔板の設計例

		塔 頂	塔 底
仕 様	圧 力 [mm Hg abs]	120	220
	ガ ス 量 [m³/s]	1.77	1.42
	液 量 [m³/hr]	3.1	8.2
	ガス密度 [kg/m³]	0.48	0.91
	液 密 度 [kg/m³]	880	860
	表面張力 [dynes/cm]	29	26
		2.5 以 下	
設 計 結 果	段 数	40	
	孔 径 [mm]	6	6
	開 口 比 [%]	16	18
	段 間 隔 [mm]	450	450
	塔 径 [mm]	1100	1100

上記の内 1.~3. についてはスケールアップに関し特別な問題はない。塔径については無せき多孔板トレイは半径方向に液あるいは泡沫層の移動がないため、十字流型トレイで問題になる液勾配によるトレイ上の液あるいはガスの不均一な分布がなく、スケールアップは比較的容易である。筆者らは塔径 200mm と 1000mm の実験塔について検討した結果を先に発表した⁵⁾ が、これによ

ば流動状態に基本的な変化はなく、ただ塔径が小さい方が圧力損失において 10~20% 大となる傾向があることを示した。すでに納入実績においても最小塔径 80mm より最大 3600mm に至る各種の塔があり、これらの運転データを解析した結果でも特に問題は生じていないので、スケールアップ法については一応確立されたものと考えている。表 1 に納入品に関する設計条件の一例を示す。

なおスケールアップに関する流動、強度上の問題をいっそう明確にするため、塔径 4100mm の空気~水系の流動実験装置を設備して種々検討を進めているが、その結果については別の機会に報告したい。

6. バルブユニットとの組合わせ

すでに述べたごとく、無せき多孔板トレイは最も経済的なトレイであるが、向流型の欠点としてせきを有するトレイに比べ操作範囲が狭いという弱点がある。これは溢流管とせきがないため、設計の自由度がきわめて小さい(孔径と開口比)ことに起因している。

向流型トレイにバルブユニットを着装し、蒸気流量の変化に従って開口比を変化させて操作範囲の拡大をはかったトレイが 2, 3 発表されている。

筆者等は図 7 に示す新しい型のバルブユニットを無せき多孔板トレイに着装した無せきバルブトレイを考案し、現在開発を進めている⁶⁾。

バルブユニットは原理的には従来のものと大差はないが、図 7 に示すごとくバルブの移動を制限する脚をバルブの蓋の部分より切り出して構成したことが特長となっている。このために材料が低減され、またバルブが作動しない様な低い蒸気速度においても、蓋の開口部が多孔板と同様な効果を示して発泡が均一となる。

図 8 に無せきバルブトレイとその最小、最大開口比に相当する無せき多孔板の空気~水系による流動特性の一例を示した。なお最小とはバルブが全て閉じた状態における開口比であり、最大とは完全に開いた状態における値である。

ガス速度の低い範囲(図 8 の A 点迄)ではバルブが作動しないので、最小開口比の無せき多孔板と全く同様な挙動を示す。ガス速度がさらに速くなるとバルブが作動を始め開口比が変わるので、圧力損失がほぼ一定となる範囲が生ずる(図 8 の A→B の範囲)。この特性は通常のせきのあるバルブトレイときわめて良く似ている。

さらにガス速度が増加し、全てのバルブが開いてしまうと、もはや開口比は変り得ないから最大開口比を持つ無せき多孔板とはほぼ同様な挙動を示す様になる(図 8 の

B点以降)。

以上述べたごとく無せき多孔板とバルブユニットを組合わせることにより、前者の操作範囲の狭いという欠点を改良し、しかも通常のバルブトレイより安価な新しいトレイを開発することができた。

結 言

以上述べたごとく、無せき多孔板トレイには種々の優れた特性があるが、これを要約すると次の様になる。

1. 構造がきわめて簡単で大幅な価格低減ができる。
 2. 十字流型に比べて処理能力が大きい。
 3. 大きな孔径を使用すれば目詰りの恐れが少ない。
 4. 液勾配がなくスケールアップが容易である。
- 一方下記の様な欠点もある。

1. 操作範囲が狭い (100~70% 位)。但しバルブユニットを併用して大幅に改善できる。
2. 設計法がむづかしい。但しこれも必要により実液による実験を行なうことにより信頼性を高めることができる。

使 用 記 号

E_{MV}, E_{OG}	= マーフリー段効率および点効率	[%]
g	= 重力の加速度	[m/s ²]
H	= トレイ上の静液高	[m]
m	= 気液平衡曲線の傾き	[—]
N_G, N_L	= ガスおよび液膜の物質移動単位数	[—]
N_{OG}	= ガス膜基準の総括物質移動単位数	[—]
u_h	= 孔面積基準のガス速度	[m/s]
u_t	= 空塔断面積基準のガス速度	[m/s]
α	= 気/液の流量比	[—]
Δp	= トレイ1段当りの全圧力損失	[kg/m ²]
Δp_d	= トレイ1段当りの乾き圧力損失	[kg/m ²]
Δp_o	= トレイ1段当りの表面張力による圧力損失	[kg/m ²]
ρ_G, ρ_L	= ガスおよび液の密度	[kg/m ³]
σ	= 液の界面張力	[kg/s ²]
τ	= ガスが上昇している部分の割合	[—]

引 用 文 献

- 1) 平塚, 増田, 橋本: 化学工学, **30**, 38 (1966)
- 2) 橋本: ケミカルエンジニアリング, 1967年10月
- 3) 木村, 増田: 化学工学協会第3回秋季大会 (1969)
- 4) Kirschbaum, E.: *Chem.-Ing.-Tech.*, **34**, 283 (1962)
- 5) 平塚, 増田, 橋本: 化学工学協会九州大会 (鹿児島) (1963)
- 6) 増田, 久富, 正藤司: 化学工学協会第3回秋季大会 (1969)

ハ イ コ ン タ ク ト ・ バ ル ブ ト レ イ *

廣 田 圭 昇**

1. は じ め に

ハイコンタクト・バルブトレイ¹⁾は英国ハイドロナイル社と独国 M. A. N. 社と協同で開発されたバルブトレイで、安定性、圧力損失ですぐれ、動作性、耐久性に合理的な工夫がなされている。また、総合的なコストの面についても、トレイ構造に独自の考案がなされ、建設費および維持費の低減に役立っている。

国内では導入以来、すでに石油、石油化学、ファインケミカルズの蒸留、吸収等の物質移動装置に広く使用されている。またヨーロッパ諸国で圧倒的な市場占拠率を示しており、その性能および経済性の優秀性を裏付けて

いる。

本文ではバルブトレイの一般的特性について述べ、それに対比してハイコンタクト・バルブトレイの特徴について述べる。

2. バルブトレイの一般的特性

トレイの動作機構が明らかになるに従い³⁾、1950年代に多数の新らしい形式のトレイが発表され、実用化されて来た。

バルブトレイもそのうちの一つであるが、その原理自体は古くからあった考え方で、大孔径シーブトレイのオリフィス孔上に一定範囲で自由開閉する円形の蓋が取り付けられたもので、その変形として、角形あるいは三角形

* 昭和45年3月18日 受理

** Keigo Hirota 日曹エンジニアリング (株)