気-液混合効果の動力効率による攪拌装置の最適構造の検討*

森 俊 郎**・山 口 巖***
永 田 進 治****

結 言

通気攪拌による気-液間の物質移動促進のための攪拌効果は、主として気泡の微粒化と滞留量の増加による界面積の増加にあり、また従来の実験結果^{8,9)}では液側拡散抵抗支配とされているから、攪拌効果は液側容量係数(k_La)で表示されるとみてよい。等しい k_La を与える結果でも、所要動力の少ない方が有利なので、攪拌装置の優劣は容量係数と所要動力により比較すべきである。

著者らは k_La と液単位体積当りの所要動力 P_V との比を仮りに「気-液混合効果の動力効率」とよび、これを比較の基準として攪拌翼形状、翼高さ、邪魔板などの最適条件の決定を試みた。

Fig. 1 Impellers used

Table 1 Dimensions of the impellers used

Impellers	A		B	C		D		E	
n_p	3	6	6	6	3	6	12	6	12
D [cm]	15	15	15	7.5 8.8 10 11.8 15	15	10	15	15	12
D_w [cm]	1.5	1.5 2 3	1.5	$D/5$	1.5	1	1.5 2 3	1.5	1.5
D_L [cm]	—	—	—	$D/4$	3.75	2.5	3.75	3.75	5.0

攪拌液の混合効果を槽全体にわたる循環流と液の部分的乱れによる部分とに大別すると、気-液系では後者をより激しく、すなわち流れの全ヘッド（主として速度、圧力頭）をより大にする場合、上記の動力効率がよいと考えられるので、このようになる装置条件を追究した。

1. 実験条件と実験方法

内径 $T=30\text{cm}$ の扁平底面円筒槽を用い、特記しない限り、幅 $B=3\text{cm}$ の邪魔板 4 枚を槽壁に沿って槽底まで挿入し、攪拌翼は槽底から液深の $1/3$ の高さに設け、液深 Z は槽径 T に等しくとった。

使用したものの中の代表的な 6 枚羽根翼の形状および寸法を表わす記号を Fig. 1 に、その寸法を Table 1 に示す。ガス吹込みのスパーチャーは環径 $d=0.8D$ 、孔径 $0.01D$ 、孔数 10 個のものを翼と槽底のちょうど中間に固定した。

攪拌動力の測定には京大式第 2 および 3 号動力計⁴⁾を用いた。容量係数は 0.1N 、 KOH 水溶液に対する純酸素の物理吸収速度をポーログラフ法で測定して求めた。実験温度はいずれも $25\pm 0.5^\circ\text{C}$ である。

2. 動力効率

攪拌下に通気した場合の容量係数の測定値を k_La 、攪拌しないでスパーチャーのみによりガスを分散させたときの吸収量から求められる値を $(k_La)_0$ とし、これらの差を $(k_La)_I$ で表わせば、翼のみによる攪拌の効果は $(k_La)_I$ で示されるものと考えられる。

$$(k_La)_I = k_La - (k_La)_0 \quad (1)$$

$$= \frac{1}{t} \ln \frac{C_s - C_0}{C_s - C} \quad (2)$$

ここで t は通気時間、 C_s はガス飽和濃度、 C_0

* <Optimum Geometry of Agitator for Power Efficiency on Gas-Liquid Mixing>

Received on September 20, 1963

** Shunro Mori (Central Research Laboratory of Sanraku-Ocean Co., Ltd., Fujisawa, Japan)

*** Iwao Yamaguchi (Osaka Head Office, Teijin, Ltd., Osaka, Japan)

**** Shinji Nagata (Dept. of Chem. Eng., Kyoto, Univ., Kyoto, Japan)

は攪拌しないで t 時間通気したときのガスの溶解濃度、 C は攪拌下に t 時間通気したときの濃度を示す。

$(k_L a)_I$ と P_V の比を E_p で表わし、これを気-液混合効果の動力効率とよぶことにしたい。

$$E_p = (k_L a)_I / P_V \quad (3)$$

E_p の値により種々の装置の攪拌効果が比較される。

3. 攪拌翼の形状と攪拌効果

3.1 翼形状の影響 攪拌液の流動状態を槽全体の循環流と部分的な乱れとに大別すると、後者の方が気泡の分散に対して効果的であると考えられ、強い剪断流をひき起す攪拌が望ましい。Fig. 1 に示す翼のうち、剪断性能の高いといわれる逆弯曲羽根翼 (B) は著者らの実験で、同じ大きさの 6 枚羽根パドル (A) と比較してやや高い効果が認められた。

