水平軸攪拌気液接触装置の接触界面積に及ぼす幾何学的条件の影響

玉 木 康 夫[†]・原 田 英 二
伊 藤 四 郎^{††}

山形大学工学部 化学工学科

緒 言

円筒容器内の液体を水平軸に取り付けたインペラによって攪拌し、気体と液体の接触を図る水平軸攪拌気液接触装置は、吸収に関する容量係数の大きい接触装置であることが知られている^{1,3,5)}。

先に著者らは6枚平羽根タービンをインペラとする、幾何学的に相似な水平軸攪拌気液接触装置内の気-液接触界面積と表面更新率を Danckwerts plot 法によって測定し、回転数や動力との関係を検討した⁷⁾。

本報は、気液接触界面積に及ぼす装置の幾何学的条件やインペラの浸液深さの影響を実験的に検討し、さらに単位液量あたりの動力と界面積との関係を考察するものである。

これらの結果は水平軸攪拌気液接触装置のスケール・アップに際し有用であろう。

1. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。円筒形容器②の中心部に水平に設けた回転軸に、平羽根タービン③を取り付け、これを回転して気-液の接触を図る。装置の規模と実験条件を Table 1 に示した。

所定量のコバルトイオン触媒を加えた初濃度約 0.8 mol/l の亜硫酸ナトリウム水溶液を容器に入れ、これに純酸素ガスを吸収させ⁸⁾、容積吸収速度を石けん膜流量計④によって測定する。

この吸収速度に Danckwerts plot 法^{4,9)}を適用し、接触界面積 α [cm²/cm³] と表面更新率を算出する。更新率に及ぼす装置の幾何学的条件の影響は続報に述べる。

実験方法の詳細は前報⁷⁾と同様である。

2. 実験結果の整理

水平軸攪拌機の動力を測定した際^{8,9)}に観察されたように、回転フルード数 ($Fr = D_i n^2/g$) が 0.02~0.03 を境に、液体の自由表面の復元が不完全となり、このフルード数よりフルード数が大きい場合、気体がインペラによ

って液中へ巻き込まれ液中に多数の気泡が分散している状態になる。

このフルード数を臨界フルード数 (Fr_c) とし⁹⁾、これを基準に攪拌状態を低フルード数領域と高フルード数領域に大別した⁹⁾。

羽根幅比 W/D_i が 0.2 の幾何学的に相似な装置を用いて得られた結果によれば、低フルード数領域における界面積の増加量は次式によって表される⁷⁾。

$$(a-a_0)D_i = 4.56\Delta P_0^{1.20} \quad (1)$$

ここに a_0 [cm²/cm³] は液が静止している時の比接触界面積、 ΔP_0 [Kg・m/sec・m³] は単位液量あたりの液表面の変形に費やされた動力 ($=\Delta P/V_i$)^{6,11)} である。

一方、高フルード数領域における界面積の増加量は

$$(a-a_0)D_i = 0.383(P_0 \cdot We)^{0.50} \quad (2)$$

で表すことができる⁷⁾。ここに P_0 [Kg・m/sec・m³] は単位液量あたりの動力¹¹⁾、 We はウェバー数である。

幾何学的条件を変えて得られた界面積を Eqs. (1) および (2) の形に整理し、これと幾何学的条件の関係を検討する。

3. 実験結果および考察

3・1 羽根幅

インペラ直径 0.132 m、6 枚平羽根タービンの無次元浸液深さ一定 ($1-h^*=0.64$, h^* は Fig. 1 に示すように回転軸の中心から下方、液面までの距離 h をインペラ半径で無次元化した量⁹⁾ である) の条件で得られる気液接触界面積を Fig. 2 に示す。図に見られるように、フルード数が大きいほど界面積は大きく、羽根幅が増大すると界面積は増加する。しかし、羽根幅比が 0.4 以上では界面積の増加する割合は、小さくなることが認められる。

Fig. 2 の結果を低フルード数と高フルード数の二つの領域にわけて整理した。

低フルード数領域における界面積の増加量 $(a-a_0)D_i$ と羽根幅比の関係を Fig. 3 に示した。

羽根幅比 0.4 以下で、界面積の増加量は羽根幅比にほぼ比例して増加することがわかる。

Eq. (1) と同じ整理法によって、界面積の増加量と動

[†] 一関工業高等専門学校 化学工学科

^{††} 東京工業大学工学部化学工学科

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Variation of specific interfacial area with width of blade ($D_t=0.15$ m, $D_i=0.132$ m, $B=6$, $1-h^*=0.64$)

