研 究

真 空 下 に お け る 充 填 塔 の 圧 降 下*

中 川 洋**・角 田 龍 爾**

(昭和38年12月7日受理)

Pressure Drop Measurement of a Packed Column under Reduced Pressure

Hiroshi NAKAGAWA and Ryuji TSUNODA

(Nippon Rika Kogyo Co. Ltd., Otaku, Tokyo)

The pressure drop of a packed column is one of the fundamental performance of the rectifying distillation column, but miscellaneous informations of the pressure drop of these columns are almost limited to the data investigated under atmospheric or relatively low vacuum, say 760 ~ 100 torr,

Due to the demand to develop the new technique in order to operate the fractionating distillation under higher vacuum, we had to observe the pressure drops of McMahon packing and Rashig ring of which characteristics are tabulated in Table 1. under the extremely reduced pressure down to 0.1 torr, by means of the apparatus shown in Fig. 1, and Fig. 2.

Two polystyrol columns of diameter of 35mm and 80 mm, 1 meter high are packed as effective height of 800 mm, and evacuated by mechanical vacuum pump. The absolute pressure and pressure drop were measured by three manometers and differential manometers. The pressure and flow rate were adjusted by means of two variable leaks, flow rate being measured by dry test meter and burette type flow-meter.

Although the data were illustrated conventionally as in Fig. 4, which presents the relationship of G/g vs P , and the data lines were unfavorably separated according column pressure.

The another method of presenting these phenomena of pressure drop, which are expressed by equations 5 and 8, seems more adequate. The single relationship of Re' and f' independent of pressure was obtained, and was more convenient to extend the estimation of pressure drop due to these packings.

Linear and curved sections of the Fig. 8 represent the viscous and turbulent flow region, respectively. The air flow through packed beds seems to be turbulent one when the modified Reynolds number Re' exceeds 10.

1 緒 言

単一相流動における圧降下の測定は常圧下においては今まで多くの文献が発表されている^{(2),(3),(4)}。しかしこれは主として常圧下における吸収塔、精留塔、反応塔などについて行われたもので、減圧下の測定は殆んど行われていない。

充填塔式真空精溜の圧降下も多く発表されているが、

何れも二相流動の場合で、機構が複雑なため単にデータを示したにすぎないものが多く、解析の結果をまとめた実験式もみあたらず、これらのデータのまとめ方すら疑問が多いのが現状である。

ここでは減圧下の単一相流動について測定し、これらの値が常圧下の式に、どこまであてはまるかしらべてみた。特に今までの測定で圧力は 50mmHg 以上よくても 10mmHg までにとどまっていたが、これをさらに低い圧力 1mmHg までの測定を行ない、その流動機構を調べてみた。尚微粉末の真空中における通気抵抗については既に本誌に報告した⁽¹⁾。

* 昭和38年11月21日 京都における第4回真空連合講演会において発表

** 日本理化学工業株式会社 (大田区下丸子町 304)

- 1 Rotary Pump
- 2 Packing Bed
- 3 Hg-manometer
- 4 Oil-manometer
- 5 Utube Hg-manometer (open)
- 6 Utube Hg-manometer (closed)
- 7 Oil-manometer
- 8 Gas Flow Meter (rotary type)
- 9 Gas Flow Meter (burette type)
- 10 Needle Valve.

Fig. 1 Experimental Apparatus

Fig. 2 Experimental Apparatus.

2. 実験装置及び方法

実験装置の系統図を Fig. 1 及び Fig. 2 に示す。充填塔は高さ 1m, 塔径80φ 及び35φ の2種、差圧は水銀及び油マノメータで測定し、圧力は 760~200mmHg を開管水銀マノメータ 200~10mmHg を閉管水銀マノメータ 10~1mmHg を油マノメータでそれぞれ測定した。10~1mmHg の範囲でも誤差は $\pm 0.1\text{mmHg}$ 以下である。

圧調整は、ニードルバルブで適当にリークさせて行ない精度は指示真空度の 5%以下に保った。

充填層を流れるガス量は大容量の場合は、回転式流量

Table 1 Properties of Packing Examined.

