1010 BWR 模擬 2×3 ロッド流路内サブチャンネルの平衡気液二相流における ボイド率と摩擦圧力損失

Void Fraction and Frictional Pressure Loss in Two-Phase Flows in a Vertical 2×3 Rod Channel Simulating BWR Fuel Rod Bundle

正 川原 顕磨呂 (熊本大) 〇学 森 直樹 (熊本大院) 学 中尾 淳一 (熊本大)
正 加野 敬子 (熊本大) 正 佐田富 道雄 (熊本大)

Akimaro KAWAHARA, Dept. of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto
Naoki MORI, Graduate School of Science and Engineering, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto
Junichi NAKAO, Dept. of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto
Keiko KANO, Dept. of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto
Michio SADATOMI, Dept. of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto

1. 緒 言

現在、沸騰水型原子炉(BWR)内燃料集合体(ロッドバンドル)の冷却材(水)の流動予測法として一般にサブチャンネル解析法⁽¹⁾が用いられている。しかし、サブチャンネル解析法はその予測精度がまだ不十分であるため、実機に近い形状を持つ流路に関する正確なデータによる構成式の検証が必要である。

そこで、本研究では上記の検証を目的として、2×3 正方配列ロッド垂直流路を用いて平衡気液二相流の実験を行い、過去にデータが全く得られなかった各サブチャンネルのボイド率(気体体積率)と摩擦圧力損失の実験値を取得し、予測式の検討を行った。

2. 実 験

2.1 実験装置 流路の断面形状及び主要寸法と実験装置の概略を Fig.1 に示す。この流路は 40 mm×44 mm のアクリル製矩形ダクトの中央に直径 16 mm の真鍮製ロッドを 2 本、側壁に同直径のアクリル製半円形ロッドを 4 本配置した 2×3 正方配列の流路で、BWR におけるロッドバンドルを模擬したものであった。流路断面は 2 種類で 6 つの仮想的なサブチャンネルに分割された。また流路は助走区間、遷移区間、測定区間、排出区間の 4 区間から構成されている。作動流体には常温、大気圧近傍の空気と水を用いた。

2.2 実験方法 ボイド率及び摩擦圧力損失は水力学的平衡流のもとで測定した。ここで水力学的平衡流とはサブチャンネル間に圧力差が無く、正味の質量移動の無い流れのことである。実験を行う際に、まず、総括流路(流路全体)に対する空気と水の体積流量を決定する。次に、2×3 ロッド流路において水力学的平衡流を作るために、平衡流の流量配分比(総括流路の流量に対する各サブチャンネルの流量の比)に関する既報の実験値⁽²⁾を用いて、各サブチャンネルに流す流量を決定した。その後、空気および水をそれぞれロタメータ、タービン流量計で流量を計測し、装置最下部の気水混合部から導入した。

ボイド率の測定には急閉弁法を用いた。急閉弁法では、まず、流路の上流と下流に流れを遮る一対の弁を設け、両方の弁を同時に一瞬で閉じることにより弁間の流路内に流体を閉じ込めた。すると、重力の作用により空気と水が分離されるので、空気と水の界面の高さを測定することでボイド率を測定できた。実験はボイド率の平均値が±1%以内の誤差で収まった時を実験終了とし、1 条件あたりの急閉弁を閉める回数は 15 回から 30 回であった。

摩擦圧力損失の測定するために、流路の上流とそこから dZ 離れた下流の位置に設置した圧力取出口からそれぞれ圧力を取り、その区間での圧力差 dP を差圧変換器により測定した。そしてそれを dZ で割り全圧力損失(dP/dZ)とした。ここでこの全圧力損失の成分のうち加速度成分は無視できるので、摩擦成分(dP_f/dZ)と静水圧成分(dP_g/dZ)のみとなる。ゆえに、摩擦圧力損失は次式で与えられる。

$$\left(\frac{dP_f}{dZ} \right) = \left(\frac{dP}{dZ} \right) - \left(\frac{dP_g}{dZ} \right) \quad (1)$$

ここで、 α_G をボイド率とすると (dP_g/dZ) は次式で得られる。

$$\left(\frac{dP_g}{dZ} \right) = \{ \rho_L (1 - \alpha_G) + \rho_G \alpha_G \} g \quad (2)$$

