C212

脈動流の熱輸送特性

Thermal Energy Transportation by a Pulsatory Flow

○正 高橋 貢 (千葉大院)

犬飼 哲 (千葉大院)

正 田中 学 (千葉大工)

正 菱田 誠 (千葉大工)

Mitsugu TAKAHASHI, Akira INUKAI, Gaku TANAKA and Makoto HISHIDA

Dept. of Mech. Eng., Chiba Univ., 1-33, Yayoi-chou, Inage-ku, Chiba 263-8522

This paper deals with improvement of heat transportation by pulsatory flow that is an oscillatory flow imposed with a steady flow. Velocity profile and temperature profile were numerically analyzed. It was found that heat transportation was increased about 10 times as much as the oscillatory flow when $w_{st}=0.01w_{osmax}$.

Key Words: Thermal Energy Transportation, Pulsatory Flow, Pipe Flow, New Dream Pipe

1. はじめに

高温側と低温側の二つのタンクを細長い管で結び、管内の流体に振動を与えることにより、高温側から低温側へ高い熱輸送特性が得られる。この装置は、ドリームパイプと呼ばれ、断面での半径方向の熱拡散が管内流体の振動に対して遅れることによって起こっている。この現象に関して、これまでにいくつかの研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾が行われており、従来のドリームパイプの熱輸送特性をより向上させる研究⁽⁴⁾も盛んに行われている。しかしながら、振動流に定常流を付加した流れ（以下脈動流）の熱輸送特性についての研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では、振動流に付加する定常流の大きさ、熱輸送能力との関係を数値計算によって検討を行った。

2. 数値解析

2. 1 基礎式（無次元）と解析モデル

式(1)~(4)に基礎式、式(5)に境界条件を示す。

$$W_o^2 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots(1)$$

$$W_o^2 \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$P_r W_o^2 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

解析モデルを Fig.1 に示す。解析モデルは、流路左端で

$$w = \frac{S}{a} \left(\cos t + \frac{w_{st}}{w_{osmax}} \right)$$

の流速変動を与えた。また、Fig.1 に示すように $z=0 \sim 25$ までは高温部 ($\theta=\theta_H$)、 $z=50 \sim 75$ までは低温部 ($\theta=\theta_C$) とし、壁面を一定の温度に設定した。また、 $z=25 \sim 50$ までは試験管部として、壁面は断熱に設定した。ここで r は半径方向座標、 z は管軸方向座標、 t は時間、 u は半径方向速度、 w は管軸方向速度、 T は温度、 P は圧力であり、いずれも無次元変数である。長さは管半径 a 、時間は $1/\omega$ 、速度は $a\omega$ 、圧力は $\rho v \omega$ で、無次元化を行った。また、無次元温度 T は、

$$T = \frac{\theta - \theta_C}{\theta_H - \theta_C}$$

である。ここで、 θ_H は高温側温度、 θ_C は低温側温度である。

$W_o = \sqrt{\omega/\nu a}$ (ω : 脈動の角振動数、 ν : 流体の動粘性係数、 a : 管半径) はウオマズリー数、 Pr は、プラントル数である。基礎式と境界条件より、脈動流を支配するパラメータとし

て、 W_o 、 Pr 、無次元振幅 (S/a)、最大流速比 (w_{st}/w_{osmax})、管長比 (L/a) が得られる。ここで、 S は脈動流の振幅、 w_{st} は脈動流の定常流成分、 w_{osmax} は脈動流の振動流成分の最大値である。本報では、熱輸送に及ぼす周波数の影響と最大流速比の影響を調べるためにパラメータを以下のようにした。

$W_o=10$

$w_{st}/w_{osmax}=0.001, 0.003, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$

$Pr=4.642$

$S/a=2.5$

$z=75$

Fig.1 Numerical model

脈動流の熱輸送特性は、試験管部を通る無次元平均熱量によって、評価を行った。評価に使用した無次元平均熱量は、式(5)で示す1周期間に管内の流体を通して、断面を通過する熱量によって算出し、 $\rho C w a^3 (\theta_H - \theta_C)$ (ρ : 流体の密度、 C : 流体の比熱) で無次元化を行った。

$$Q = 2\pi \int_0^{+2\pi} \left(w T - \frac{1}{P_r W_o^2} \frac{\partial T}{\partial z} \right) r dr dt \quad (5)$$