	Size	Material	Packing Dens.	Free Space	Packing Area
$\frac{1}{4}$ " McMa-ho	4mm100mesh Wire	stainless steel	kg/m ³ 375	95.3%	m ² /m ³ 1780
5mm Rasch-ig Ring	$5\text{mm} \times 4.4\text{mm} \times 5\text{mm}$	brass	856	73	932
7mm Rasch-ig Ring	$7\text{mm} \times 6\text{mm} \times 7\text{mm}$	brass	774	85.7	620

Fig. 3 Three types of packing. Left to right.

$\frac{1}{4}$ Mc Mahon, 5mm Rashig Ring. 7mm Rashig Ring.

計、ガス量の少い時はビューレット式流量計を用い、測定範囲は $2\text{l/sec} \sim 0.001\text{l/sec}$ である。

使用した充填物は $\frac{1}{4}$ " マクマホン、5mm ラシヒリング、7mmラシヒリングの3種である。これら各充填物の形状値を Table 1 に示す。

測定は上記3種について塔径 35φ 充填高さ 0.8m、また $\frac{1}{4}$ マクマホンのみ 80φ, 0.8Hm について測定した。

Fig. 3 はこれら充填物の写真である。

3. 充填層の圧降下

流体の圧降下を表わす Fanning の式は

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \frac{f L u^2 \rho}{\frac{S}{U} \cdot g_0} \dots\dots\dots (1)$$

ここに空間率 εd , 比表面積 at なる充填層の場合は

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \varepsilon d$$

$$U = \frac{4}{\pi} \frac{at}{D^2} = \frac{\pi D^2}{4} at$$

だから

$$\frac{S}{U} = \frac{\varepsilon d}{at} \dots\dots\dots (2)$$

また空筒の場合の流速を u_0 とすると

$$u = u_0 \cdot \frac{1}{\varepsilon d} \dots\dots\dots (3)$$

(2)、(3)より(1)式は

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \frac{f L u_0^2 (\varepsilon d) \rho}{\frac{\varepsilon d}{at} \cdot g_0}$$

したがって

$$\Delta P = \frac{1}{2} f \frac{L u_0^2 \rho}{g_0} \cdot \frac{at}{\varepsilon d^3} \dots\dots\dots (4)$$

となる

また、 $\frac{1}{2}f = f'$ とすると

$$\Delta P = f' \frac{L u_0^2 \rho}{g_0} \frac{at}{\varepsilon d^3} \dots\dots\dots (5)$$

同様にして Re 数は

$$Re = \frac{D u \rho}{\mu} \dots\dots\dots (6)$$

より

$$Re = \frac{4 u_0 \rho}{\mu at} \dots\dots\dots (7)$$

いま $\frac{Re}{4} = Re'$ とすると

$$Re' = \frac{u_0 \rho}{\mu at} \dots\dots\dots (8)$$

また

$$Re' = \frac{G_0}{\mu at} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

また層流の摩擦係数は

$$f = 16\mu/Du\rho = 16/Re \dots\dots\dots (10)$$

であるから充填層の場合は

$$f' = 16/4Re' = 4/Re' \dots\dots\dots (11)$$

となる。

Fig. 4 Pressure Drop Data : $\frac{1}{4}$ " Mc Mahon.

Fig. 5 Re . No. vs Friction Factor : $\frac{1}{4}$ " Mc Mahon Packing.

4. 結果及び考察

真空中の圧降下の表わし方として、質量速度をガス密度の平方根で除した $G/\sqrt{\rho g}$ 対、圧降下のプロットがよく用いられ、この値は $\log-\log$ 目盛であらわすと圧に関係なく一本の直線がえられるといわれている。 $\frac{1}{4}$ " マクマホン、筒径 35mm の時の $G/\sqrt{\rho}$ 対 ΔP のプロットを Fig. 4 に示す。

これよりわかるように広範囲の真空度 (1~400mm Hg) と流量において、これらは真空度により大きく変わり、単一相流動の充填塔の圧降下は $G/\sqrt{\rho}$ 対 ΔP のプロットでは一定の値は、えられないことが、はっきりい

Fig. 6 *Re. No. vs Friction, 5mm Rashig Ring.*

Fig. 7 *Re. No. vs Friction Factor ; Various Packing.*

える。同様に流速と圧降下、質量速度対圧降下についてプロットしても、これらの値は真空度により大きく変化する。

ここで Fanning の式から導いた(6)式に各測定値より求めた値を代入し f' 対 Re' について表わしたものを Fig. 5, 6 に示す。

Fig. 5 は $1/4$ マクマホン、塔径 35mm、充填高さ 0.8m 真空度 1~400mmHg/g である。これより明らかなように、これらの値は、その真空度には関係なく、1つの曲線として表わされる。 Re 数の小さい範囲 $Re < 10$ の直線部分は層流であり $R > 10$ の曲線部分は乱流流域である。Fig. 6 は同様に 5mm ラシヒリングの Re 数と摩擦係

