研究報告

振動によって流動化された粉体層内における 伝熱面からの伝熱*

Heat Transfer between Heating Surface and Vibro-fluidized Bed

吉田 哲夫** 向阪 保雄**

Tetsuo Yoshida Yasuo Kousaka

大塚 忠弘***

Tadahiro Otsuka

まえがき

この報告は容器の底板に振動を与えて容器内の粉体を強制的に流動化させたいわば特殊な流動層（以下振動流動層と呼ぶ）を対象とし、この層と層内部に入れられた球状伝熱面との伝熱について検討を行なったものである。このような研究によって得られる知見は、最近実用に供せられているこの種の流動層の設計、一般に発熱が著しいとされる振動ミルの冷却器の設計、さらには通気による均一系に近い流動層の基礎的性質の一面を知るなどに対して有用であろうと思われる。この種の流動層の伝熱に関しては Лайковская^{ら¹⁾}および Bukareva^{ら^{2),3)}}の報告がある。前者は空气中、粉体層中、振動流動層中に加熱された銅の小球を入れこれらの冷却曲線を比較している簡単なものであり、後者²⁾は振動流動層内に電熱線を入れた定常伝熱実験から伝熱係数を測定しこれを（振幅×振動数）で整理している。本報告では振動によって流動化された粉体層とその層内にある伝熱面との伝熱のメカニズムを磁性微粉末をコーティングしたトレーサを用いた粒子の移動速度の実験と対応させて検討を行なった。また比較のために通気によって流動化した一般の流動層の場合の伝熱係数についても検討を行なった。

1. 実験装置と方法

1.1 伝熱実験

実験に用いた流動層本体は概略を図1に示すように整流板のみに上下方向の単調和振動を与えることによって

粉体を流動化させることができると同時に通気によっても流動化できるようになっている。使用した流動化粉体は16~20, 35~42メッシュのガラスビーズおよび砂であり充てん高さは50~80mmである。層内にいれる伝熱体は中心に銅-コンスタンタン熱電対を埋込んだ10.3, 15.2, 19.9mmφのボールベアリング用鋼球（SUJ2）である。

実験方法は、あらかじめ砂浴中で約120°Cに加熱した鋼球を流動化粉体層の中心部に挿入、固定し、鋼球の中心温度の時間的变化をX-Yレコーダで記録する。このデータとハイスラ線図とを用いて球表面における伝熱係数を算出した。

1.2 粒子移動速度の実験

伝熱係数を支配する大きな因子として、粒子の移動速

図1 実験装置

昭和46年2月8日受理

* 化学工学協会にて発表（1968年8月北海道大会）

** 大阪府立大学工学部化学工学科（〒591 堺市百舌鳥梅町4-804）
TEL 0722-52-1161

*** 松下電工（株）（〒571 門真市大字門真）
TEL 06-908-1131

度があげられる。そこで振動流動層中の粒子の移動速度をつぎに述べる磁性粉体をトレーサに用いて調べた。まず磁性トレーサとしては、磁性率の高い酸化鉄の微粉末であるマグネタイト (Fe_3O_4 , 密度: 5.2g/cm^3 , 平均粒径: 0.4μ) を透明ラッカー, シンナーにそれぞれ重量比で $2:6:5$ の割合で混合し, これを流動化させようとするガラスビーズ, 砂などの粉体の表面にスプレーガンによって薄くコーティングしたものを用いた。このようにして得られるトレーサは密度および粒子形状の点においてコーティングしないものとあまり差異がなくまた磁気分離の面でも良好であった。実験方法は, 最初に粉体層内の一定の高さのところへ前記のトレーサを一定量 (層全体の $1/10$) 層状に充てんしておき, つぎにこれを一定時間流動化させた後, 層上部より順次約 $1/10$ づつ真空ポンプで粉体を採集する。採集された各層のトレーサ濃度は磁気分離によって求め, これより粒子の平均移動速度を算出した。なお通気によって流動化させる場合に対しては, 最初流動層と同じ抵抗をもたせた絞りに空気を導びいておき, 電磁弁によってこの絞里から流動層へと突然切替えて粉体を一定時間流動化させたのち再び同様にして電磁弁によって流動化を停止する。このときの流動化させた時間は記録計に記録させ前記の方法で粒子の平均移動速度を算出した。

