管摩擦に及ぼすマイクロバブルの影響 ～管摩擦とボイド率の関係～

Influence of Micro Bubble on Pipe Friction Loss ～The relationship between pipe friction loss and void fraction～

○学 関根聡 (東海大院) 正 岡永博夫 (東海大)
正 青木克巳 (東海大)

Satoshi SEKINE, Tokai University, Hiroo OKANAGA, Katsumi AOKI, Kitakaname 4-1-1 Hiratsuka city, Kanagawa prefecture

Injection of microbubbles within water has been investigated for several years as a method to achieve pipe friction loss reduction. However, the physical mechanism of this phenomenon is not yet understood. So, the purpose of our study is to understand the mechanism. We researched pipe friction loss reduction by the experimental device, which was constructed by a circular pipe. Adherence of bubbles to the wall had an effect on pipe friction loss. In the case of void fraction $0.1\% \pm 0.02\%$, the effect was shown $Re \leq 10000$, and influenced pipe friction loss reduction. In addition, in the event $Re = 5000, 20000$, pipe friction loss reduction became enlarged by increasing void fraction. Meanwhile, at $Re = 10000$, pipe friction loss reduction didn't change widely by increasing void fraction. As the result, void fraction had a relationship with pipe friction loss.

Key Words: Microbubbles, Pipe Friction Loss, Void Fraction

1. 諸言

近年、マイクロバブル(以下 MB と表記)と呼ばれる微細気泡についての研究が盛んに行われている。MB とは、発生時における直径が $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 程度の気泡である。MB は、通常の気泡とは異なる性質を持つことが分かっている。その性質には、自己加圧効果、自己圧壊、表面電位特性が挙げられる。そのような性質により、洗浄、殺菌、摩擦損失低減デバイスなどに用いられている。

Madavan らは平板間における水流の壁面境界層に細孔方式により気泡を注入し、最大 80% の摩擦損失低減効果を示した⁽¹⁾。児玉らは幅 1m、長さ 50m の模型船にて、船速 7m/s のとき最大 23% の壁面摩擦応力低減効果を計測した。また、実船を用いた場合様々な吹き出し条件を試験した結果、最大 5.5%、気泡の吹き出しエネルギーを考慮し、正味 2% の省エネルギー効果があり、MB の有能性を示した⁽²⁾。そして、筆者らの研究により、円管での管摩擦低減効果は Re 数が高くなるにつれて MB の管摩擦低減効果が小さくなることや、気泡の流路への張り付きが管摩擦損失の増減に大きな影響を与えることを明らかにした⁽³⁾。しかしながら、MB の摩擦低減効果を有効利用する為には MB が持つ摩擦低減効果メカニズムの詳細な解明が必要であり、その為に様々な条件下においての MB の摩擦損失低減効果を明らかにする必要がある。

本研究の目的は、MB が及ぼす摩擦損失低減メカニズムの解明である。主に、ボイド率と摩擦損失の関係性を調べた。

2. 実験装置及び方法

実験装置概略を Fig.1 に示す。タンクにて発生させたマイクロバブルを含む水を、ポンプにより循環させる装置である。マイクロバブル発生装置は生成量 $7 \sim 10 (\text{l/min})$ の ASK3(アスプ社)を使用した。試験管内径 $d=20\text{mm}$ 、マノメータ間距離 $\Delta L=300\text{mm}$ 、水温 20°C 、総水量 60l で一定となっている。マノメータ孔は、管上部を 0° とし円周上に、 90° 、 135° 、 180° で圧力損失を測定した。流量はバルブで調整し、重量法で計測する。流体は、水道水を使用した。

実験はマイクロバブルの飽和時に行うため、発生開始から 20min 後に行った。実験は、バルブを閉め完全静止状態から

バルブを開け循環を開始させ、3min 後に計測した。その際、壁面の気泡の状況は試験管上部に設置したカメラにより撮影を行った。また、ボイド率の測定は後藤らと同様な方法で行った⁽⁴⁾。

Fig.1 Experiment device

3. 実験結果

3.1 MB が及ぼす管摩擦損失(ボイド率 $0.1\% \pm 0.02\%$)

ボイド率 $0.1\% \pm 0.02\%$ における MB による管摩擦損失を調べた。その結果を以下に示す。その際、Fig.2 に測定孔角度 90° 、Fig.3 に測定孔角度 135° 、Fig.4 に測定孔角度 180° の結果とする。また、Fig.5 に各 Re 数における壁面への気泡の付着の状況を示す。

Fig.2 Influence of Microbubble on Pipe Friction Loss
(Manometer angle : 90°)