2. 2 数値解析

数値解析には汎用流体ソフト FLUENT を用いた。数値解析は、2次元軸対称モデルを用い、Simple 法によって行った。また、運動量方程式、エネルギー方程式ともに対流項の離散化には、べき乗法を用いた。計算は、Fig.1 を管軸方向に1500分割、半径方向に20分割し、管壁付近は、流速、温度の変化を正確に計算できるように細かく分割した。

3. 解析結果

$W_o=10$ 、 $w_{st}=0.01w_{osmax}$ の試験管部での流速分布を Fig.2 に示す。縦軸は、軸方向無次元速度 w をあらわしている。Fig.2 では、実線が数値解析解、プロットが振動流と定常流の解析解の和となっている。Fig.2 の各値は、十分発達した状態での無次元周期をあらわす。Fig.1 の高温部で十分な速度の助走区間を設けたため試験管部では、 z のどの位置においても Fig.2 のような流速分布が得られた。また、管内軸方向速度 w は、どの無次元周期においても定常流と振動流の解析解の和と一致していた。このことから、本数値解析結果は妥当性であることが分かる。次に試験管部における $z=37.5$ の位置での温度分布を Fig.3 に示す。Fig.3 の縦軸は、無次元温度 T である、Fig.3(a)は $W_o=10$ 、 $w_{st}=0$ の振動

流, (b)は $w_{st}=0.01w_{osmax}$, (c) $w_{st}=0.001w_{osmax}$ の脈動流である。Fig.3(a)では, 実線が数値解析解, プロットが Kaviany⁽¹⁾による解析解を示している。まず, 振動流の温度分布は, $T=0.5$ を対称軸として, 上下に対称な分布となっている。また, 数値解析結果は Kaviany の解析解とほぼ一致しており, 流速と同様に解析の妥当性を示している。次に脈動流の温度分布(b)(c)は, (a)の振動流の温度分布のように上下対称ではなく, 高温側へ歪み, 軸方向位置によって状態が変わる分布となる。また, 定常成分 w_{st} が大きくなるにつれて, 温度分布も高温側へ歪んだ状態となり, 管内の温度は w_{st} に大きく影響をうけることがわかる。Fig.4に脈動流の無次元平均熱量 Q と振動流の無次元平均熱量 Q_{os} との比を示す。Fig.4では, プロットが数値解析結果である。無次元平均熱量 Q は, w_{st} が大きくなるにつれて上昇している。これは, w_{st} が大きくなるにつれ, 脈動流の定常成分で輸送される熱量が増大することと一周期中の各位相において, 温度分布が高温側へ歪んでいくため, 全体として移動熱量が向上したためと考えられる。本解析では, $w_{st}=0.01w_{osmax}$ のとき, 振動流の熱量の約 10 倍にまで上昇した。Fig.4 の直線は, 振動流によって運ばれる熱量 Q_{os} と定常流によって運ばれる熱量 Q_{st} の単純加算値 Q を示す。

$$Q=Q_{os}+Q_{st} \quad (6)$$

Q_{os} は, 振動流の理論値 (Kaviany⁽¹⁾), Q_{st} は管入り口から流入してくる定常流の熱量である。Fig.4 から, 分かるように脈動流の熱量は式(6)で求めた Q より, 約 10%小さい値となった。

4. 結言

本研究では, 振動流に付加する定常流の大きさによる熱輸送能力の向上について数値計算によって検討を行った。その結果, 以下のようなことを確認することができた。

- ・ w_{st} の増加とともに高温側へ歪んだ分布を示すことがわかった
- ・ 無次元平均熱量は, w_{st} とともに向上し, 本研究では, $w_{st}=0.01w_{osmax}$ 時に振動流の熱量 Q_{os} の約 10 倍となった

参考文献

- (1)Kaviany,M., Trans.ASME, J.Heat Transf., 107-2(1985),459
- (2)西尾, 他 2 名, 機論 B 編, 60-569(1994-7),233
- (3)稲葉, 久保, 機論 B 編, 59-563(1993-7),2265
- (4)荒井, 他 3 名, 第 39 回伝熱シンポジウム講演論文集, vol.1(2002),135
- (5)近江, 碓井, 機論, 41-342(昭 50-2), 546

(a) $w_{st}=0$

(b) $w_{st}=0.01w_{osmax}$

(c) $w_{st}=0.001w_{osmax}$

Fig.3 Temperature Distribution

Fig.2 Velocity Distribution

Fig.4 Average Heat flux Ratio