2. 実験結果とその考察

2.1 各種の流動化条件における伝熱実験の比較

図2は伝熱球を挿入する粉体層の流動化条件を変えた場合の加熱鋼球の冷却曲線を示している。この図からわかるように振幅が小さい場合 (No. 5) および振動加速度が $1g$ 以下の場合 (No. 6) には振動の効果は少ない。No. 3, 4, 8 を比べてわかるように通気と振動との併用は振幅または振動加速度が上記のように小さくしなければ一般に振動のみの場合よりも伝熱が悪くなる。また通気流速が流動化開始速度をこえと No. 9, 10 にみられるように振動の効果がほとんどなくなってしまう。これは通気によって粉体層が浮き上がり下部の振動する整流板からの力の伝達が減少するためと考えられるので振動流動層に下部から通気する場合にはこのような現象に注意する必要がある。なお流動化開始速度は振動を付加したときとしないうちとで異なるが^{4,5)}、ここでは繁雑になるため特に区別することなく $\bar{U}_{mf}$ は振動を与えないときの流動化開始速度を用いている。

2.2 伝熱係数

図3, 4に前述の冷却曲線から求めた伝熱係数 h をまとめて示す。図3は振動流動層の伝熱係数を振動加速度

No.	冷却媒体	$\bar{U}$	f	K	備考
1	空気	—	—	—	
2	固定層	—	—	—	
3	"	$0.54\bar{U}_{mf}$	—	—	$\phi_A = 6.0\%$
4	振動流動層	"	30c/s	3	$\phi_A = 0.54\%$
5	"	—	60	3	
6	"	—	30	1	
7	"	—	30	2	
8	"	—	30	3	
9	流動層	$1.22\bar{U}_{mf}$	—	—	$\phi_A = 6.0\%$
10	"	"	60	3	"
11	"	$1.51\bar{U}_{mf}$	—	—	"

図2 種々の冷却媒体中における加熱鋼球の冷却線の比較 (条件は下表参照)

図3 振動流動層の伝熱係数

図4 通気による流動層の伝熱係数

を重力加速度で無次元化した K で整理しているが、その理由は K の小さい範囲においては粉体の運動がこれによって大きく支配されることに基づいている。すなわち $K < 1$ のときには、正確に伝熱係数を求め難いので図には示していないが非常に小さい値となり、 $K > 1$ となつてはじめて層内の粉体が流動化しはじめ伝熱係数も大きくなって来る。したがって $K \equiv 1$ はちょうど通気による一般の流動層における通気流速 $U \equiv U_{mf}$ の場合に対応する。 $K \gg 1$ に対する伝熱係数の整理のしかたとして Bukareva は $a_0 f$ すなわち振動の速度に対応するパラメータを用いているが²⁾、われわれの得た実験結果では必ずしもこのような簡単なパラメータでは整理できず便宜的に K を用いることにした。しかし K で伝熱係数を整理した場合には一定の K に対しては振幅 a_0 が大なるほど伝熱係数が大となる傾向になることは確かであり、その意味では $a_0 f$ のような因子を用いて実験値を整理するのも一つの方法であろうと思われる。図4は通気による流動層——といっても振動流動層と比較するという目的から通気流速の小さい均一系に近い状態にとどめているが——の伝熱実験の結果を示している。図3の振動流動層と比べて伝熱係数がかなり大きな値となることがわかる。

2.3 粒子の移動速度

図3と図4で伝熱係数が大きく異なるのはおもに振動流動層と通気による流動層とで粒子の運動の激しさが異なることに起因していると思われる。図5にわれわれの用いた流動層内における粒子の代表的なフローパターンを示し、また図6に粒子のマクロな移動速度を調べた実

