研究論文

464. 2相流の蒸気ボイド率に関する研究, (II)

岐美 格*, 芹沢 昭示*, 三谷 信次*

(1967年 6月23日 受理)

Steam Volume Fraction in Two Phase Flow, (II)

By Itaru MICHİYOSHI, Akimi SERIZAWA and Shinji MITANI

The steam volume fraction α of a two phase mixture flowing upward under atmospheric pressure was measured in a vertical concentric annulus, with inner and outer diameters respectively 9.5 mm and 21 mm. Use was made of a capacitance type void meter described in a previous paper, and the following correlation was obtained:

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{(1-x)^3}{1+Kx}},$$

where $K = \varepsilon \frac{\rho_l}{\rho_g} V_0^{0.5} \exp(-2 \times 10^{-6} q)$

$\varepsilon = 1.3$ (bubble flow), $\varepsilon = 1$ (slug flow and annular flow)

x is the steam weight fraction, ρ_l/ρ_g the density ratio of liquid to steam, V_0 the superficial velocity (m/s), and q the heat flux (kcal/m²·hr).

The experimental data obtained under high pressure by several investigators for various channel forms correlated very well with use of the formula

$$K = \varepsilon \frac{\rho_l}{\rho_g} V_0^{0.5}, \text{ where } \varepsilon \text{ is the same as mentioned above.}$$

These correlations are very useful for predicting the steam volume fraction at various pressures below 2,000 psia.

I. 緒 言

すでにわれわれは前報⁽¹⁾において、大気圧のもとで鉛直円管内を流れる水蒸気・水 2 相流の蒸気ボイド率やスリップ比と蒸気重量率との関係を実験的に求め、2 相流の流動様式によるちがいを明らかにし、さらに気泡流については高圧の場合へ拡張することを試みた。しかし、実際の原子炉では、あるピッチで配列された多くの燃料棒の間を 2 相流が流れるから、そのような流れを解析するための基礎として、円環流路の 2 相流をとりあげることにした^{**}。すなわち、本報は鉛直な円管流路の中心軸に 1 本の円柱状模擬燃料棒を配置し、大気圧のもとでその熱流束をいろいろにかえて蒸気ボイド率などを測定した結果と、蒸気ボイド率の推算式について述べる。模擬燃料棒は外径 9.5 mm で、シ

ーズヒータを封入したもので、表面材質は SUS 28 であり、有効発熱部の全長は 75 cm、出力は 5.4 kW、最大熱流束は 2.08×10^5 kcal/(m²·hr) である。鉛直円管流路の内径は 21 mm でポリカーボネイト製である。実験は前報第 1 図の⑤の部分で供試部として行なったもので、その測定方法などは前報と同様である。なお、燃料棒群の場合の 2 相流については続報として報告する。

* 京都大学 工学部原子核工学教室 (Dept. Nucl. Eng., Kyoto Univ.)

** 従来の研究には円環流路をとりあげたものはほとんどない。しかし、円環流路の流れは燃料棒群の間の流れを解析する場合の基礎となる。現在実施中の燃料棒群に対する実験結果と、円環流路に対する本実験結果とを比較検討することは、燃料棒群に対する 2 相流の流れを解析するために極めて重要であると考えられる。

I. 実験結果とその考察

本実験は、水単相流が供試円環流路を流れるときの流路断面平均速度(以下代表速度と呼ぶ) V_0 を 0.15～1 m/s, 模擬燃料棒の熱流束 q を $0 \sim 2.08 \times 10^5$ kcal/($\text{m}^2 \cdot \text{hr}$), 蒸気重量率 x を $0 \sim \text{約} 0.08^*$ にかえて行なった。なお、本実験も前報と同様に、供試管入口に設けた絞り部を通して、大気圧以上に加圧され、かつその圧力に対する水の飽和温度近くまで(最大 116°C まで)予熱された水を供試管に導入し、沸騰させるようになっているので、たとえ $q = 0$ の場合にも最大約 0.03 の蒸気重量率が得られる。 q が存在する場合には、さらにその上へ蒸気重量率が加わる。

