液体窒素の円管内流動圧力損失

遠 藤 一 夫・敦 賀 英 男

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4月19日受理)

“The Pressure Drop of Liquid Nitrogen Flow in Horizontal Tube”

by Kazuo ENDOH and Hideo TSURUGA

Dept. of Chem. Process Eng., Hokkaido Univ.

Kita 13 Jō Nishi 8 Chōme, Sapporo-shi

(Received April 19, 1973)

Synopsis :

The pressure drop of single phase liquid nitrogen flow in horizontal tube was measured. The tubes investigated were 0.305, 0.204 and 0.0723 cm inner diameter and 200 cm long and were immersed into the liquid nitrogen contained in a vacuum insulated vessel. Experiments were made with a Reynolds number range of 500~20,000. The experimental data were presented in terms of the Fannings friction factor.

The results were in good agreement with theoretical line of newtonian liquid in the range of laminar flow and were approximately fit for the data obtained by newtonian liquid such as water in turbulent flow.

1. 緒 言

極低温流体の管内輸送に関して、実用上重要な設計条件の一つは圧力損失の推定であろう。液体窒素、液体水素、液体ヘリウム等の極低温流体を輸送する場合、この種の流体の特性として伝熱を伴うことによって、液単相流は容易に気・液二相混合流に転じ、混相流の流動の挙動、その圧力損失等については既往の報告¹⁾²⁾が少なくない。しかし、液単相流については実験精度の良好な基礎データを見い出すことは困難であり、単相流と仮定できる条件下で行なわれた既往の実験結果の多くは、管内流速と圧力損失の関係について、数少ないデータをもとにして、水等の通常の液体に関する結果と比較検討を行なっているに止っている³⁾。

管内流動が液単相流と仮定できる場合、常温において安定した相をとる気体、あるいは液体に関する多くの実験から見い出されたレイノルズ数と管摩擦係数との関係が、そのまま一般の低温液体についても成立す

ると仮定するには、未だ実験例を欠いているのが現状であろう。管径を変えるなど、実験条件の範囲を拡大して、流動圧損失を実験的に検討した基礎データが少なく、本報告では、熱絶縁した条件下で液体窒素の水平管内の流動圧力損失を測定して、レイノルズ数と管摩擦係数に関する知見を補うことを目的としている。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示し、装置本体の詳細を Fig. 2 に示した。装置本体は A, B, C, D の4つの部分から組立てられている。A部は液体窒素の貯槽デュワーであり、テストセクションに連結されている部分である。Bは真空断熱用の水平管部、Cは真空排気口及び、テストセクション冷却用の液体窒素供給部、Dは液体窒素をガラスデュワーに流出させる出口デュワーである。入口デュワーと出口デュワーは二重の液体窒素による保冷を行なっている。図示 a, b, c は保冷用液体窒素の供給部であり、d は真空吸引部で

ある。入口デュワーは試料液体を保冷し、出口デュワーは流出する液体窒素の雰囲気気を保冷している。

装置本体の材質はフランジを除いてステンレス SUS 27 であり、入口、出口、A、D 両デュワーの板厚は 1 mm と 0.6 mm の 2 種類である。両デュワー

を結ぶ B 部の外側円管は、内径 70 mm、厚さ 3 mm で、内部には内径 50 mm の銅管にアルミ箔を巻きつけた輻射シールドを入れている。

流動実験に使用した円管は、常温において内径が 3.05 mm、2.04 mm の銅管と 0.723 mm のステンレ

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2 Details of experimental apparatus.

ス管であり、それぞれの長さは2.00mである。各円管はFig. 2に示すように中央部約1mの長さになわって、冷却用の液体窒素容器が同心状につけてあり、円管の両端から42.0cm, 36.5cmの位置に、入口デュワーと出口デュワーに接続するフランジがついている。このフランジから円管の両端にいたる範囲は、A, Dデュワーのうちに挿入され、入口側は試料液体窒素中に、出口側は液体窒素温度に冷却された雰囲気中に突出している。

大気圧と真空部をしゃ断するフランジのシールは、常温に接する部分では合成ゴムガスケットを使用した。液体窒素温度に冷却される流動円管に取りつけられているフランジのパッキングは、ヒューズを数回巻いてリング状にし、スプリングワッシャによって締めつけている。常温から液体窒素温度にいたる冷却による実験円管の収縮は、銅管の場合長さ2mで約6mm、ステンレス管では約4mmあるが、実験円管を囲む装置本体の水平管部との歪み、あるいはテストセクション冷却用の窒素容器との歪みは、リン青銅ベローズFig. 2中eによって吸収されている。

真中熱絶縁のために両デュワー部、及び実験装置の同心環状部を排気した。使用した排気ポンプは、排気速度400l/secの油拡散ポンプと150l/minの回転ポンプである。電離真空計によって測定した実験装置本体の真空度は、 10^{-5} Torr程度である。