Fig.1 Test rig and cross section of flow channel

3. 実験結果と考察

3.1 ボイド率の実験結果 Fig.2 に急閉弁法により得られた実験結果の例(水の見かけ速度 $j_L = 1.0$ m/s)を示す. 横軸に総括流路に対する空気の見かけ速度 j_G , 縦軸に各サブチャンネルのボイド率 α_{Gi} (i : Ch.1 or Ch.2)をとった. 図より, $j_G = 0.4 \sim 10$ m/s の条件で Ch.1 と Ch.2 のボイド率に差があるのがわかる. また, $j_G = 0.2$ m/s 以下では Ch.1 よりも Ch.2 のボイド率の方が高い結果となっている.

3.2 ボイド率の予測式との比較 本研究では 8 つのボイド率予測式についての比較を行った. その結果から, 最も一致の良かった Dix⁽³⁾の式と実験値との比較を Fig.3 示す. 横軸に実験値 $\alpha_{Gi,exp}$ を, 縦軸に計算値 $\alpha_{Gi,cal}$ をとっている. 実験値は水の見かけ速度 j_L ごとに形を変え, 白抜きと黒塗りはそれぞれ Ch.1 と Ch.2 を表す. 図より, Ch.1 および Ch.2 の両方とも誤差が ± 0.1 以下の範囲に収まっていることがわかる.

3.3 摩擦圧力損失の実験結果

Fig.4 に摩擦圧力損失の実験結果を示す. 縦軸に各サブチャンネルの摩擦圧力損失 $(dP_f/dZ)_i$ を, 横軸に総括流路に対する空気の見かけ速度 j_G をとっている. ここで静水圧成分を計算するときに使用するボイド率は, ボイド率の実験値と最も一致がよかった Dix の式によって算出された. 図より, 水の見かけ速度 j_L が同じ条件であれば, 空気の見かけ速度 j_G が大きくなるほど摩擦圧力損失は大きくなっているのがわかる. また, Ch.2 よりも Ch.1 の方が大きいことがわかる. これは, Fig.2 からわかるように Ch.2 よりも Ch.1 の方がボイド率が高く, 静水圧成分が小さくなるためである.

3.4 摩擦圧力損失の予測式との比較

本研究では 9 つの摩擦圧力損失の予測式について比較を行った. その結果から, 最も一致の良かった Storek-Brauer⁽⁴⁾の式と実験値との比較を Fig.5 に示す. 横軸に実験値 $(dP_f/dZ)_{i,exp}$ を, 縦軸に計算値 $(dP_f/dZ)_{i,cal}$ をとっている. 図より, 予測精度はほとんどの条件で $\pm 30\%$ 以下の範囲に収まっているのがわかる.

4. 結 言

本研究では 2×3 ロッド流路を用いて水力学的平衡流における各サブチャンネルのボイド率と摩擦圧力損失を測定した. そして多くの予測式の検証の結果, ボイド率には Dix の式が, 摩擦圧力損失には Storek-Brauer の式が 2×3 流路の実験値と最もよく一致することがわかった.

参考文献

- (1) Lahey, Jr., R.T. and Moody, F.J., The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, 2nd ed., ANS, (1993), pp.168-184.
- (2) Sadatomi, M. et al., 2004b, Flow Characteristics in Hydraulically Equilibrium Two-Phase Flows in a Vertical 2x3 Rod Bundle Channel, Int. J. Multiphase Flow, **30**, pp.1093-1119.
- (3) Dix, G.E., Vapor Void Fraction for Forced Convection with Subcooled Boiling at Low Flow Rates, Rep. NEDO-10491, General Electric Co. (1971).
- (4) Storek, H. and Brauer, H., Reibungsdruckverlust der Adiabaten Gas/Flüssigkeit-strömung in Horizontalen und Vertikalen Röhren, VDI Forschungsheft, **599**, (1980), pp.1-36

Fig.2 Void fraction data in 2x3 rod bundle channel

Fig.3 Comparison of Void fraction between experiment and calculation by Dix's correlation

Fig.4 Frictional pressure drop data in 2x3 rod bundle channel

Fig.5 Comparison of frictional pressure drop between experiment and calculation by Storek-Brauer's correlation