光学プローブを用いた流動層の 膨張層内粒子挙動に関する研究*

加藤 泰生^{*1}, 宮本 政英^{*1}
千村 俊和^{*2}, 出井 安正^{*3}

The Study on Particle Behavior in the Expansion of Fluidized Bed Using a Simple Optical Probe

Yasuo KATOH, Masahide MIYAMOTO,
Toshikazu CHIMURA and Yasumasa IDEI

This report proposes the use of an optical probe to observe the particle behavior related to the rate of heat transfer in the freeboard region, and discusses the relationship between the heat transfer rate and the particle behavior in the expanded bed. This probe has two rods; one is a light-emitting diode (LED) used as a light source, and the other is a photocell. Measurements were carried out for a variety of optical probe locations and superficial gas velocities. The optical method for observing the particle behavior seems remarkably useful. It seems that the particle activity is dependent not only on the superficial gas velocity but also on the tube arrangement.

Key Words: Multiphase Flow, Fluidized Bed, Expansion Bed Height, Particle Behavior, Optical Probe, Void Fraction

1. 緒 言

流動層ボイラにおいては、伝熱管まわりの流動粒子の濃度分布が管群の熱伝達に大いに寄与していることはよく知られている。一方最近、この伝熱量の確保とともに、turndown時の熱伝達の制御と圧損の軽減のための静止層高の低層化、あるいは燃焼媒体の大粒子化、多様化のための管の配置の適切化などにより伝熱管が始めから静止粒子層高より露出するフリーボード域に配することが試みられている。したがって、この種の流動層ボイラでは、静止粒子層高、管配置、伝熱管への膨張層の到達の程度、層内粒子挙動、層内粒子濃度などが、熱伝達係数に重要な影響を及ぼすと考えられる。

膨張層に関する研究は数多く、なかでもXavierらのfree bubbling層あるいは伝熱管埋設層における膨張層の高さを予測する式⁽¹⁾⁽²⁾、あるいは膨張層内の粒子ボイド率を光学的に測定したYangらの例⁽³⁾、層内粒子気泡サイズを光学的に測定したDutta-Wen⁽⁴⁾、

Sung-Burgess⁽⁵⁾の例などがある。しかしながら、これら光学測定によりフリーボード域を含めて膨張層内粒子挙動と熱伝達との関連を系統立てて研究した例は見あたらない。

本論文は、フリーボード域を含めて膨張層表面近傍における熱伝達と膨張層との関係を調べるために粒子挙動を光学的に測定する方法を用いて測定し、これら層内粒子挙動と既報⁽⁶⁾と同様の実測をした伝熱管まわりの管周平均熱伝達との関連を議論したものである。

2. 記 号

- D : 伝熱管外径
- d_p : 平均粒子径
- H_m : 管周平均熱伝達率
- L_c : 静止層高
- L_f : 膨張層高
- L_{fmax} : 最大膨張層高
- L_{fm} : 平均膨張層高(写真判定による粒子濃厚層高さ)
- P_h : 伝熱管水平ピッチ
- P_v : 伝熱管垂直ピッチ
- U_a : 空塔速度と最小流動化速度との差

