研 究

同心二重円管内における液体窒素の流動圧損失

敦 賀 英 男・遠 藤 一 夫

北海道大学工学部合成化学工学科 札幌市北13条西8丁目

(1973年9月11日受理)

Pressure Drop of Liquid Nitrogen Flow in Concentric Annuli.

by Hideo TSURUGA and Kazuo Endoh

Dept. of Chem. Process Eng., Hokkaido Univ.
Kita 13 Jō NiShi 8 Chōme, Sapporo-shi

(Received September 11, 1973)

Synopsis :

Experiments were made on pressure drop of liquid nitrogen flow in concentric annuli. The Reynolds number based on hydraulic diameter and mean velocity ranged from 200 to 18,000. As a result it was found that the relation between Reynolds number and friction factor showed good agreement with the data previously obtained for newtonian fluid at room temperature.

1. 緒 言

極低温流体の管内輸送に関し、筆者らは前報¹⁾において、液体窒素の水平円管内流動圧力損失を測定し、常温のニュートン流体に関する既往の知見によって、その挙動が十分推定しうることを実験的に明らかにした。本報は前報同様に実用的に重要であるが、液体窒素等極低温流体を対象としては既往の知見に欠けている。同心二重円管の水平管内流動圧力損失に関して実験的検討を行なったので報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の全体的な構成は前報¹⁾と同様であり、前報において水平円管が挿入される部分に、同心二重円管が組込まれている。テストセクションは、外側円管内に銅線、または両端を閉じた銅円管をスペーサーで同心状に保持し、その円環部分に液体窒素を流動させている。

Fig. 1 に液体窒素の補給装置の詳細を示した。この補給装置内の液体窒素は、図示の電動弁を介して、液体窒素供給部である入口側デュワーに供給される。

このため、入口側デュワーには液体窒素がほとんど気化することなく供給される。液の補給時における入口側デュワー内の圧力上昇はわずかである。入口側デュ

Fig. 1 Details of liquid N₂ reservoir

ワー内の圧力は貯槽内のガスの圧力と同圧であり、窒素ガス貯槽より送られる窒素ガスによって加圧され、図示のマノスタットによって作動する電磁弁によって所定の圧力に保たれている。液体窒素貯槽は真空断熱を施し、外径は 15 cm，下部の電動弁につながる導管は外径 1.7 cm で容積は約 5l である。

ソリッド型 200Ω，1/8 W のカーボン抵抗をブリッジの一端とし、同抵抗が液体窒素自由表面を出入することによるブリッジ出力を検出して液面の制御を行っている。すなわち、Fig. 2 の如くその出力によってリレーを作動して、貯槽につながる弁を開閉し、入口側デュワー内の液面を所定の高さに保っている。液体窒素は入口側デュワーより円環部を流れ、液体窒素で保冷されている出口のガラスデュワーに溜る。テストセクションを流れる液体窒素の流量は、ガラスデュワーに溜る量から求めた。

実験に使用した二重円管の種類を Table 1 に示した。表中 1, 2, 3 の内管は銅線で、他は銅管である。

Table 1 Details of experimental concentric annuli

	D ₀ , cm	D _i , cm	D _h , cm	k=D _i /D ₀
1	0.205	0.105	0.100	0.51
2	0.305	0.198	0.107	0.65
3	0.305	0.258	0.047	0.85
4	0.597	0.300	0.297	0.50
5	0.597	0.500	0.097	0.84

各円管は長さ 200 cm である。二重円管を同心状に保つために、スペーサーとして銅の細線を 5mm の長さで、内管に 120° の角度をもって数箇所ハンダ付けしている。スペーサーの間隔は円環によって異なっているが、20 cm~40 cm である。

3. 実験結果とその整理

水平同心二重円管の円環部分を通る常温流体の圧力損失に関する研究は少なくはない²³⁾。一般に流路の断面が円形とは異なる場合には、その流れる容積を流路の濡れ面積で割った値の 4 倍、いわゆる、水力学的直径を代表長さとして、平均流速に関するレイノルズ数を定義すれば、円管における圧力損失と同等な扱いができるとされている⁴⁾。同心二重円管についてこれを計算する。

円管における外力の平衡条件は

$$\Delta P \times \frac{\pi D^2}{4} = \tau_w \pi D L$$
$$\Delta P = 4 \cdot f \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \frac{L}{D} \tag{1}$$

