同心および偏心二重円管内における 非ニュートン流体の脈動流の測定

奈良工業高等専門学校 森 教 安* (会員)
 “ 若 林 敏 夫*
 大阪大学工学部 堀 川 明** (〃)
 中 村 喜 代 次** (〃)

Measurement of Pulsating Flow of Non-Newtonian Fluids through Concentric and Eccentric Cylinders.

Noriyasu Mori*, Toshio Wakabayashi*, Akira Horikawa** and Kiyoji Nakamura**,

*Nara Technical College, Nara.

**Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Osaka.

Abstract

The pulsating flow of non-Newtonian fluids through concentric and eccentric cylinders was experimentally studied. The results are summarized as follows:

- 1) The enhancement rate of the flow through concentric cylinders decreased with increasing the frequency of the pulsating pressure-gradient noise.
- 2) The correlation of the enhancement rate of the flow through eccentric cylinders with the mean flow rate showed that the flow enhancement was independent on the eccentricity of cylinders. (Received March 18, 1983)

摘 要

目的 二重円管内における非ニュートン流体の脈動流について、流量増加率を実験により求め、脈動の周波数と振幅比および偏心率が流量増加率に与える影響を明らかにする。

成果 1) 同心二重円管において、流量増加率は脈動の周波数が大きいほど小さくなる。流量増加率と振幅比の二乗とは比例関係にある。

2) 偏心二重円管において、流量増加率は脈動流の平均流量で整理すると、流量増加率は偏心率にほとんど関係しない。

(昭和58年3月18日受理)

1. 緒 言

非ニュートン流体の二重円管内流れは、押出機のダイの中の流れ、粘度計や法線応力差測定装置内の流れおよび軸受内の流れなどにみられ、工学的にも重要な基本的流れの一つである。そのため、二重円管内における種々の流れが研究されてきた。Ballalら^{1,2)}、Kazakiaら^{3,4)}は、Rivlin-Ericksenの二次流体モデルを用いて偏心二重円管内におけるいろいろな流れを解析している。また、Jones⁵⁾、Ballal⁶⁾、堀川ら⁷⁾は偏心二重円管内における二次流れに着目し研究を行っている。同心二重円管内流れにおける内・外管壁上での圧力差を測定し、第二法線応

力差を求める実験も、Lobo⁸⁾、大久保ら⁹⁾によりなされている。これらの研究は、定常流に関するものばかりであるが、Akay¹⁰⁾は差分法を用い、同心二重円管内におけるいくつかの非定常流の計算を行っている。しかし、二重円管内における非定常流の研究はほとんどない。

いっぽう非定常流のうちでも脈動流については工学的な意味の重要性から、円管の場合について多くの研究がなされてきた。Barnesら¹¹⁾は実験と計算の両方を行い、同じ圧力勾配なら定常流より脈動流の方が流量が増加することを報告した。しかし、流量増加率が実験では脈動の周波数の増加関数となったのに、Oldroydモデルを用いた計算ではその逆の結果を得た。これ以後、流量増加

率の周波数依存性を解明するために、種々の構成式を用いた解析的研究¹²⁻¹⁶⁾が行われたが、Barnes らの実験結果を定性的に説明できたのは、一般化 Maxwell モデルによるものだけであった。最近、Phan-Thien ら¹⁷⁾は、脈動流の実験を行い、流量増加率が脈動の周波数の減少関数になると報告している。これは Barnes らの結果と逆になっているが、彼らの報告では、「Barnes らの脈動実験は圧力勾配の測定にプラスチック チューブを使用しており、そのために脈動の振幅を実際よりも小さく評価することになり、これが周波数の依存性に大きな誤差をもたらす」と指摘している。しかし、彼らの実験結果もデータのばらつきが大きく、さらに多くの実験が必要と思われる。このように、非ニュートン流体の脈動流に関する研究は活発に行われているが、実験的研究が少なく、流量増加率の周波数依存性という重大な点についても確定的でないのが現状のように思われる。しかも、円管以外の流路については研究が行われていない。

そこで、本研究では、従来円管で行われていた非ニュートン流体の脈動流の実験を二重円管に適用した。はじめに、流量増加率の周波数依存性を明らかにするために、同心二重円管で実験を行った。つぎに、非対称な流路断面における流量増加率を調べるために二重円管を偏心させ実験を行い、偏心率の影響を明らかにした。なお、実験には Polyacrylamide (Separan AP-30, PAA と略す) 水溶液を用いた。