Table 1 Dimensions of apparatus and experimental conditions

D_t :	0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.42 [m]
D_i :	0.10~0.40 [m]
L :	0.15~0.42 [m]
W/D_i :	0.20~0.60 [—]
B :	2 ~16 [—]
n :	0.18~4.60 [sec ⁻¹]

力の関係を表すと Fig. 4 のようになり、バラツキは大きいが $(a-a_0)D_i \propto \Delta P_v^{1.20}$ の関係がほぼ成り立つことがわかる。

高フルード数領域における界面積の増加量を Eq. (2) にならって整理し¹¹⁾、羽根幅比に対しプロットすると Fig. 5 のようになる。

羽根幅比 0.3 以上では、Eq. (2) の係数がほぼ 0.5 であることがわかる。

高フルード数領域における界面積の増加は、主にインペラによって巻き込まれた分散気泡群による⁷⁾から、羽根幅比 0.2 以下では羽根幅による気泡生成の効果が小さ

Fig. 3 Relationship between increment of interfacial area and width of blade in lower Fr region

Fig. 4 $(a-a_0)D_i / \Delta P_v^{1.20}$ vs. width of blade

Fig. 5 Relationship between $(a-a_0)D_i / (P_v \cdot We)^{0.50}$ and width of blade in higher Fr region

いものと考えられる。

3・2 平羽根数

羽根幅比 0.2 一定のもとに、タービンインペラの平羽根数を変えて得られる界面積を Fig. 6 に示す。この図から羽根数が増加すると界面積がやや増大することがわかる。

低フルード数領域におけるこの関係を、界面積の増加量と羽根数の関係として Fig. 7 に、Eq. (1) の形に整理し Fig. 8 に示す。

Fig. 6 の下方の回転数 0.803 rps 以下の 3 本の曲線が、Fig. 8 では 1 本の直線で表されるから、低フルード

Fig. 6 Variation of specific interfacial area with number of impeller blades

Fig. 7 Effect of number of blades on the increment of interfacial area in lower Fr region

Fig. 8 $(\alpha - \alpha_0)D_i / \Delta P_v^{1.20}$ vs. number of blades

数領域では羽根数によらず、Eq. (1) が成り立つことがわかる。

Fig. 8 に見られるように、 $(\alpha - \alpha_0)D_i / \Delta P_v^{1.20}$ は羽根数の 0.72 乗に逆比例することから、羽根数が少ないほど液表面の変形に費やされたエネルギー^{9,11)}のうち、界面積の増加に寄与するエネルギーの割合が大きいがわかる。

高フルード数領域では、Fig. 9 に示すように、羽根数によらず Eq. (2) がほぼ成り立つことが認められる。

3.3 インペラ浸液深さ

Fig. 9 Relationship between $(\alpha - \alpha_0)D_i$ and $P_0 We$ in higher Fr region (parameter is number of impeller blades)

Fig. 10 Variation of interfacial area with dimensionless immersion depth of impeller

円筒容器内の液量を変えて得られる界面積を、インペラの無次元浸液深さ $(1 - h^*)$ に対しプロットし Fig. 10 に示す。ここでは W/D_i は 0.20、平均根数は 6 枚のインペラを用いた。

Fig. 10 に見られるように、界面積は上に凸の曲線で表される。この場合、一般に浸液深さ(液量)が増加すると、静止時の比界面積 α_0 は小さくなるから、界面積の増加量 $(\alpha - \alpha_0)D_i$ は浸液深さの増加に伴って増大する。なお装置内の気液接触総面積 A [cm^2] ($= \alpha V_l$) は浸液深さが大きくなると増加する。

低フルード数領域における界面積の増加量を Eq. (1) にならない、 $\Delta P_v^{1.20}$ で割り無次元浸液深さに対しプロットし、Fig. 11 に示す。

縦軸の値は浸液深さが大きくなるに伴って増加する傾向を示し、Eq. (1) がほぼ成立することがわかる。

高フルード数領域における界面積の増加量は Eq. (2) にはほぼ一致した。

3.4 容器直径の影響

インペラの無次元浸液深さ一定の条件で、インペラ直径と容器直径の比を変えて界面積を測定した。その結

Fig. 11 $(a - a_0)D_i / \Delta P_v^{1.20}$ vs. $1 - h^*$ in lower Fr region

果、インペラの条件（インペラ直径、羽根数、羽根幅、回転数など）が同じ場合、直径比 D_i/D_t が 1 に近づくとき気液接触総面積 A [cm^2] は大きくなる。