大山ら⁵⁾の研究結果に基づいて、著者らは Rushton 型タービン (C) の上半の羽根板を除いた変形タービン (D) を試作し、その効果を比較した。一定の通気量 Q 、攪拌速度 N では所要動力は Rushton 型の約 1/3、 $k_L a$ は 1/2~2/3 で、 E_p は約 50% 高いことを認めた。

翼長 $D=15\text{ cm}$ 、羽根板幅 $D_w=1.5\text{ cm}$ の大きさの等しいパドル (A)、変形タービン (D)、および羽根付円板タービン (Vaned disk turbine) (E) を比較すると、D と E は A の約 2 倍の E_p を与える。これは攪拌羽根に取付けられている円板が気泡を捕捉し、気泡の分散を効果的にする結果と考えられるが、 D_w が広くなると動力の増加に比較してこの効果が弱くなり、 $D_w=3\text{ cm}$ では、大きさの等しい 6 枚羽根パドル、横形タービン、Rushton 型タービンおよび羽根付円板タービンの間に E_p の差がほとんど認められなくなる。また、 $D_w=1.5\text{ cm}$ の 6 枚羽根パドルと $D_w=3\text{ cm}$ の 3 枚羽根パドルではその効果がほぼ等しいことを認めた。

Rushton⁷⁾ および Kneule ら⁸⁾は十分強い攪拌状態では、一定の動力に対する容量係数の値は翼の形状によっても変化されないと述べているが、著者らの実験条件下 (P_V , 50~70 [Kg-sec $\cdot$ m³] 以下のやや弱い攪拌状態) では上述のように翼の形状による差異が明瞭に認められた。

3.2 翼長の影響 通気攪拌では槽径に比して翼長の小さいものを用いるのが有効であるといわれている⁶⁾。Fig. 2 は Rushton 型タービンについて、幾何学的に相似な翼の $D=7.5, 8.8, 10, 11.8, 15\text{ cm}$ の 5 種について E_p の値を比較したもので、 $D=T/3$ (10 cm) のとき最も効果的であることを示している。同様の結果が変形タービンについても得られた。

Fig. 2 Effect of impeller size on E_p at equal power input (Rushton type turbine, $P_V=20\text{ Kg-m/sec-m}^3$)

Fig. 3 Influence of the number of blades ($D=15\text{ cm}$, $D_w=1.5\text{ cm}$, $P_V=20\text{ Kg-m/sec-m}^3$)

Fig. 4 Influence of width of blades ($D=15\text{ cm}$, $n_p=6$, $P_V=20\text{ Kg-m/sec-m}^3$)

3.3 羽根板枚数および羽根板幅の影響 $D=15\text{ cm}$ 、 $D_w=1.5\text{ cm}$ のパドルと変形タービンについて、羽根板枚数 n_p と E_p の関係を Fig. 3 に示す。一般に n_p 小なるほど E_p は高くなるが、 n_p の減少の効果はパドルの方が著しい。

Fig. 4 は $D=15\text{ cm}$ 、 $n_p=6$ のパドルおよび変形ター

Fig. 5 Effect of impeller distance off tank bottom (Modified turbine, $D=15$ cm, $D_W=1.5$ cm, $n_p=6$, $Q=20.2$, l/min , $Z=T=30$ cm)

Fig. 6 Effect of impeller distance off tank bottom (Modified turbine)

ピンについて E_p と D_W の関係を示したもので、変形タービンでは $D_W=1.5$ cm で E_p の最大値を与える。

4. 邪魔板条件と搅拌効果

$D=15$ cm, $D_W=1.5$ cm の変形タービンを用いて、邪魔板を槽底まで挿入したときの邪魔板枚数 n_B と幅 B の影響を比較し、 $B=2$ cm のときは $n_B=4$, $B=3$, 3.75 cm のときは $n_B=3$ で最も効果的であることを認めた。この結果は完全邪魔板条件 [搅拌速度および通気量が一