液体窒素は、100lのタンク (Fig. 1c) 内で、蒸発ガスによって加圧され、サイフォンを通して入口デュワーに供給される。液体窒素の液深は入口デュワーの中の液面検出器によって所定の値に保たれている。すなわち、設定値を越えればサイフォンと直結している電磁弁が動作し、供給が停止される。トランジスタをその保護缶を除いて露出し、自己加熱を無視しえぬ電力を加えて、液体窒素に接することによって生ずる急激な特性の変化を利用して、液面の検出を行なった。

液面検出器の感度は、液面の降下速度によって支配されるが、本実験範囲では液面の降下速度は最大流量時においても1.4mm/sec程度であり、検出器は液面の内外位置で ± 2 mm程度で動作する。すなわち、2sec程度が検出器のおくれ時間となる。また、サイフォマ内に残っている液体窒素は電磁弁が閉じた後も供給されるので、これを考慮すると検出器で検出された液面の高さと、実際の液面の高さとの差は約1cm以内となる。

流速の小さな範囲では、入口デュワー内の試料液体

窒素の自由表面を大気圧とし、輸送管出口とのヘッド差を圧損失として実験を行なった。流速の大きな範囲では、入口デュワー内を、窒素ガスによって加圧し、圧損失を高めている。したがって加圧下で圧損失を一定に保つためには、ガス圧と液深との両方を制御しなければならない。実操作においては、液供給の初期にはサイフォン内で気化したガスが、液と同時に供給されるために、入口デュワー内のガス圧力が急激に増加する。この場合に発生する窒素ガスをただちに系外へ放出するため、動作圧をずらした二つのマノスタットを並列におき、2個の電磁弁を動作させて、初期に発生する窒素ガスを放出する回路を設けている。

入口デュワー内の窒素ガス圧力は、水銀マノメーターによって測定し、液流量の測定は、ガラスデュワー内の液体窒素液面の上昇速度から求めた。圧力損失は入口デュワー内の液面の高さあるいは、液面の高さとは液面を加えたガス圧力を加算して求めた。

3. 実験結果

データの計算に用いた液体窒素の物性値は、1気圧77.3°Kにおいて粘度 $\mu=0.158 \times 10^{-2}$ poise, 密度 $\rho=0.808 \text{g/cm}^3$ である。実験円管の冷却による管径及び、管長の収縮は、その値に比較してごく小さいので計算においては、常温での値を用いた。

圧力損失 ΔP を $[\text{dyne/cm}^2]$ で、平均流速を u $[\text{cm/sec}]$, D , L それぞれ管の内径、長さとする、流体が円管内を流れている場合、管内壁面に働く剪断応力を τ とおけば、 $\Delta P \pi D^2/4 = \tau \pi DL$ であり、 $\tau/1/2 \rho u^2 = f$ とおけば、 $\Delta P = 4f \rho u^2 L/2D$ となる。 f は管摩擦係数である。

ニュートン流体が層流で流れる場合においては、Hagen-Poiseuilleの式が成立し、同式を書き改めれ

Fig. 3 Friction factor of liquid nitrogen.

ば,

$$\begin{aligned} \Delta P &= 4 \cdot \frac{16\mu}{\rho u D} \left(\frac{\rho u^2}{2} \right) \frac{L}{D} \\ &= 4 \cdot \frac{16}{\text{Re}} \left(\frac{\rho u^2}{2} \right) \frac{L}{D} \\ &\quad : \text{レイノルズ数 } \text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu} \end{aligned}$$

よって $f = 16/\text{Re}$ となる。

乱流状態では、厳密な理論解は困難であり通常のニュートン流体については、Blasius の実験式が比較的よい精度で成立する。このとき $f = 0.0791 \text{ Re}^{-1/4}$ となる。Fig. 3 に Fanning の管摩擦係数 $f = \Delta P D / 2 \rho u^2 L$ とレイノルズ数 $\text{Re} = \rho u D / \mu$ との相関結果を示した。

データのばらつきの内部では管径の種類による差異は認められず、層流領域においては水等の室温において安定な相をとるニュートン流体の理論式と一致した。また、乱流領域においても、実験円管の粗度は測定していないが、ほぼ水等の流体と同等な挙動を示すことがわかった。

4. 結 言

極低温流体として液体窒素を用い、液单相流の円管内圧力損失を求め、圧力損失とレイノルズ数の相関は、水等の通常の液体と同様な挙動を示すことを実験的に明らかにした。

5. 謝 辞

本実験にあたって協力と助言をいただいた高村慎介君ならびに長谷川正治君、また種々の御援助をいただいた北大理学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) J. D. Rogers : A. I. Ch. E Journal 2 (1956) 536
- 2) P. S. Shen, Y. W. Jao : Advances in Cryogenic Engineering, 10 (1969) 378
- 3) 信田, 三浦, 岩田 : 低温工学研究発表会, 予稿集 (1972) 84