図5 振動流動層と通気による流動層の代表的なフローパターン

図6 一定時間流動化後の層高さ方向のトレーサ濃度分布

験結果の一例を示す。図6から明らかなように振動流動層における粒子の移動速度は通気の場合に比べてきわめて遅い。このような粒子の運動の激しさがちがいが前記の図3、4の伝熱係数の差異をもたらす主要因となっているものと思われる。そこでこの粒子の移動速度と伝熱係数との関係についてつぎのような考察を試みた。

3. 粒子の平均移動速度に関連させた伝熱係数の検討

振動流動層内における粒子の移動、混合の速度は振動の与え方、容器の形状、層高、粒子の種類などによって大きく影響されるので、伝熱係数を直接振幅、振動数などで単純に評価することには問題があると思われる。このような観点から本報告ではつぎに述べるように粒子移動速度を用いた間接的な伝熱係数の推算法を検討した。

流動層内にある伝熱面における伝熱機構に対しては、Ziegler⁶⁾、Botterill⁷⁾、Baskakov⁸⁾、Mickley⁹⁾などの伝熱モデルが提唱されているが、本報告ではそのうち Mickley のモデルを用いることにした。このモデルを用いた理由は、流動層内に入れられたかくはん羽根の回転速度を変えることによって伝熱面における粒子の滞留時間を任意に変化させその滞留時間と伝熱係数との関係をプロットした Botterill の実験結果⁷⁾がこのモデルでもっともよく説明づけることができたからである。さて Mic-

図7 トレーサの移動距離とその量

kley の式は

$$h = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda_e C_b \rho_b / \tau} \equiv \sqrt{\lambda_e C_b \rho_b M} \quad \dots\dots (1)$$

であり \$M\$ は実験的に求める混合係数としている。われわれは式中の \$\tau\$ の値を粒子移動速度の実験からつぎのようにして推測した。まず図6のようにして得られた実験結果を図7のようにモデル化する。すなわち最初 \$t=0\$ において層内の位置0にあった質量 \$M_T\$ のトレーサが \$t\$ 秒間流動化させた後に図7のような分布になったとするとそれぞれ \$m_1\$ なるトレーサは \$l_1\$, \$m_2\$ は \$l_2\$, …… \$m_i\$ は \$l_i\$ 移動したことになるので各層のトレーサの移動速度は巨視的にみて

$$v_i = l_i / t \quad (i=0, 1, 2, \dots\dots n) \quad \dots\dots (2)$$

となる。この \$v_i\$ なる速度で移動するときの伝熱面における滞留時間は、伝熱面の代表長さとして簡単のために \$\pi D_s / 2\$ にとると

$$\tau_i = \pi D_s / 2 v_i \quad (i=0, 1, 2, \dots\dots n) \quad \dots\dots (3)$$

となる。これより求まる滞留時間 \$\tau_0, \tau_1, \tau_2, \dots\dots \tau_n\$ に相当する伝熱係数は(1)式からそれぞれ \$h_0, h_1, h_2, \dots\dots h_n\$ と求まり、これに滞留時間頻度分布 \$m_i / M_T\$ を考慮すると層全体の平均伝熱係数 \$\bar{h}\$ は次のようになる。

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=0}^n m_i h_i / \sum_{i=0}^n m_i}{\pi \sqrt{\frac{2 \lambda_e C_b \rho_b}{D_s} \cdot \frac{\sum_{i=0}^n m_i \sqrt{v_i}}{\sum_{i=0}^n m_i}}} \quad \dots\dots (4)$$