2. 実験装置および実験方法

図1に脈動流実験装置の概略を示す。二重円管上流に接続された溶液シリンダ¹⁴内の溶液はピストン¹⁵に押されることにより、主流量として二重円管に送られる。実験における主流量の設定は、可変速モータ¹⁸と減速歯車装置¹⁷により行った。脈動流はプランジャ⁸を電気油圧サーボ装置²³で正弦波振動させることにより発生させた。このとき、電気油圧サーボ装置の入力として関数発生器から出力される正弦波電圧を用いた。また、主流量の乱れの除去と脈動流の平滑化のために、空気室¹²を設けた。

脈動流の圧力損失は半導体圧力変換器¹⁹(豊田工機製, DD101K)により測定した。なお、偏心外筒¹に設けた2つの測圧孔と圧力変換器の接続は、黄銅製の金具を用い剛体的に行った。さらに、その内部には空気を抜いたあとシリコンを封入した。圧力変換器からの出力電圧は増幅器²⁰により増幅したのち、12ビットA/D変換器²¹を用いてデジタル量に変換しパーソナルコンピュータ²²に入力した。そして、パーソナルコンピュータに入力された圧力勾配のデータを、つぎに示す脈動流の圧力勾配の式で近似し、最小二乗法により計算した。

$$\Delta P/L = \bar{P}(1 + \epsilon e^{i2\pi ft}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ΔP : 長さ L 間の圧力損失, $\bar{P}$: 圧力勾配の平均値, ϵ : 振幅比, f : 周波数, t : 時間である。

二重管流路は、外筒^①、ロッド^②および偏心軸受^{③④}を、2つの軸受ブロック^{⑤⑦}に取付けて構成する。偏心量を可変にするために、外筒はその内径に対して両端軸受部を、また、偏心軸受はその内径に対して軸受部を、それぞれ同じ量だけ偏心させた二重偏心機構を用いた。この機構では、偏心軸受を固定しておき、外筒を所定の角度だけ回転させることにより、偏心量を零から軸受偏心量の2倍まで任意に設定できる。なお、本実験では、外筒の内径は14.0 mm、ロッド径は12.0 mmとした。二重円管内の平均流量はピストンの速度を測定することにより決定した。

図1 脈動流実験装置概略図

実験は脈動の周波数と振幅を変えて行ったが、これは関数発生器から出力される正弦波電圧の周波数と振幅を変化させることにより簡単に実現できる。ただし、周波数の設定はユニバーサル カウンタにより行った。実験に用いた流体は PAA 水溶液で、濃度が0.2%と0.8%の2種類である。図2に本実験で使用した溶液の流動特性を示す。

図2 高分子溶液の流動特性

3. 実験結果

3.1 同心二重円管における流量増加率

脈動流の圧力勾配の平均値と定常流の圧力勾配が同じ場合、流量は脈動流の方が大きくなることが知られている。ところで、この流量の増加を次式で示す流量増加率 I で表わすことにする。

$$I = \frac{Q_f - Q_s}{Q_s} \times 100 (\%) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 Q_s ：定常流流量、 Q_f ：脈動流流量である。

図3にPAA0.8%，振幅比0.5の場合における流量増加

図3 流量増加率の周波数依存性

率の周波数依存性を示す。この図から、流量増加率はどの周波数の場合にも最大値を持っており、しかも最大値を示す圧力勾配の値は、周波数が大きいほど大きくなっている。また、周波数依存性については、周波数が大きくなるほど流量増加率が小さくなるという結果が得られた。しかし、圧力勾配の大きいところでは周波数依存性

はあまり見られなかった。本実験では、測圧孔から圧力変換器までを剛体によって接続し、その中にシリコンを封入して、Phan-Thien ら¹⁷⁾が指摘した測定誤差を除いて実験を行った。この実験で得られた周波数依存性に関する結果は、Phan-Thien ら¹⁷⁾の実験結果と定性的に一致した。なお、PAA 0.2% 溶液についても周波数依存性の実験を行ったが、ここで使用した周波数範囲内では明確な周波数依存性は認められなかった。これは、溶液の弾性的効果が小さいためと考えられる。