* 平成3年3月17日 第3回ASME-JSME合同熱工学会議において講演、原稿受付 平成3年3月29日。

^{*1} 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台2557)。

^{*2} 正員、トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市トヨタ町1)。

^{*3} 正員、宇部興産(株) (〒755 宇部市沖ノ山1980)。

$$= U_0 - U_{mf}$$

U_{mf} : 最小流動化速度

U_0 : 空塔速度

V_f : プローブの出力電圧の rms 値

$$= \sqrt{(V_p - V_{pm})^2}$$

V_p : プローブの出力電圧

V_{ph} : プローブの最大出力電圧

V_{pl} : プローブの最小出力電圧

V_{pm} : プローブの平均出力電圧

V_p : プローブ出力比 $= (V_{pm} - V_{pl}) / (V_{ph} - V_{pl})$

X : ディストリビュータからの高さ

X_l : ディストリビュータから 1 列めの伝熱管までの高さ

X_p : プローブ先端の高さ

Y : 無次元高さ $= (X - L_c) / L_c$

Y_{max} : 最大膨張層高の無次元量

$$= (L_{fmax} - L_c) / L_c$$

Y_m : 平均膨張層高の無次元量 $= (L_{fm} - L_c) / L_c$

Y_p : プローブ高さの無次元量 $= (X_p - L_c) / L_c$

3. 実験および測定

図 1 に実験装置の概要, ならびに座標系を示す。ディストリビュータから鉛直方向の距離を X , 静止層高を L_c , プローブ光軸までの高さを X_p とする。テストセクションの詳細ならびにその加熱用伝熱管の大きさや配置, 伝熱管表面温度測定用 C-C 熱電対の埋込み位置などは, 既報と同じようにしてある。

図 2 に膨張層内粒子挙動を光学的に観察する装置の概略を示す。装置は, 光ファイバを用いた透過光形粒子検出用プローブ部分とその駆動装置部分からなる。プローブの構成は, 光ファイバユニットの先端に, 光軸を直角に曲げるサイドビュウアタッチメントを取付け送受光部を 8 mm の間隔でプローブに固定する。この取付間隔は流動粒子のけい砂粒子径 $d_p = 0.86 \text{ mm}$ の約 10 倍とした。光源の発光ダイオード (LED) からの光はファイバケーブルで導かれ径 2 mm の送受光部を経て再びファイバケーブルでアンプユニットまで行く。アンプユニットで光軸間の透過率に応じた電圧を発生し, これをアナログ出力ケーブルを通して直接コンピュータへ入力する。プローブは 2 列めの加熱管相互のすきまの中心線上 (図 1 参照) に設置され, 静止層高 (伝熱管水平ピッチ $P_h = 78 \text{ mm}$ のとき $L_c = 100, 125, 150 \text{ mm}$, $P_h = 60, 96 \text{ mm}$ では $L_c = 125 \text{ mm}$), プローブの光軸の高さ X_p ならびに空塔速度 U_0 を順次変えて測定を行った。なお, 1 測定点あたりサンプリン

グ周期 10 ms で約 2 000 個をとりその平均値をとっている。また本プローブの応答限界は公称 0.1 ms である。また本プローブの減衰率は間隔 30 mm までは 10% 以内に抑えられる。

4. 膨張層と熱伝達率

4.1 出力信号 V_p について 光軸間に粒子によるさえぎりが無いときのプローブ出力を V_{ph} , 光軸間が完全に遮断されたときの出力を V_{pl} とすると, 実験で得られた出力波形は, 全体的に V_{ph} および V_{pl} の値のどちらかをとる場合が多く, 平均出力 V_{pm} は光軸間の粒子濃度に関係するが濃度そのものではなく, 光軸間を粒子または粒子塊が通過した際のさえぎる頻度に対応する。したがって平均出力 V_{pm} を用いて光軸間に粒子または粒子塊が存在する頻度を比率 V_p で表せば次式のようになる。

$$V_p = (V_{pm} - V_{pl}) / (V_{ph} - V_{pl}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで, V_p はいわば光プローブ出力の時間平均値の

図 1 実験装置, 座標系の概要

図 2 膨張層内粒子挙動を光学的に観察する装置の概略

図3 光学プローブの出力生波形と流動状態写真の一例

無次元量である。

4・2 信号と膨張層内粒子挙動について 図3に、 $P_h=78$ mm, $L_c=125$ mm, $X_p=198$ mm, $U_d=0.4 \sim 1.6$ m/sのときのプローブの出力生波形と流動状態写真を示す。写真から観察される状態の変化とも対応させると、以下のように考察される。 $U_d=0.4$ m/sのとき、膨張層はまだプローブ先端には達せず、時折吹き上げられる粒子に反応しているのみで、出力 V_p の平均はほぼ V_{ph} に近く、出力 V_p の変動量もまだ小さい(フリーボード領域)。 $U_d=0.8$ m/sでは、最大膨張層がプローブ先端に近いことから、粒子のさえぎり頻度が増してきていることがわかる。したがってプローブは頻繁に反応し、変動量も大きくなる(スプラッシュ領域)。さらに1.2 m/sに流速を増すと、より層が膨張し、層表面で常に気泡の破裂、粒子の飛散の著しい最大膨張層表面がプローブ先端に達し、これに対応して変動量も最大となる(これもまたスプラッシュ領域)。 $U_d=1.6$ m/s前後ではプローブ先端が完全に(平均)膨張層内に埋没し、もはやプローブが反応するのは気泡が通過したときのみとなるので、 $V_p=0$ となることが多くなり、同時に変動量もまた小さくなる(濃厚層領域)。その後さらに層の膨張が進むことにより、伝熱管周りの粒子濃度が減少し、光軸間の光束の遮断、通過が再び頻繁となり、変動量は再び大きくなり、 V_p も増加する(希薄層領域)。