D: 直径 [cm], L: 長さ [cm], τ_w : 壁面における摩擦応力 [dyne/cm²], $\tau_w = f \cdot 1/2 \rho u^2$, ρ : 液体の密度 [g/cm³], u : 平均流速 [cm/sec], f : 摩擦係数 [-]。

上式の $\pi D^2/4$ を流路の断面積に代え、 $\pi D L$ を濡れ長さに代えれば

$$\Delta P \times \frac{\pi}{4} (D_0^2 - D_i^2) = \tau_w \pi L (D_0 + D_i)$$

Fig. 2 Liquid level and N₂ gas pressure control system

$$\Delta P = 4 \cdot f \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \frac{L}{D_h} \quad (2)$$

D_0 : 外管の内径, D_i : 内管の外径, $D_h = D_0 - D_i$ となり, 水力学的直径 D_h は外管と内管の間隙の大きさ ($D_0 - D_i$) に一致する。

一方, ニュートン流体が層流で円環部分を流れる場合には, 摩擦損失の解析値はつぎようになる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{32 \mu L u}{D_0^2 \left\{ 1 + k^2 - \frac{(1-k)^2}{1_n 1/k} \right\}} = \frac{32 \mu L u}{D_0^2 \cdot f(k)} \\ &= \frac{4}{f(k)} \cdot \frac{16}{Re_0} \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \left(\frac{L}{D_0} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

上式中 k は内管と外管の比 D_i/D_0 であり, $Re_0 \equiv \rho u D_0/\mu$ である。 $k \rightarrow 0$ では $f(k) \rightarrow 1$ となり, (3)式は内径 D_0 の円管についての圧損失を含んでいる。

$f(k)$ は $1 > k > 0.4$ の範囲内では良好な精度で $2/3(1-k)^2$ と近似できる。したがって, (3)式はつぎのようになる。

$$\Delta P = \frac{3}{2} \cdot \frac{32 \mu L u}{D_h^2} = 4 \cdot \frac{24}{Re} \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \left(\frac{L}{D_h} \right) \quad (4)$$

Re は $\rho u D_h/\mu$ である。すなわち, $1 > k > 0.4$ の範囲では, $D_h = (D_0 - D_i)$ を代表直径とすれば, 層流域についてえられる円管の解析解の 1.5 倍の圧損失を示すことになる。

Fig. 3 は D_h と円環内平均流速 u に関する Re と,

管摩擦係数 $f = \Delta P / \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot D_h / 4L$ との関係を示したものであり, 本実験は $k = 0.50 \sim 0.85$ すなわち $k > 0.4$ の範囲で行なわれている。同図中に, ニュートン流体についてえられた R.Koch⁵⁾らの実験結果を示したが, $Re < 2,000$ の範囲では, 両者はともにほぼ $f = 24/Re$ に近い値を示している。 $Re > 2,000$, すなわち乱流域においても, Re と f との関係に, k の影響は直接には現われず, 各二重円管についてほぼ同様な相関を示している。この領域では, 乱流域における円管に関する Blasius の実験式による値 $f = 0.079 Re^{-1/4}$ より大きな値をとっている。また, 通常の流体については, $2,000 < Re < 4,000$ の範囲で f と Re との相関の急激な変化として現われる乱流発生の変移状態は, 本実験では顕著には現われていない。

4. 結 言

水平同心二重円管内における液体窒素の流動圧損失を測定し, 既往の常温ニュートン流体についてえられた実験値との比較を行なった。その結果, 層流域及び乱流域について, 常温ニュートン流体と同等に圧力損失を推定できることが明らかとなった。また, 乱流への遷移は通常の常温ニュートン流体に比べて緩やかであることがわかった。

5. 謝 辞

本実験にあたって協力と助言をいただいた北大理学

Fig. 3 Experimental correlation of f and Re

部極低温液化センターの皆さまに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 遠藤, 敦賀: 低温工学, 8 No. 3 105 (1973)
- 2) E. S. Davis : Trans. A. S. M. E., 65 755

- (1967)
 - 3) A. Quarmby : Int. J. Mech. Sci., 9 205 (1967)
 - 4) H. Schlichting : Boundary-Layer Theory, McGraw-Hill sixth Edition p. 575 (1964)
 - 5) R. Koch, K. Feind : Chemie-Ing.-Techn. 30, 577 (1958)
-