第1図に、蒸気ボイド率 α と蒸気重量率 x との関係を、代表速度 V_0 をパラメータにして示した。ただし、代表例として $q = 1.73 \times 10^5$ kcal/($\text{m}^2 \cdot \text{hr}$) の場合が図示してあるが、 q を変えても類似な関係曲線が得られる。この図は前報第6図に対応するもので、前報で指摘したとおり、全般的に見ると、 V_0 が大きいほど α が大きい。また、 V_0 が大きいと西野・山崎の関係式⁽¹⁾に近く、 V_0 が小さいと Martinelli-Nelson の関係式⁽²⁾に近いことも前報と同様である。なお、図中の実線については後述する。図には2相流の流動様式のおよその境界も示してある。気泡流からスラッグ流へ移るところでは、前報第7図に示したように、蒸気ボイド率 α の変化はスムーズではなくて、1度 α が上昇してから減少するので段がついたような曲線となる。スラッグ流から環状流への遷移は比較的小さい。

第1図 蒸気ボイド率に及ぼす流速の影響

つぎに、熱流束 q の影響について述べる。第2図は代表例として $V_0 = 0.45$ m/s の場合の α と x との関係を、 q をパラメータにして図示したもので、図には西野・山崎の関係式と Martinelli-Nelson の関係式が併記してある。 x の小さい気泡流領域では明らかでないが、気泡流領域以外では全般的に見ると、同じ重量率 x について、熱流束が大きいほど蒸気ボイド率が小さくなっている。この傾向は V_0 をかえても同様である

第2図 蒸気ボイド率に及ぼす熱流束の影響

が、 V_0 が小さいほど比較的顕著にあらわれる^{**}。このような熱流束の影響は、断熱系の2相流では見出し得ないものである。従来、2相流に関する実験は、断熱系、加熱系を問わず、多くの研究者によって行なわれて来たが⁽⁴⁾、熱流束の影響を考慮して実験結果を整理したものはいまだないようである。しかし第2図からもわかるように、熱流束がかなり大きいと熱流束の影響はほとんどあらわれていないし、またこのことは代表速度が大きいときに顕著であるので、実際の装置への応用を目的とした従来の実験では、しかも圧力の比較的高い状態での飽和沸騰域における実験では、熱流束の影響がほとんど認められなかったものと考えられる。なお、第2図の $q = 0$ の場合の円環流路における結果を、前報第6図の円管流路 ($q = 0$) に対する結果と比較すると、同一代表速度に対して多少蒸気ボイド率 α が大きい。前者の相当直径は $21 - 9.5 = 11.5$ mm, 後者のそれは 13.8 mm である。そこで、この結果は後述する Marchaterre と Hoglund⁽⁵⁾ の円管流路や長方形流路に対する整理式の示す傾向と一致するが、流路の形状の及ぼす影響が、寸法の及ぼす影響かは明らかでない。しかし、そのような影響があるとしても、前報ならびに本実験の範囲内では大きなものではない。

さて、2相流ではスリップ比 S が重要な因子である。 S は次式で与えられる。

$$S = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{x}{1 - x} \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (1)$$

ここに、 S は蒸気相の平均速度と液相の平均速度との比、すなわちスリップ比であり、 ρ_l, ρ_g はそれぞれ飽和水および乾き飽和蒸気の密度である。 ρ_l/ρ_g は圧力が大気圧ではおよそ 1,600 であるが、圧力が増大するとともに急激に減少する。Marchaterre と Hoglund⁽⁵⁾

* V_0 と q によって x の最大値は異なる。

** 熱流束の及ぼす影響があらわれる理由の理論は明らかでないが、この実験結果は、蒸気重量率が流動方向に変化する割合を考慮すべきことを示しているように思われる。

は多くの実験結果を整理して、 S と $\{x/(1-x)\}(\rho_l/\rho_g)$ との関係曲線を、フルード数 $(=V_0^2/gD)$ 、 D は流路の相当直径) をパラメータにして図示している。 V_0 が 1 ft./sec 以上では、 $\pm 20\%$ 程度の誤差の範囲内で実験結果が整理できるようなのであるが、圧力が低いところでは蒸気重量率 x のとり得る範囲がせまい。

われわれの実験から得られた S と x との関係を代表的に図示すると第 3, 4 図のようになる。第 3 図は第 1 図に、第 4 図は第 2 図に対応していて、それぞれ V_0 および q の影響を示している。全般的に見ると、同じ x について、 V_0 が小さいほど、また q が大きいほど S が大きくなっている。(1) 式から S を求めるので実験点の散らばりは大きくなる。図には Martinelli-Nelson と西野-山崎の関係曲線も併記してある。