図8 \$h\$ (伝熱実験), \$\bar{h}\$ ((4)式) の比較——通気流動層——

図9 \$h, \bar{h}\$ の比較——振動流動層——

図10 \$h, \bar{h}\$ の比較——振動流動層——

この式中 \$m_i, v_i\$ は図7に示す粒子移動速度の実験から求まり、また \$\lambda_e\$ を矢木、国井の式¹⁰⁾から求めると(4)式から伝熱係数 \$\bar{h}\$ が推算される。図8~10はこのようにして推算した伝熱係数 \$\bar{h}\$ と2.2節で述べた伝熱実験から求めた伝熱係数 \$h\$ との比較を示したもので、(4)式による推算がほぼ妥当であることがわかる。しかし通気による流動層でパブリングが激しいときには両者は一致しなくなる傾向が認められた。

む す び

振動によって流動化された粉体とその層内の球状伝熱面との伝熱について検討を行ないつぎの結果を得た。

(i) 一般に $K > 1$ で伝熱係数は大きくなりその値は図 3 に示す程度となったがしかし図 4 に示す通気による流動層には及ばない。

(ii) 一定の振動加速度ならば振幅が大きいほど、換言すれば振動数が小さいほど伝熱係数が大であった。

(iii) 振動流動層および通気流速の低い場合の一般の流動

層の伝熱係数を層内の粒子の巨視的な移動速度と関連づけて考察しほぼ妥当な結果を得た。すなわち磁性微粉末をコーディングしたトレーサによる粒子移動速度の実験結果と Mickley の伝熱モデルとから伝熱係数を推算することによりこの場合の伝熱係数の実験値をほぼ説明づけることができた。

〔付記〕 本研究にご協力いただいた、当時、大阪市立大学学生木村義弘および榎井利英の両氏に心から謝意を表します。

記 号

a_0 : 振幅	[m]
C_b : 粉体層の比熱	[kcal/kg°C]
D_s : 鋼球の直径	[mm, m]
f : 振動数	[1/sec]
h : 伝熱係数	[kcal/m²hr°C]
$\bar{h}$: (4)式で求めた伝熱係数	["]
$K: a_0(2\pi f)^2/g$	[—]
l, m, M_T : 図 7 参照	
M : 混合係数	[1/hr]
t : 時間	[sec, hr]

$\bar{U}$: 空塔基準の通気流速	[m/sec]
$\bar{U}_{mf}$: 流動開始速度	["]
v : 粒子の移動速度	[m/hr]
θ_b : 粒子層の温度	[°C]
θ_s : 鋼球の温度	[°C]
λ_e : 粒子層の有効熱伝導度	[kcal/m hr°C]
ρ_b : 粒子層の密度	[kg/m³]
τ : 滞留時間	[sec]
ϕ_A : 整流板の開孔比	[—]
添字 0, 1, 2, …… i , …… n : 図 7 に示す層の区分を示す。	

引 用 文 献

- 1) Лайковская, Е. Ю., Сыромятников, Н. И.: Высших Учебн Завещений Энерг, 9, [10], 105 (1966)
- 2) Bukareva, M. F., Chlenov, V. A., Mikhailov, N. V.: *Int. Chem. Eng.*, 9, 119 (1969)
- 3) Bukareva, M. F., Chlenov, V. A., Mikhailov, N. V.: *Int. Chm. Eng.*, 10, 384 (1970)
- 4) 神保, 山崎: ケミカルエンジニアリング, 16, 30 (1971)
- 5) 吉田, 向阪, 油谷: 化学工学, 29, 875 (1965)
- 6) Ziegler, E. N., Koppel, L. B., Brazletor, W. T.: *I & EC Fundamentals*, 3, 324 (1964)
- 7) Botterill, J. S. M., Williams, J. R.: *Trans. Instn. Chem Engrs.*, 41, 217 (1963)
- 8) Baskakov, A. P.: *Int. Chem. Eng.*, 4, 321 (1964)
- 9) Mickley, H. S., Fairbanks, D. F.: *A. I. Ch. E. Journal*, 1, 374 (1955)
- 10) Kunii, D., Yagi, S.: *International Developments in Heat Transfer Part VI*, 742 (1961)