つぎに、圧力勾配が一定のときの振幅比と流量増加率の関係を調べた。その結果を図4、図5に示す。これらの図から、本実験の振幅比 ϵ の範囲内では、流量増加率

図4 流量増加率と振幅比の関係

図5 流量増加率と振幅比の関係

は振幅比 ϵ の二乗とほぼ比例関係にあるのがわかる。このことは、円管の場合に報告されている結果^{11,15,17)}と一致する。

このように、同心二重円管で得られた流量増加率の実験結果は、Phan-Thien ら¹⁷⁾が円管で得た実験結果と定性的に同じであった。

3.2 偏心二重円管における流量増加率

ここでは、二重円管が偏心した場合に流量増加率にどのような変化をもたらすのかを調べた。偏心の程度を表わすのに、つぎの偏心率 e を用いた。

$$e = \frac{\delta}{R_o - R_i} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 δ ：内外筒の中心間距離、 R_o ：外筒半径、 R_i ：内筒半径である。

図6、図7にPAA 0.2%とPAA 0.8%の結果を示す。ただし、周波数は1 Hz、振幅比は0.5とした。どちらの濃度の場合にも、流量増加率の最大値を示す圧力勾配の値は、偏心率が大きくなるほど小さくなっている。しかし、流量増加率の最大値は偏心率にかかわらず同じ値となっている。偏心二重円管では、定常流の流量と圧力勾配の関係が偏心率により異なるので、図6、図7の

図6 流量増加率（偏心の場合）

図8 流量増加率と流量の関係

図7 流量増加率（偏心の場合）

図9 流量増加率と流量の関係

ように流量増加率の最大値を示す圧力勾配の値が偏心率により異なることが考えられる。そこで、横軸に脈動流の平均流量 Q_f をとって整理したのが、図 8、図 9 である。このように、脈動流の平均流量で整理すると、PAA 0.2 %, PAA 0.8 % とともに、実験値に若干のばらつきはあるが、一つの曲線で整理できることがわかる。しかし、このことに関しては、今後適切な構成式を用いて計算を行い、さらに検討する必要があると思われる。

4. 結 言

同心および偏心二重管内における非ニュートン流体の脈動流の流量増加率について、PAA 水溶液を用いて実験を行い、つぎの結果を得た。

1) 同心二重円管において、流量増加率は脈動の周波数が大きいほど小さくなる。また、流量増加率と振幅比 ϵ の二乗とは比例関係にあった。

2) 偏心二重円管において、流量増加率は、偏心率が大きいほど、最大値を示す圧力勾配の値は小さくなるが、最大値はほとんど変化しない。また、流量増加率を脈動流の平均流量で整理すると一つの曲線となる。

参考文献

- 1) B. Y. Ballal, R. S. Rivlin: Rheol. Acta, **10**, 484 (1975)
- 2) B. Y. Ballal, R. S. Rivlin: Rheol. Acta, **18**, 311 (1979)
- 3) J. Y. Kazakia, R. S. Rivlin: Rheol. Acta, **16**, 229 (1977)
- 4) J. Y. Kazakia, R. S. Rivlin: J. Non-Newtonian Fluid Mech., **8**, 311 (1981)
- 5) J. R. Jones, R. S. Jones: J de Mécanique, **5**, 375 (1966)
- 6) B. Y. Ballal, R. S. Rivlin: Rheol. Acta, **14**, 861 (1975)
- 7) 堀川明, 森教安, 三村宣治: 日本機械学会論文集 (B編), **47**, 1971 (1981)
- 8) P. F. Lobb, H. R. Osmer: Rheol. Acta, **13**, 965 (1974)
- 9) 大久保誠介, 寺尾道生, 堀幸夫: 日本機械学会論文集, **43**, 877 (1977)
- 10) G. Akay: Rheol. Acta, **16**, 598 (1977)
- 11) H. A. Barnes, P. Townsend, K. Walters: Rheol. Acta, **10**, 517 (1971)
- 12) J. M. Davies, S. Bhuriratana, R. B. Bird: J. Non-Newtonian Fluid Mech., **3**, 237 (1977)
- 13) N. Phan-Thien: J. Non-Newtonian Fluid Mech., **4**, 167 (1978)
- 14) N. Phan-Thien: Rheol. Acta, **19**, 285 (1980)
- 15) O. Manero, K. Walters: Rheol. Acta, **19**, 277 (1980)
- 16) N. Phan-Thien: J. Rheol., **25**, 293 (1981)
- 17) N. Phan-Thien, J. Dudek: J. Non-Newtonian Fluid Mech., **11**, 147 (1982)