各実験条件における、光プローブ出力比 V_p および V_p の rms 値 V_r の流速に対する変化を図4に示す。どの条件においても光プローブ出力比 V_p は、流速の上昇とともに徐々に減少し、プローブ先端と静止層高との差 X_p-L_c が充分小さい場合は、ある流速で極小値

図4 光プローブ出力の時間平均値 V_p および V_p の rms 値 V_r の流速に対する変化

図 5 平均熱伝達率 H_m , さえざり頻度 V_p , V_p の rms 値 V_p' と速度差 $U_d (=U_o - U_m)$ との関係

を示した後再び徐々に上昇する。一方 V_p' は、流速とともに徐々に増大し、いったん極大値を示した後、 V_p が極小値を示す流速で極小となり、その後再び上昇する。

4.3 膨張層と熱伝達との関係 空塔速度に対して写真から求めた(1)最大膨張層高および平均膨張層高のそれぞれの無次元量 Y_{max} (実線), Y_m (破線) の分布域, および(2)各プローブ位置 X_p で得られた V_p および V_p' が極値を示すときの無次元高さ $Y_p [(X_p - L_c)/L_c]$, ならびに(3)平均熱伝達率 H_m が最大値をとるときの伝熱管の無次元高さ Y との関係をそれぞれ図 5 に示す。この図 5 より、各無次元高さ Y において V_p が極値を示す流速域と平均熱伝達率 H_m が最大値を示す流速域はほとんど一致し、ともに平均膨張層の分布域に対応する。このことは最大熱伝達率を与えるためには管が完全に砂に埋まって砂に洗われる状態が必要であると言える。また V_p' が極大値を示す流速域は、最大膨張層高に相当する Y_{max} の分布域に対応していることもわかり、このことから膨張層表面下での気泡による膨らみ、破裂、上下動などによる粒子の活動性(Activity)の程度がかなりよくわかる。この傾向はピッチの異なる場合もほぼ同様ではあるが、膨張の程度はピッチが狭いほど顕著であるように見える。このように膨張層内の粒子挙動を調べることで膨張層高さを知ることができかつ最大熱伝達率を取る流速を特定できる。ところで参考のために図 5 には二相

モデル理論を用いた Xavier らの Free Bubbling 層あるいは伝熱管埋設層における最大膨張層の高さを予測する式⁽¹⁾より計算した値を示しているが、彼らの式から得た値は総じて高めである。これは、彼ら自身の実験値との比較でも実験値が 10% 程度の不確かさがあるにもかかわらず理論の値がいくぶん高くでていることから流動層のスケールアップの際に二相モデルでは不十分であろうと思われる。

5. 結 言

浅層流動層コールドモデルのフリーボード域に位置する水平円管群の熱伝達と膨張層との関係を調べるためにフリーボード領域を含む膨張層内粒子挙動を光学的に測定する方法を使用し、伝熱管周りの熱伝達と膨張層との密接な関係を示し、その結果膨張層高さ、最大熱伝達率を取る流速を決定できることを示した。

文 献

- (1) Xavier, A. M., ほか 2 名, *Trans. IChE*, **56**(1978), 274.
- (2) Xavier, A. M. and Davidson, J. F., *Proc. AIChE Symp.*, **77-208**(1981), 368.
- (3) Yang, J. S., ほか 2 名, *Powder Tech.*, **49**(1987), 177.
- (4) Dutta, S. and Wen, C. Y., *Can. J. Chem. Eng.*, **57**(1979), 115.
- (5) Sung, J. S. and Burgess, J. M., *Powder Tech.*, **49**(1987), 165.
- (6) 宮本・ほか 3 名, 第 25 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1988-6), 331.