定のとき動力消費量が最大となる条件で近似的に次式で示される。 $(B/T)n_B=0.5$] は通気搅拌操作では効果的な条件でなく、 $(B/T)n_B=0.3$ をとるべきであることを示している。しかし邪魔板条件の E_p に対する影響は翼の形状のそれに比較して小さい。

5. 翼取付高さおよび液深さの影響

気泡表面からの物質移動が滞留時間に比例して増大するとすれば、同じ液深 Z の槽について翼の高さ C を変えれば、槽全体についての物質移動速度 W_{O_2} は翼から液面までの高さ G の増加につれてほぼ比例的に増大するはずであるが、Fig. 5 に示すように実際には G に対して W_{O_2} はそれほど影響を受けないで、 G の 0.15 乗に比例する結果を得た。

翼取付高さ C と E_p の関係は Fig. 6 に示すとおりで、弱い搅拌状態のときは $C=Z/2$ 、やや強いときは $Z/3$ で E_p は最大になる。

$Z/T=0.5\sim 1.2$ の範囲では E_p は Z の 0.3 乗に比例して増加する結果を得た。

6. 考 察

気泡表面から液中へのガスの溶解速度は気泡径によっても左右される^{1,2)}。普通の搅拌条件下で得られる $0.04\sim 0.4$ cm の直径の気泡では液境膜の更新速度が液の部分的な乱れ (剪断流) に影響され、乱れの大きいところでは物質移動速度も大きくなると考えられる。5 節における実験結果から、物質移動が槽内一様に起るのでなく翼の近傍ほど高い値をとることが推察されるが、これは気泡の発生に伴う新しい界面の急激な生成と強い剪断流 (乱れ) による液境膜の急速な更新が搅拌羽根の近傍で著しいためであろうと考えられる。

以上の結果から搅拌装置の形状は槽全体の循環流をある程度少なくして、部分的な液の乱れを強くするようなものが望ましいと思われる。そのためには上述の実験結果から明らかなごとく、邪魔板の受ける抵抗を幾分弱くし、羽根板枚数および幅が小さい、翼長の比較的短かい翼を用いて翼の回転抵抗をある程度小さくして高速度で回転させるのが液の乱れを大きくするのに効果的であり、したがって高い動力効率が得られるものと思われる。

Nomenclature

a : surface area of bubbles per unit volume of liquid [m²/m³]
 B : width of a baffle plate [cm]

C : height of impeller off bottom [cm]
 d : diameter of sparger [cm]
 D : diameter of an impeller [cm]

D_L : length of a blade of an impeller [cm]
 D_W : width of a blade of an impeller [cm]
 $E_p=(k_L a)_I/P_V$: power efficiency on gas-liquid mixing effect [1/min]/[Kg-m/sec-m³]
 $G=Z-C$ [cm]
 $k_L a$: volumetric coefficient of absorption under agitation [l/min]
 $(k_L a)_0$: volumetric coefficient of absorption without agitation [l/min]
 $(k_L a)_I=k_L a-(k_L a)_0$: volumetric coefficient of absorption under net effect of agitation [l/min]

n_B : number of baffle plates [—]
 n_p : number of blades of an impeller [—]
 N : agitator speed [r.p.m.]
 P_V : power consumption per unit volume of liquid [Kg-m/sec-m³]
 Q : gas feed rate [l/min]
 t : time [min]
 T : tank diameter [cm]
 V : volume of agitated liquid [m³]
 W : total absorption rate of oxygen into liquid [g-mole O₂/sec]

Literature cited

- 1) Grassmann, P.: *Chemie-Ing. Tech.*, **31**, 148 (1959)
- 2) Hammerton, D. and Garner, F. H.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **32**, 18 (1954)
- 3) Karwat, H. and Kneule, F.: *Chemie-Ing. Tech.*, **31**, 588 (1959)
- 4) Nagata, S., et al.: *Chem. Eng. (Japan)*, **20**, 272 (1956)
- 5) Oyama, Y. and Endoh, K.: *Ibid.*, **18**, 2 (1955)
- 6) Rushton, J. H. and Oldshue, J. Y.: *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 161 (1953)
- 7) Rushton, J. H., et al.: *Ibid.*, **52**, 319 (1956)
- 8) Solomon, G. L. and Perkin, M. P.: *J. appl. Chem.*, **8**, 251 (1958)
- 9) Yoshida, F., et al.: *Ind. Eng. Chem.*, **52**, 435 (1960)

