229 仕切りのある開口部における密度差駆動置換流

鶴 大悟*, 佐藤 泰, 班目春樹, 岡本孝司, 文沢元雄, 菱田 誠

Buoyancy-Driven Exchange Flow through an Opening with a Partition

Daigo TSURU*, Yasushi SATO*, Haruki MADARAME*, Koji OKAMOTO*,
Motoo FUMIZAWA** and Makoto HISHIDA**

In this study, buoyancy-driven exchange flow through a rectangular small opening with a vertical partition was investigated. In the helium-air exchange flow experiment, the exchange flow rate and the flow pattern around opening exit were simultaneously measured. Two flow-pattern were formed even in the same condition. In the water-brine exchange flow experiment, the exchange flow rate and the flow pattern in opening were simultaneously measured. Penetration and entrainment were visualized in the opening, which affect the exchange flow rate.

1 序論

高温ガス炉のスタンドパイプ破断事故が起こると、事故後直ちに炉容器内のヘリウムガスが噴出する。炉内圧と格納容器内圧が等しくなると、重力により空気が圧力容器内に浸入し始める。空気浸入により炉容器内黒鉛構造物が酸化されてしまうため、炉容器内に浸入する空気の流入量を評価することが重要になってくる [1]。

この現象は、密度の異なる異種流体の密度差駆動置換現象である。炉容器内に浸入する空気の流入量評価の基礎研究として、姜らは仕切りのある円形開口部での置換流に関する研究を行なった [2]。本研究では、姜らの研究を踏まえより詳細な検討をするため、仕切りのある矩形開口部における置換流に対する検討を行なった。矩形開口部を用いることにより、開口部出口付近および、開口部内の流況の可視化による特性把握が容易となる。作動流体として、ヘリウム-空気、水-塩水を用いた。

2 実験装置および方法

本実験で用いた開口部を Fig.1 に、ヘリウム-空気置換実験装置を Fig.2 に示す。透明アクリル製ヘリウム容器には上部中心に開口部があり、ここを通る置換流の流量を容器全体の質量変化から求める。同時に、開口部出口近傍の密度分布を干渉計により可視化する。

気体による実験では開口部内の流況の可視化が困難なため、同じ容器、開口部に対して、水-塩水による置換実験を行なった。その実験装置を Fig.3 に示す。塩水容器の質量変化から置換流量を算出できる。塩水あるいは水に染料を入れて、開口部内流況を可視化した。

*University of Tokyo

**Japan Atomic Energy Research Institute

3 実験結果

ヘリウム-空気置換実験について、同一条件において4回実験を行なった。容器内気体の密度変化の測定結果を Fig.4 に示す。容器内気体密度の時間微分から、置換流量 Q を求め、さらに以下の式により、フルード数 Fr を求めた。

$$Fr = Q \sqrt{\frac{\rho_m}{D_f^5 g (\rho_H - \rho_L)}} \quad (1)$$

密度変化に対するフルード数の変化を Fig.5 に示す。密度がある値の時、フルード数が2通りの値をとることから、同一の条件にも関わらず、2種類の置換状態が存在することがわかる。それぞれの状態に対して、開口部近傍を可視化した結果を Fig.6、Fig.7 に示す。開口部内は、仕切りによってヘリウムが流出する流路と空気が流出する流路に分けられる。しかし出口においては、流出ヘリウム流と、流入空気流の相互作用の仕方によって、2つの流れのパターンが現れることがわかる。即ち、流出ヘリウム流が流入空気流から離れている場合 (状態 (1)、Fig.6) と、流出ヘリウム流の一部が流入空気流に捕捉されてしまう場合 (状態 (2)、Fig.7) と2つの場合が存在する。同じ開口部を用いて水-塩水置換実験を行なったところ、状態 (2) しか観測されなかった。この時の開口部内の流況を Fig.8 に示し、これから把握できる流況を模式的に Fig.9 に示す。開口部内の流れは、水の上昇流 (黒) と、塩水の下降流 (透明) が仕切りによって分かれている。塩水の下降流の中には染料が混じっている。これは、開口部出口、即ち水の上昇流と塩水の下降流がじかに接するところで、水が塩水の流れに巻き込まれたことを表している。また、塩水の下降流下部には、くさび状の水の潜り込みが見られる。潜り込みとは、密度の重い流体の下降流が密度の軽い流体に流れ込む時、浮力によって、軽流体が重流体の下降流の中を逆流する現象である。以上の結果、開口部内は、二種の流体が別々の流路を流れるだけでなく、巻き込み、潜り込みのような複雑な現象が混在することが確認できた。

なお、開口部の形状を変えると形状によっては、乱雑な流れになったり、いくつかのモードを不規則に遷移しながら流れるものもあった。

4 考察

ヘリウム-空気実験における置換流量について、姜らのモデル [2] と比較を行なう。仕切りによって分けられた、開口部をそれぞれをヘリウム及び空気が分離して流れたとすると、修正ベルヌーイ式は以下になる。

$$(\rho_H - \rho_L)gH = \Delta P_H + \Delta P_L \quad (2)$$

ここで、 ΔP_H 、 ΔP_L は、管内摩擦損失、急縮小拡大にともなう加速損失、出入口部での干渉にともなう損失であり、管内流速 V の関数で与えられる。よって上式を解くことにより、置換流速 V を求め、フルード数が計算できる。Fig.10 に、姜モデルによるフルード数、及び実験結果を示す。これより、計算のほうが2.0倍ほど大きいことが分かる。これは、計算では流体が分離して流れているという仮定を用いているのに対し、実験では前項に示すように潜り込み、巻き込みが存在するためである。潜り込み、巻き込みの影響を数量的に評価することは、今後の課題である。

水-塩水置換実験では、塩水への水の巻き込みが存在するため、染料の移動速度から実流速を算出することができる。これに対し、姜モデルに従い全流路を水、塩水が分離したとして流れたとすると、置換流量から見かけの流速が算出できる。ビデオの画像を解析することにより得られた実流速は 0.17m/s であったのに対し、見かけの流速は 0.047m/s であり、実流速が見かけの流速より 3.6 倍大きいことがわかった。これは、巻き込みにより流路を流れている流体が混合流体となっていること、及び、潜り込みにより実際の流路面積が狭められていることによる。

以上により、置換流量の評価においては、巻き込み、潜り込みの評価が重要であることが分かった。

5 結論

垂直な仕切りのある矩形開口部において、ヘリウム-空気置換流および水-塩水置換流について、置換流量の測定と置換流の可視化を同時に行なった。その結果、複数のフローパターンが存在し、それによって置換流量が異なることがわかった。さらに、開口部内での潜り込み、巻き込みが存在し、置換流量に大きな影響を与えていることがわかった。

参考文献

- [1] M.Fumizawa: Experimental study of helium-air exchange flow through a small opening, *Kerntechnik*, Vol 57, 1992, pp156-160.
- [2] 姜泰一 他: 仕切りのある開口部におけるヘリウム-空気置換流, 機械学会論文集 (B 編), 59 巻 566 号, 1993, pp3106-3112.

Fig.1 開口部

Fig.2 ヘリウム-空気置換実験装置

Fig.3 水-塩水置換実験装置

Fig.4 ヘリウムタンク内気体密度変化

Fig.5 ヘリウムタンク内気体密度対フルード数

Fig.6 開口部付近の密度分布 (1)

Fig.7 開口部付近の密度分布 (2)

Fig.8 ノズル内流 (正面)

Fig.9 ノズル内流 (正面)

Fig.10 H/D 比対フルード数