222 深い円周方向溝を有する管路内の振動流による炭酸ガスの軸方向拡散

Longitudinal Diffusion of Carbon Dioxide through Oscillatory Flow in a Circular Pipe with Deep Circumferential Grooves

○ 正 清水 昭博 (東京高専) 正 清水 優史 (東京工大) 正 菅原 路子 (東京工大)

Akihiro SHIMIZU, Tokyo National College of Technology, 1220-2, Kunugida-machi, Hachioji-shi, Tokyo

Masashi SHIMIZU and Michiko SUGAWARA, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Key words: Oscillatory Flow, Effective Diffusivity, Circumferential Groove, Carbon Dioxide

1. はじめに

気道には軟骨による起伏が存在する。人工呼吸器への応用が試みられている振動流による拡散増進に加え、この起伏がさらに拡散を増進させる要素になり得るのではないかと考えられる。前報⁽¹⁾で、軟骨による起伏を有する気道をモデルにした機械的な管路を構成し、空気中における円管内の振動流による炭酸ガスの拡散について、滑らかな直管と深さ 2mm の数種類の異なる溝幅の円周方向溝付管を用いて、振動数と拍出体積を変えて実験を行い、有効拡散係数を比較し、さらに溝の深さが 3mm, 4mm で溝幅 10mm の管路でも拡散実験を実施し、深さ 2mm の場合と比較して溝の深さの増加とともに有効拡散係数の値が上昇する傾向があることを報告した。そこで、本報ではさらに深さ 6mm の管路による詳細な拡散実験を実施したので、その結果について報告する。

2. 直管内の層流での有効拡散係数の理論値

直管内における層流の振動流による有効拡散係数の理論値は Watson⁽²⁾により次式で示される。

$$\frac{D_{th}}{D_{mol}} = 1 + h(\alpha, \sigma) \frac{V^2}{a^6} \quad (1)$$

ここで、 D_{th} は有効拡散係数の理論値、 D_{mol} は分子拡散係数、 $h(\alpha, \sigma)$ はベッセル関数で構成された無次元数、 α は Womersley 数、 σ は Schmidt 数、 V はピストンによる拍出体積、 a は管の半径である。

3. 実験装置及び実験方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。実験管路の長さは、ピストン側入口から 1260mm の位置に炭酸ガス注入装置を、注入点から 800mm の位置に炭酸ガス測定器を配置し、その 1265mm 先を開放端とした。振動流は AC サーボモータ

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

の回転を往復両スライダクランク機構によりピストンの往復直線運動に変えて発生させた。実験管路の小径部内径を 18 mm、シリンダーの内径を 50mm とし、内径が 50mm から 18mm に縮小するテーパ管でそれらを接続した。円形断面の滑らかな直管には黄銅管を用いた。溝付管はアルミ製の円環で、外径 44mm、内径 18mm、厚さ 10mm と外

Fig.2 Pipe with Circumferential Grooves

径 44mm、内径 30mm に加工した長方形断面のものを交互に配置し、Fig.2 のようにして円周方向に深さ 6mm の溝を有する溝付管とした。また、内径 BD が 30mm の円環には厚さ BW が 2mm, 5mm, 10mm のものを用意した。

注入時期は流速が最も遅くなると考えられるピストンの下死点とした。予め管路内を大気だけの状態にし、設定回転数で AC サーボモータの回転を開始する。安定した振動流を得るため、10 回転したところで、フォトインタラプタとプログラブルコントローラにより次の下死点の時刻に注入が行われるように制御して、管路内空気をばねの力で瞬間的(移動時間 17ms)に炭酸ガスに置換する前報⁽²⁾で報告した機構により、管路内に注入した。

炭酸ガス濃度測定には、非分散型赤外線式炭酸ガス測定器(光明理化工業株 UR-120SS, 検知遅れ 20ms 以内)を使用した。炭酸ガス測定器の出力電圧は 12bit の A/D コンバータを介して、コンピュータに取り込んだ。なお、赤外線検出器の出力電圧が温度の影響を受けないように 20±2℃ の恒温室内で全ての実験を行った。