低フルード数領域における界面積の増加量を $(a - a_0)D_i / \Delta P_v^{1.20}$ の形にし、これと直径比との関係を Fig. 12 に示す。同図より直径比が 1.5 以上では、界面積の増加量は $\Delta P_v^{1.20}$ に比例し、Eq. (1) の関係がほぼ成り立つことが認められる。しかし、直径比が 1 に近いところ、すなわち円筒壁面と羽根先端との隙間の小さい場合は、縦軸の値は小さい。この直径比が 1 に近いところでは、界面積 a の値は大きい、円筒壁面の摩擦などに消費されるエネルギーも大きい¹¹⁾ため、液表面の変形に費やされるエネルギーのうち、気-液接触面積の増加に寄与する割合が小さくなるものと考えられる。

高フルード数領域における界面積の増加量を $(P_v \cdot We)^{0.50}$ で割り、これと直径比との関係を Fig. 13 に示す。

同図より直径比が変わっても、Eq. (2) の関係が整理することが可能であることがわかる。直径比が 1 に近いところで縦軸の値が大きくなっているが、ここでは消費動力も大きくなる¹¹⁾。

このことは、直径比が 1 に近い場合、円筒壁面上の液膜の界面積への寄与と、羽根先端から円筒壁面までの隙間が小さいため、液体の流動状態が複雑になり、液中へ巻き込まれる気泡量増加の寄与があるためと考えられる。

3.5 タービン間隔（多段翼のタービン数）

1 個のタービンを用いて、容器長さを変えて行った実験結果¹⁰⁾では、界面積は容器長さにほぼ反比例し、表面更新率は装置長さがインペラ直径の 3 倍以上になるとやや減少する傾向を示した。このことは、水平軸攪拌気液接触装置内の気液間の物質移動量の大部分がタービンインペラの周辺で行われることを示唆している。同じ結果を安藤²⁾も報告している。

Fig. 12 Effect of diameter ratio on the increment of area in lower Fr region ($W/D_t = 0.20$, $B = 6$, $1 - h^* = 0.638$)

Fig. 13 Effect of diameter ratio on the $(a - a_0)D_i / (P_v \cdot We)^{0.50}$ in higher Fr region ($W/D_t = 0.20$, $B = 6$, $1 - h^* = 0.638$)

Fig. 14 Spacing of multiple turbine impellers

したがって、ここでは Fig. 14 に示すような配置の多段翼を用いた際のタービン間隔 L_0 とインペラ直径の比に対し、界面積をプロットし Fig. 15 に、界面積の増加量と間隔比の関係を Fig. 16 に示した。

フルード数の高低によらず、Fig. 16 から界面積の増加量はタービン間隔に逆比例することがわかる。

なおこの結果は、界面積の増加量が多段翼のタービン数にほぼ比例することを示唆している。

結 言

平羽根タービンをインペラとする水平軸攪拌気液接触装置内の接触界面積に及ぼす装置の幾何学的条件の影響

Fig. 15 Variation of specific interfacial area with spacing of impeller ($D_t=0.15$ m, $D_i=0.121$ m, $L=0.40$ m, $W/D_i=0.20$ $B=6$, $1-h^*=0.632$)

を実験的に検討した。さらに界面積の増加量と動力の関係を考察した。

界面積の測定は Danckwerts plot 法によった。主な結果として

1) 低フルード数領域では、界面積の増加量は幾何学的条件を変えた場合も、単位液量あたりの液表面の変形に要した動力の 1.2 乗に比例する。界面積の増加量は羽根幅にほぼ比例し、タービン間隔に反比例する。