第 3 図 スリップ比に及ぼす流速の影響

第 4 図 スリップ比に及ぼす熱流束の影響

Ⅲ. 蒸気ボイド率の推算式

すでに前報において、気泡流については、理論的な解析を行なって、高圧の場合にも適用できる蒸気ボイド率の推算式を導いた。本報では、上述した実験結果を利用して、スラッグ流や環状流にも適用可能な推算式を導くことを試みる。

供試管の入口において、質量流量 W 、速度 V_0 の液相

単相流は、蒸気ボイド率を測定している位置(前報参照)では 2 相流であるから、液相の質量流量は W_l に、その液相の速度は V_l に変化し、したがって、液相の運動エネルギー流は増加している。すなわち、

$$\Delta E = \frac{1}{2} (W_l V_l^2 - W V_0^2) \quad (2)$$

しかし、2 相流の性質から

$$W_l = W(1-x) \quad (3)$$

$$V_l = V_0 \frac{1-x}{1-\alpha} \quad (4)$$

である。これらを(2)式に代入すると

$$\Delta E = \frac{1}{2} W V_0^2 \left[\frac{(1-x)^3}{(1-\alpha)^2} - 1 \right] \quad (5)$$

となる。上式において、 x の増加よりも α の増加が著しいので、 ΔE はの正の値である。

この液相の運動エネルギー流の増加分に注目して、実験データを整理して見よう。 $\Delta E / (1/2 W V_0^2)$ 、すなわち $[(1-x)^3 / (1-\alpha)^2 - 1]$ を蒸気重量率 x で整理して見ると第 5 図のようになる。点の散らばりはあるけれども、代表速度 V_0 、熱流束 q を与えると、ほぼ直線的な関係が存在することがわかる。したがって、

$$\frac{(1-x)^3}{(1-\alpha)^2} - 1 = Kx \quad (6)$$

とすることができる。ただし、この K は V_0 や q とともに系の圧力によっても変わる。図には圧力 115 psia、 V_0 が 0.51~0.56 m/s の場合の Marchaterre⁽⁶⁾ の長方形流路に対するデータも 1 例として示してある。これと、1 気圧に対する本実験結果とを同じ V_0 で比

第 5 図 実験値の整理

較すると、 K に対する圧力の影響が大きいことがわかる。本実験結果によると、 K の値は V_0 が小さくなるほど、また q が大きくなるほど減少している。なお、図中の直線は K のおよその値を示すためにひいたもので、実験点に最もよくヒットする直線ではない。

実験値を満足する K は、本実験結果の場合 V_0 (m/s) のおよそ 0.5 乗に比例する。また K は $\exp(-2 \times 10^{-6} q)$ に比例する。ただし、 q は kcal/(m²・hr) の単位をとるものとする。かくして

$$K = AV_0^{0.5} \exp(-2 \times 10^{-6} q) \quad (7)$$

となる。本実験結果(圧力は 1 気圧)のうち、スラッグ流ならびに環状流に対する結果を用いると、それらのすべての実験値に対して、平均して

$$A = 1,600 \quad (8)$$

とすればよいことがわかった。

(6)式から

$$1 - \alpha = \frac{\sqrt{(1-x)^3}}{1 + Kx} \quad (9)$$

となるから、この K に (7)、(8) 式を代入すると、(1 - α) と x との関係が得られる。第 6, 7 図に示した実験線がこれを示している。このように V_0 と q のいろいろの条件に対して実験値をよく満足している。なお、第 1 図中の実験線もまた (9) 式の関係を示していて、スラッグ流および環状流の実験値とよく一致している。しかし、気泡流の実験結果については、前述したように、一般に蒸気ボイド率が大きくなるので、 K の値も大きくなる。前報の気泡流の実験結果をも参照すると、(8) 式の A の値のおよそ 1.3 倍にとればよいことがわかった。気泡流に対する、このような補正係数を ε とすると、

$$A = 1,600\varepsilon \quad (10)$$

ただし、 $\varepsilon = 1.3$ (気泡流)

$\varepsilon = 1$ (スラッグ流, 環状流)