Fig.3 Influence of Microbubble on Pipe Friction Loss
(Manometer angle : 135°)

Fig.4 Influence of Microbubble on Pipe Friction Loss
(Manometer angle : 180°)

Fig.2, 3, 4 より, 水のみの実験値では Blasius の式に対して $\pm 1\%$ の範囲の値になっている。一方で MB を含ませた場合, Blasius の式より低い値をとっている。これより, MB を含ませると, 管摩擦損失が低減したことがわかる。その効果として, Fig.2 では, $4000 \leq Re \leq 10000$ の範囲で平均 8.0%, 最大 18.8% の低減効果が確認された。 $10000 < Re \leq 12000$ の範囲では, 平均 3.3%, 最大 4.8%, $12000 < Re \leq 35000$ では, 平均 4.9%, 最大 10.2% の低減効果となった。

同様に Fig.3 では, $4000 \leq Re \leq 10000$ の範囲で平均 7.1%, 最大 15.3%, $10000 < Re \leq 12000$ の範囲では, 平均 6.1%, 最大 9.6%, $12000 < Re \leq 35000$ では, 平均 4.8%, 最大 11.5% の低減効果が確認された。

Fig.4 では, $4000 \leq Re \leq 10000$ の範囲で平均 7.9%, 最大 16.6%, $10000 < Re \leq 12000$ の範囲では, 平均 6.2%, 最大 10.3%, $12000 < Re \leq 35000$ では, 平均 6.3%, 最大 11.5% の低減効果が確認された。

このような結果となったのは Fig.5 に示したように, 壁面への付着の影響が考えられる。 $4000 \leq Re \leq 10000$ では, 直径 $10 \sim 250 \mu\text{m}$ 程度と比較的微小な気泡の付着が観察されるため, 測定孔 90° でより多くの低減効果が得られた。これは, 壁面への気泡の付着は管上部に多く見られるからである。 $10000 < Re \leq 12000$ になると, 気泡の付着量は減少し直径 $10 \sim 400 \mu\text{m}$ 程度の気泡の付着が観察されるため, 他の Re 数の範囲より低減効果が小さくなる。測定孔 135° , 180° では, 気泡の付着の影響をあまり受けなため $10000 < Re \leq 12000$ の範囲で測定孔 90° と比較すると, 大きな低減効果となった。測定孔が下部になるにつれ低減効果が増大しているのは, $50 \mu\text{m}$ より大きな気泡径は管上部に多く存在し, $50 \mu\text{m}$ 以下の気泡径が多く存在していることが考えられる。

Fig.5 Visualization of attaching Microbubble

3.2 ボイド率変化と管摩擦の関係

Re 数を一定にさせ, ボイド率と管摩擦の関係を調べた結果を Fig.6 に示す。測定孔は 90° である。

Fig.6 Influence of void fraction on Pipe Friction Loss
(Manometer angle : 90°)

Fig.6 より, ボイド率の増加に伴い管摩擦損失低減効果が増加していることがわかる。 $Re=5000$ では, ボイド率 0.02% の時 2.7%, ボイド率 0.1% の時 8.1% の低減率となった。同様に $Re=10000$ では, ボイド率 0.02% の時 0.9%, ボイド率 0.1% の時 2.7% の低減率となった。 $Re=30000$ では, ボイド率 0.02% の時 1.7%, ボイド率 0.1% の時 5.2% の低減率となった。また, ボイド率 0.06% ~ 0.1% の範囲で $Re=10000$ が, 他の Re 数と比較すると低減率が小さくなっていることが確認できた。

4. 結言

MB を含ませると摩擦損失低減効果が生じることが分かった。 Re 数の変化にともない壁面への付着の状況は変化する。摩擦損失に影響を与える。ボイド率の増加とともに, 摩擦損失低減効果も大きくなることも確認できた。

参考文献

- (1) Madavan, N.K. et al., "Reduction of Turbulent Skin Friction by Microbubbles", Physics of Fluids, Vol.27, No.2 (1984) pp.356-363.
- (2) 児玉良明, 「船舶の摩擦低減デバイスとしてのマイクロバブルの可能性」, ニューズレター流れ(2003.1)
- (3) 関根聡, 「管摩擦に及ぼすマイクロバブルの影響～管壁面における気泡の状況と管摩擦の関係～」, 関東学生会第 51 回学生員卒業研究発表講演会(2012.3)
- (4) 後藤世至男, 「マイクロバブルを用いた油汚染土壌浄化と油分分離機構」, 混相流 20(1), (2006.3)