2) 高フルード数領域における界面積の増加量は、単位液量あたりの動力とウェーバー数の積の 1/2 乗に比例する。

3) 幾何学的条件と界面積の増加量との関係を図示した。これらの図はこの型式の接触装置のスケール・アップに際し、有用であろう。

【付 記】 本実験に協力された 堀利夫、岡崎保博ならびに武田博の諸氏に感謝の意を表します。

Nomenclature

A	= gas-liquid interfacial area	[cm ²]
a	= specific interfacial area $= A/V_L$	[cm ² /cm ³]
a_0	= specific interfacial area at rest	[cm ² /cm ³]
B	= number of blades	[-]
D_i	= impeller diameter	[m], [cm]
D_t	= diameter of cylindrical vessel	[m]
Fr	= Froude number $= D_i n^2 / g$	[-]
$(Fr)_c$	= critical Froude number $= D_i n_c^2 / g$	[-]
h	= distance from the center of rotating shaft to liquid surface	[m]
h^*	= dimensionless distance $= 2h/D_i$	[-]
L	= length of cylindrical vessel	[m]
L_0	= spacing of turbine impellers	[m]

Fig. 16 Relationship between increment of interfacial area and spacing of turbines

n	= impeller speed	[1/sec]
P	= power	[Kg·m/sec]
P_v	= power dissipated per unit liquid volume $= P/V_L$	[Kg·m/sec·m ³]
V_L	= liquid volume	[cm ³ , m ³]
W	= width of impeller blade	[m]
We	= Weber number $= D_i^3 n^2 \rho / \sigma$	[-]
Δ	= power number due to deformation of liquid surface	[-]
ΔP	= power due to deformation of liquid surface	[Kg·m/sec]
ΔP_v	= ΔP per unit liquid volume $= \Delta P/V_L$	[Kg·m/sec·m ³]
ρ	= density of liquid	[kg/m ³]
σ	= interfacial tension	[kg/sec ²]

Literature cited

- 1) Andou, K., H. Hara and K. Endoh: *Kagaku Kōgaku*, 35, 1379 (1971)
- 2) Andou, K. and K. Endoh: *Kagaku Kōgaku*, 37, 528 (1973)
- 3) Ganz, S. N.: *Zh. Prikl. Khim.*, 30, 1311, 1604 (1957)
- 4) Sharma, M. M. and P. V. Danckwerts: *Brit. Chem. Eng.*, 15, 522 (1970)
- 5) Takagi, S. and Y. Tamaki: *Ann. Rep. Asahi Glass Fund. for Contribution to Ind. Techn.*, 12, 339 (1966)
- 6) Tamaki, Y. and S. Ito: *Kagaku Kōgaku*, 37, 725, 943 (1973)
- 7) Tamaki, Y., E. Harada and S. Ito: *Kagaku Kōgaku*, 38, 601 (1974)
- 8) Tamaki, Y. and E. Harada: *Bull. of Yamagata Univ. (Eng.)*, 12 (No. 2), 1 (1973)
- 9) Tamaki, Y. and S. Ito: *Bull. of Yamagata Univ. (Eng.)*, 13 (No. 1), 205 (1974)
- 10) Tamaki, Y., E. Harada, T. Hori and S. Ito: Preprints of Tohoku Meeting of The Soc. of Chem. Engrs., p. 25 (1971)
- 11) Tamaki, Y. and S. Ito: *Kagaku Kōgaku*, 38, 594 (1974)

(1974 年 12 月 25 日受理; 化学工学協会新潟大会 (新潟, 1973 年 7 月) にて発表)

Effects of some Geometric Parameters on the Interfacial Area of Horizontal Shaft Agitating Gas-Liquid Contactor

Yasuo Tamaki,* Eiji Harada and Shiro Ito**

Dept. of Chem. Eng., Yamagata Univ., Yonezawa

Effects of some geometric parameters on the interfacial area of horizontal shaft agitating gas-liquid contactor have been studied experimentally, and the relationship between the interfacial area and power dissipated is discussed.

Increment of the interfacial area, $(a-a_0)$ is proportional to the width of impeller blade and to the number of turbines, where a is specific interfacial area and a_0 is specific interfacial area at rest.

Increment of the interfacial area may be expressed by

$$(a-a_0)D_i \propto \Delta P_v^{1.20} \quad (Fr < 3 \times 10^{-2})$$

$$(a-a_0)D_i \propto (P_v \cdot We)^{0.50} \quad (Fr > 3 \times 10^{-2})$$

where D_i is impeller diameter, ΔP_v is the power dissipated per unit volume of liquid which is due to the deformation of liquid surface, P_v is power dissipated per unit volume of liquid and We is Weber number.

Variations of the increment of interfacial area with these geometric factors are shown in figures, which should be useful for scaling-up of the contactor.

* Ichinoseki Tech. College, Ichinoseki

** Dept. of Chem. Eng., Tokyo Inst. of Tech., Tokyo