数の関係である。

これらは、いずれもその圧には関係なく 1つの線上にのることがわかる。なお摩擦係数の計算において、ガス密度は上端と下端の平均圧の値であり、真空度の悪いところでは影響ないが 10mmHg 以下で流量の大きいところでは大きくきいてくる。これら Fig. 5~6 の曲線をまとめて示したのが Fig. 7 である。同時に(10)式 $f' = 4/Re'$ を図示した。 $1/4$ マクマホンの 35φ と 80φ では、あまり差がないが 5mm ラシヒリングでは f' は若干大きくなり 7mm ラシヒリングでは 相当に離れた値がえられている。なお(10)式と比べると f' は全てがかなり大きな値である。この曲線のづれはよくいわれる壁効果 (wall effect) のためだと思われる。

すでに発表されている壁効果の値を入れてやり、計算しプロットしたのが Fig. 8 である。Fig. 8 は 5mm 及び 7mm ラシヒリングについてのみ行ない、 $1/4$ マクマホンの値はそのままにしてある。

Fig. 8 より 7mm ラシヒリングを除き、非常によく一致することがわかる。即ち、壁効果の影響の少ないところではこれらの曲線は一致するものと思われる。(10)式 $f' = 4/Re'$ にこれらが、ずれるのは $f' = 4/Re'$ は完全な定常流の場合であり、充填物の流れはこれより若干ずれてくるものと思われる。

これらより充填物の摩擦係数は

$$Re' < 10 \text{ で}$$

$$f' = 6.7 Re^{-0.884} \dots\dots\dots (12)$$

$$Re' > 10 \text{ で}$$

$$f = 0.34 + 9.5 Re^{-1.22} \dots\dots\dots (13)$$

なる関係がえられる。

充填層の圧降下は真空度が 1~760mmHg の範囲でも Fanning の式は、充分成立し、この式から計算できる。ただし、ここで注意しなければいけないのは、前にも述べたように(6)、(10)式のガス密度は充填層の平均圧の値であり、 u_0 は空筒の時の速度である。

摩擦係数は(12)、(13)式で求められるがその誤差は 10% 程度は考えねばならない。なお、真空度が良く、充填物の空間の小さいものでは、しばしばその時の気体の平均自由行程が、充填層の空間、長さと同じくらいになる場合がある。この様な時は当然流れはすべり流から分子流と

変ってくるからこれらの式は適用できない。

5. 結 論

彼来、あまり知られていなかった比較的高真空の領域における流量—圧降下の関係を実測し Fanning の式で充分表わされることを確かめた。

Symbols used

ΔP : 圧降下 (Pressure drop)
[kg/m²]

f : 摩擦係数 (Friction factor)
[—]

L : 充填長さ (Height of effective packed beds.) [m]

u_0 : 空筒速度 (Velocity of gas based on the cross section of empty tower) [m/h]

u : 充填層の空間速度 (Velocity of gas through packing) [m/h]

ρ : ガス密度 (Density of gas) [kg/m³]

S : 充填物の空間断面積 (Cross section of packing) [m²]

U : 周辺長さ (Perimeter) [m]

ed : 空間率 (Free space) [—]

at : 比表面積 (Packing area) [m²/m³]

D : 塔径 (Diameter of tower) [m]

μ : 粘度 (Viscosity of gas) [kg/mh]

Re : レイノルズ数 (Reynolds number) [—]

G_0 : 質量速度 (Space velocity based on empty column) [kg/m²h]

Re' : 修正レイノルズ数 (Modified Reynolds number) [—]

[文 献]

- (1) 中川、角田、真空 5, 69 (1962)
- (2) L. Abraham : Chem. Eng. Prog., 58, 47 (1962)
- (3) J. T. L. McConnachie : A I Ch E Jr., 9, 60 (1963)
- (4) A. W. Charles Jr. : A I Ch E Jr., 9, 81 (1963)

Fig. 8 Re . No. vs Friction Factor ; variuos packing.