である。

第 6 図 実験値の整理

第 7 図 実験値の整理

つぎに、これを高圧の場合に拡張しよう。(10) 式中の 1,600 という数値は、前述したように、圧力 1 気圧における ρ_i/ρ_0 の数値におよそ等しい。そこで

$$A = \varepsilon \frac{\rho_i}{\rho_0} \quad (11)$$

と仮定し、系の圧力の影響は ρ_i/ρ_0 を通してあらわれるものと考えよう。したがって、

$$K = \varepsilon \frac{\rho_i}{\rho_0} V_0^{0.5} \exp(-2 \times 10^{-6} q) \quad (12)$$

ただし、 ε は前述のとおりとし、この K を (9) 式に用いることによって、 α と x との関係が任意の圧力に対して推定できるものとしよう。しかし、 V_0 や q の影響を示す因子は、あくまでも圧力が 1 気圧のもとの実験から求められたものであるから、高圧の場合にも V_0 や q の影響が (12) 式で与えられるかどうかは、実験値との比較の上で結論されねばならない。特に q の影響については、前述したとおり (II. 参照)、従来の高圧における実験結果によれば、蒸気ボイド率 α に対する熱流束 q の影響は明らかではない。したがって、(12) 式において $\exp(-2 \times 10^{-6} q)$ の因子を考慮に入れないことにして実験結果と比較しよう。ただし、従来の高圧における実験は、流動様式が気泡流に属するものが大部分であるから*、 $\varepsilon = 1.3$ を採用することにする。また流路の形状の及ぼす影響が明らかでないから、円環流路に対する結果が他の形状の流路にも適用可能か否かを調べて見よう。

まず、前報に示した円管流路の気泡流に対するわれわれの実験結果(この場合には、実験条件として $q = 0$ であるから、 $\exp(-2 \times 10^{-6} q)$ は 1 である)との比較

* 圧力が高くなると、蒸気重量率のかなり大きいところまで気泡流である。流動様式が何に属するかは、全流量、蒸気重量率、流路の形状、寸法、方向、系の圧力による。従来から実験データがいろいろ発表されているが、それらの影響を全部包含した推定式はない。なお、Bergles と Suo⁽⁹⁾ の最近のデータ参照。

を第8図に示す。実験値をよく満足している。第9～12図はそれぞれ長方形流路に対する Marchaterre⁽⁶⁾ のデータ(圧力 115 psia), Cook⁽⁷⁾ のデータ(圧力 600 psia) Egen, Dingee, Chastain⁽⁸⁾ のデータ(圧力 2,000 psia)および Hoglund, Weatherhead, Epperson のデータ(圧力 150, 250, 400, 600 psig)との比較を示している。これらの図中の実線は何れも(12)式のKを

$$K = \varepsilon \frac{\rho_L}{\rho_g} V_0^{0.5}, \quad \varepsilon = 1.3 \text{ (ただし気泡流)} \quad (13)$$

として、(9)式より求めた α と x との関係を示すもの

第8図 前報の実験値との比較 (気泡流)

第9図 Marchaterreの実験値との比較 (気泡流)

第10図 Cookの実験値との比較 (気泡流)

第11図 Egenらの実験値との比較 (気泡流)

第12図 Hoglundらの実験値との比較 (気泡流)

で、加熱系に対する実験値との一致は良好である。このことから、高圧のもとでの実験値は、 q の影響のあらわれていない上式によってよく整理できるといえる。また、長方形流路に対する実験値ともよく一致していることは興味深い。

さて、(1)と(9)式とから、スリップ比 S は次式で与えられる。

$$S = \frac{\rho_L}{\rho_g} \frac{x}{\sqrt{1 + Kx} - (1 - x)} \quad (14)$$

圧力が2,000 psiaをこえると、(13)、(14)式によるスリップ比の推算値は急激に減少して1以下の値になるので、圧力が2,000 psiaをこえる場合に(13)式を使用することはよくない。それで、これをさけるためには(13)式の K を補正すべきであるが、本報では取り扱わないことにする。

以上述べたように、円環流路に対する実験から(9)、(12)式の実験式を得た。これは続報する予定の燃料棒群の間の2相流を解析する場合の基礎式となる。さらに、本実験式を前報の円管流路に対する実験結果や、高圧のもとでの長方形流路に対する実験結果と比較して、それらの流路にも適用可能なことを確かめた。