非 ニ ュ ー ト ン 流 体 の 流 動*

—見 かけ 剪 断 速 度 の 決 定—

佐 藤 忠 正**・谷 山 巖**

は じ め に

最近非ニュートン流体に関する研究が盛んになってきたが、問題はレイノルズ数をどのように定義するか、すなわち見かけの粘度をどうとるかということに帰結するようである。円管内層流のように単純な剪断の場合は理論解も得られるし—もちろん着目する流体の剪断応力と剪断速度の関係がわかっている場合—問題はそれほど複雑でない。しかし攪拌槽内のように流動状態が複雑で単純な剪断の状態にない場合には困難な問題が多い。

伊藤³⁾はこの問題を見かけ相似の法則を確立することによって解決した。Metzner⁴⁾は攪拌所要動力について伊藤の相似則と同じ原理からレイノルズ数を求め、さらに攪拌槽では見かけの剪断速度は回転数に比例するとした。ここで伊藤の見かけ相似則を少し変形すればMetznerらの攪拌槽中の見かけ剪断速度の関係が証明できることを明らかにしたい。

§1 見かけ相似則の変形

運動エネルギーの方程式は¹⁾

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) = -(\nabla \cdot p \mathbf{v}) - p(-\nabla \cdot \mathbf{v}) - (\nabla \cdot [\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v}]) + (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}) + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{F}) \quad (1)$$

いま流体は非圧縮性であり、また π を次のようにおくと

$$(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\pi = p\delta + \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

(1) 式は次のように書きかえられる。

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) = -(\nabla \cdot [\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{v}]) + (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}) + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{F}) \quad (4)$$

その表面が流体と同じ速度で運動している場合、(4) 式の体積分は

$$\begin{aligned} \int_V \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) dV &= \frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} \rho v^2 dV \\ &= - \int_V (\nabla \cdot [\boldsymbol{\pi} \cdot \mathbf{v}]) dV + \int_V (\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v}) dV + \int_V (\mathbf{v} \cdot \mathbf{F}) dV \end{aligned} \quad (5)$$

* <Flow of Non-Newtonian Fluids —Determination of the apparent shear rate—>

Received on January 29, 1964

** T. Sato and I. Taniyama (Yokkaichi Research Laboratory, Japan Synthetic Rubber, Co. Ltd., Yokkaichi, Japan)

電界を加えた場合のスラリ回分沈降特性 (油川 博, 化学工学, 28, 732~9 (1964)) 本報文は, 粉粒体表面と分散媒との間に生ずる電位の特性を利用して, スラリに電界を加えることによって沈降速度ならびに最大濃縮度が重力沈降のそれに比べて著しく増大することを明らかにしたものである。スラリに電界を加えた場合の沈降速度は, 重力沈降速度と電気泳動速度の和として求められることを示し, ジュール熱による粘度低下の影響についても検討した。また, 電界によって濃縮度が増加する理由については, スラッジ層の粒子が組織化されて固定化する結果電気浸透現象が生じ, このために脱水されるものと推察した。

粘性流れ域における充填層内粒子-流体間物質移動 (田中久弥・北浦嘉之, 化学工学, 28, 740~7 (1964)) 層流域における充填層内単一粒子からの物質移動にたいして, 空間率の影響を i) 流れにたいする粒子相互の干渉に起因するものと ii) 移動物質の分子拡散にたいする他粒子の干渉に起因するものに分けて解析した。その結果, 強制対流支配および分子拡散支配のそれぞれについて移動速度の空間率特性を $A'(a/b)$ ならびに $a(a/b)$ なる二つの特性関数で表わすことができた。これらをもとに充填層内積層単一活性球による結果を広範囲の空間率域で整理した。