管路の小径部を内径 10mm とし、大径部(溝部)の溝幅 BW を 2, 5, 10, 15, 20, 30mm と変えて設定し、 $f=0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6$ [Hz] で、クランク半径 $r=10, 20, 30, 40$ mm に対応する $V=40, 80, 118, 158$ ml について実験を行った。

4. 有効拡散係数の算出

実験で求めた濃度と時間の関係から、高周波ノイズを除去するために移動平均法で平滑化し、注入直前の濃度を基準にした濃度に変換した上で、注入位相に対応する時刻の濃度データを抽出した。一次元拡散方程式の解の式の両辺に時間 t の平方根を掛け、対数をとった式から、その傾きを求め、有効拡散係数 D_{eff} を算出した。

なお、ある程度時間が経過すると濃度の値に開放端の影響が出てくると、注入直後は濃度がばらつくことを考慮して、初期の濃度が最大になるまでの注入位相に対応する抽出データの内、注入から最大になるまでの時間の 4 分の 1 を除いたデータのみを利用して算出した。

5. 実験結果及び考察

ピストンの拍出体積 $V=40\text{ml}$ について、3種類の振動数での深さ 2mm と 6mm の管路における、実験で得られた有効拡散係数 D_{eff} を直管内層流理論値 D_{th} で割った値 D_{eff}/D_{th} を溝幅 BW に対してプロットしたグラフを Fig. 3 に示す。 $\alpha=2.6$ では、溝深さの影響は大きくなく、 D_{eff}/D_{th} は 1 と 2 の間の低い値を示し、溝深さの影響も大きくない。 $\alpha=11.6, 14.2$ の両方とも 10, 15, 20mm の溝幅では比較的大きな値を示し、10, 15mm の溝幅で BD30 の方が BD22 より大きくなる傾向が認められる。BD30BW15 は 7.54 で今回の実験結果の中で最大であった。 D_{eff} は BW が大きくなる途中で最大値があり、30mm ではどの条件も下がってしまっている。

Fig.3 Example of Relationship between Effective Diffusivity and Groove Width for two Groove Depths

前報⁽¹⁾で溝幅 10mm (BW10)、溝深さ 4mm (BD26) で比較的大きな有効拡散係数を示したことを報告したが、本

Fig.4 Comparison of Effect of Groove Depth on Effective Diffusivity for BW=10 and V=40ml

Fig.5 Comparison of Effect of Groove Depth on Effective Diffusivity for BW=10 and V=80ml

Fig.6 Comparison of Effect of Groove Depth on Effective Diffusivity for BW=10 and V=118ml

Fig.7 Comparison of Effect of Groove Depth on Effective Diffusivity for BW=10 and V=158 ml

実験における深さ 6mm (BD30) の有効拡散係数は 4mm よりも小さくなっていることが、以下の Fig.4, 5, 6, 7 から明らかである。

また、 α の上昇とともに有効拡散係数は大きくなり、直管内層流理論値から離れようとして大きくなる傾向は変わらない。

6. まとめ

円管内振動流中の炭酸ガスの拡散増進に対する円周方向溝の効果調べるため、有効拡散係数の最高値が得られた前報⁽¹⁾の溝深さ 4mm よりもさらに深い 6mm の溝深さについて、溝幅及び溝深さを変えた実験を行い、実験の範囲内で以下のことがわかった。

- (1) 溝幅 10mm について、一部を除いて、溝深さが 6mm では溝深さ 4mm よりも低い有効拡散係数しか得られなかった。
- (2) 各溝幅について、溝深さ 6mm の方が溝深さ 2mm と比較して、大きな有効拡散係数が得られる条件が多かった。
- (3) α が小さい領域では、溝深さが有効拡散係数の大きさに及ぼす影響は比較的小さい。

本実験遂行に当たり、マレーシア出身の東京高専留学生 Suffian 君に多大の協力を頂いたことを付記する。

参考文献

- (1) 円周方向溝を有する円管内における振動流による物質拡散の増進に関する研究, JSME, 第 16 回バイオエンジニアリング講論(2004), 205-206.
- (2) Watson, E. J., J. Fluid Mech.133(1983), 233.