IV. 結 論

鉛直な同心円環流路内を流れる水・蒸気2相流の蒸気ボイド率を、1気圧のもとで、代表速度 V_0 (m/s)や

熱流束 q (kcal/m²·hr) を変えて測定し、次の実験式を得た。

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{(1-x)^3}{1+Kx}}$$

$$\text{ここに, } K = \varepsilon \frac{\rho_l}{\rho_v} V_0^{0.5} \exp(-2 \times 10^{-6} q)$$

$$\varepsilon = 1.3 (\text{気泡流})$$

$$\varepsilon = 1 (\text{スラッグ流, 環状流})$$

圧力 2,000 psia までの種々の流路に対する従来の実験値と比較して、上式の K を

$$K = \varepsilon \frac{\rho_l}{\rho_v} V_0^{0.5} \quad (\text{ただし, } \varepsilon \text{ は上記のとおり})$$

とすれば、実験値をよく整理できることがわかった。したがって、この実験式は高圧における蒸気ボイド率の推算式としても有用である。

— 参 考 文 献 —

- (1) 岐美 格, 白滝康次, 滝谷 紘一: 本誌, 8 [1], 16 (1966); *Int. Chem. Eng.*, 7[1], 159 (1967).
- (2) 西野晴生, 山崎弥三郎: 同上, 5[1], 39 (1963).
- (3) MARTINELLI, R.C., NELSON, D.B.: *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs.*, 70, 695 (1948).
- (4) TONG, L.S.: "*Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow*", (1965), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (5) MARCHATERRE, J.F., HOGLUND, B.M.: *Nucleonics*, 20[8], 142 (1962).
- (6) MARCHATERRE, J.F.: ANL-5522, (1956).
- (7) COOK, W.H.: ANL-5621, (1956).
- (8) EGEN, R.A., DINGEE, D.A., CHASTAIN, J.W.: BMI-1163, (1957).
- (9) HOGLUND, B.M., WEATHERHEAD, R.J., EPPERSON, T.R.: ANL-5760, (1961).
- (10) BERGLES, A.E., SUO, M.: "*Proc. 1966 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*", p. 79 (1966), Stanford Univ. Press.

☆ 本 誌 投 稿 の 手 引 ☆

- 一般投稿は研究論文・技術報告・資料・ショートノートを原則とし、必ず会員の資格を有する。
- 掲載範囲は、原子力研究に関連する凡ゆる部門を含め、とくに限定しない。内容はオリジナルなものに限る。
- 刷上り 6 頁 (ショートノートは 2 頁) 以内は無料 (有料頁は 1 頁当り実費約 5,000 円) とする。和文は「会誌」に、欧文は Journal に掲載される。
- 必ず所定の原稿用紙 (480 字詰約 4 枚で 1 頁) を使用し、投稿規程に従って執筆する。ただし、欧文は、適宜に厚手のタイプ用紙に 2 段送り、1 枚約 25 行にタイプする。(約 3 枚で 1 頁) 和・欧文とも所定の原稿表紙 (無料) を添付する。図面はそのまま製版できるよう必ず墨入れトレスする。(鮮明なゼロックス可)
- 投稿希望者は事務局へ連絡すれば、原稿用紙 (30 枚綴 1 冊 100 円, 千 45 円) および投稿規程を送付する。
- 和・欧文を問わず表題・抄録・所属機関名などを和・英両文で正確に書いて添付する。
- 別に締切り日は設けない。原稿受理次第「受

理通知」を本人に送る。原稿は当該分野担当の査読委員の査読に回わり、次回以後の編集委員会において採否を審議する。査読通過および掲載番号は決定次第通知される。

- 論文は査読通過後受理順に掲載される。(掲載まで欧文約 3~4 ヶ月, 和文約 7~8 ヶ月)
- 別刷は掲載論文 1 篇につき 30 部まで無料で送付する (30 部以上希望の時は、実費 1 部につき、50~100 部で 4 頁以内 50 円, 5~8 頁 60 円程度)。
- 査読・審議の結果、内容の修正、文章の短縮、または図面の書き直しを要求されたり、時には掲載を遠慮いただく場合があるので、予めご了承願いたい。
- 欧文の修文・添削についてはすべて著者負担とする。(和訳を要求される場合もある)
- 修正のため返却した原稿は 6 ヶ月以内に再提出しないと撤回とみなされる。
- 談話室欄 (1~2 頁) には、随時、随意に気軽な寄稿を歓迎する。
- その他、詳細は事務局へお問合せ下さい。