同位体クロマトグラフィによる炭酸ガスの多孔質粒子内自己拡散係数の決定 (手島英夫・森田徳義, 化学工学, 28, 748~54 (1964)) 流通系において, $1/8" \times 1/8"$ 柱状アルミナベレット内への炭酸ガスの自己拡散係数を, パルスで与えた $^{14}\text{CO}_2$ のクロマトグラムのピークの位置, すなわち保持時間と気体流速との関係から決定した。本実験条件の範囲内では保持時間は粒子内拡散で支配されることが示され, 得られた拡散係数を van Deemter の方法および Rothfeld の実測式と比較して, 本報文の方法がほぼ正確な拡散係数を与えることを示した。

メタノール-水系の拡散に関する研究 (高松武一郎・平岡正勝・田中幹也・井上嘉亀・大杉彰, 化学工学, 28, 755~60 (1964)) 屈折率-濃度関係が非線形であり, 混合による容積変化が無視しえない非理想溶液の一例としてメタノール-水系を選び, $0 \sim 100$, $0 \sim 20$, $20 \sim 40$, $0 \sim 40$, $60 \sim 80$, $80 \sim 100$, $60 \sim 100$ wt% の各溶液の組合わせに対して, ジュリーレン・ナイフエッジ法によるデータを不可逆過程の熱力学の理論にもとづいて解析し, 拡散係数と濃度の関係を求めた。これらの結果は, 容積変化の影響が無視しえず, 接触初期の拡散係数が二液の濃度のとり方に依存することを示した。これについて分子会合の面から考察を行なった。

噴霧乾燥粉乳の物理的性質に及ぼす乾燥条件の影響について (石岡要造, 化学工学, 28, 761~8 (1964)) 牛乳の噴霧乾燥において, 噴霧液滴と乾燥粒子との関係をしらべた。乾燥可能な条件範囲では, 乾燥粒子径は液滴粒子径よりも小さい。乾燥粒子の容積は蒸発しなかった残存固形の容積ではなく, その内部に空気を含んだ容積である。したがって, 乾燥粒子径は, 固形容積と空気容積の和の立方根に等しい。その空気量は, 噴霧液滴の含水率が高ければ高いほど多く, また送入熱風温度が高ければ高いほど多いという関係を見出した。

3成分系気液平衡データの一推算法 (広瀬泰雄, 津田充利, 長谷川則昭, 化学工学, 28, 769~71 (1964)) 3成分系の気液平衡データは全組成領域にわたって必要なことはほとんどない。たとえ一部分に限るとしても蒸留計算を行なうためには平滑化をする必要上数多くの実測点を必要とする。この方法は実験回数を減らそうとする試みで, その基礎になっていることは, Margules の式の定数は従来考えられていたような物理的意味を必ずしも持つ必要はなく, 任意の値でもよいということである。2, 3 の例について説明を試みた。

気-液混合効果の動力効率による攪拌装置の最適構造の検討 (山口 巖・森 俊郎・永田進治, 化学工学, 28, 772~5 (1964)) 通気攪拌における液側容量係数と攪拌所要動力との比を「気-液混合効果の動力効率」とよび, これを比較の基準として通気攪拌装置の攪拌翼形状, 翼高さ, 邪魔板などの最適条件の決定を試みた。気-液系では槽内全体にわたる循環流より液の部分的乱れすなわち主として速度一, 圧力頭からなる全ヘッドをより大にする場合, 上記の動力効率がよい。これには邪魔板の受ける抵抗を幾分弱くし, 羽根枚数および幅が小さく翼長が槽内径の3分の1程度に小にし, また翼の回転抵抗をある程度小にして高速回転させるのがよい。

非ニュートン流体の流動——見掛け剪断速度の決定—— (佐藤忠正・谷山 巖, 化学工学, 28, 775~8 (1964))

運動のエネルギー式を代表剪断応力を用いて無次元化し, 代表剪断応力を含む新しいレイノルズ数, 見かけ粘度を定義した。代表剪断応力を適当にえらべばニュートン流体に対し見かけ粘度は物理的ニュートン粘度と一致し, 非ニュートン流体に対しては見かけ剪断速度を決定することができる。見かけ剪断速度は円管内流れでは $8\pi/D$ に比例し, 攪拌槽では回転数に比例することが明らかとなった。