気泡の合体過程における液膜破断特性へのバルク液物性の影響

The effects of liquid properties on the rupture thickness of thin liquid film in bubble coalescence process

○ 諸隈 崇幸 (横浜国大) 小澤 亮之介 (横浜国大) 正 宇高 義郎 (横浜国大)

Takayuki Morokuma, Ryonosuke Ozawa and Yoshio Utaka

Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

This study aims to elucidate the break characteristics of liquid film formed between approaching bubbles in the process of bubble coalescence. The coalescence of horizontally contacting twin bubbles was experimentally studied in isothermal system. The bubbles were generated at the outlets of two pipes that face each other horizontally. Liquid film thickness formed between approaching bubbles were measured by the modified laser extinction method. The variation and the distribution of liquid film thickness between bubbles were investigated. The air flow rate, sample liquids and the measuring position of liquid film thickness were adopted as the experimental parameters.

Key Words: Bubble coalescence, Rupture of thin liquid film, Liquid film thickness, Laser extinction method

1. はじめに

気泡を含む熱流体現象に関する研究は従来数多くなされているが⁽¹⁻³⁾, 未解決の重要な課題に, 気泡の合体条件の解明がある. 我々はこれまで水中で水平方向に対向して空気泡を生成し, 衝突した際に形成される気泡間液膜厚さを, 気泡間液膜形成から合体までの液膜の厚さの分布および時間変化を測定することで気泡間液膜の特性を実験的に明らかにしてきた⁽⁴⁾. 本研究では, 様々な種類のバルク液中で気泡接近速度を変化させ, 気泡の合体過程における液膜破断に液体物性の及ぼす影響を検討するため, その特性を系統的に調べた. 特に, 液膜を形成している時間と合体直前の液膜厚さ分布および液膜厚さとの関係を実験的に明らかにすることを目的とする.

2. 実験装置および方法

図1に実験装置系を, 図2に試験部詳細を, 図3に実際の気泡接近時の写真(左)と気泡界面形状の模式図(右)を示す. 実験装置は諸隈・宇高⁽⁴⁾と同様のものを使用し, 様々な種類のバルク液中における気泡合体時の気泡間液膜の破断現象の調査を行った. 実験は室温, 大気圧下の等温系でおこない, 試験液体には純水, エタノール, トルエン, HFE7200を用いた. 実験パラメータは供給空気流量 Q ($8.3 - 500 \mu\text{L/s}$)とレーザー透過位置 ($-0.8 \leq x \leq 0.8 \text{ mm}$ および $0.8 \leq y \leq 0.8 \text{ mm}$)である. 使用する座標系はパイプの中心を原点として垂直方向を y , 水平方向を x とした. 気泡接近速度 u_0 は撮影された画像より, 気泡生成から接触までの平均値として気泡輪郭の水平方向の移動量を利用して画像処理によって計測した. また, 接触時間 t_c は気泡間液膜形成から合体に至るまでの時間, 接触長さ L は形成される液膜の長さとして定義し, 測定された映像データを元に計測した.

Fig.1 Experimental system

Fig.2 Details of test section

Fig.3 Photograph of bubble coalescence process (left) and a schematic for the bubble interface (right)

3. 実験結果および考察

気泡間液膜厚さ δ の算出には Lambert の法則を利用し, 参照光による補正を行い, 以下の式を用いて算出した.

$$\delta = (-1/A) \ln \{ (I/I_R) \times (I_{OR}/I_O) \} \quad (1)$$

消光係数 $A \text{ m}^{-1}$ は宇高・西川⁽⁵⁾の値を用いて δ の算出を行った. 測定精度として平均二乗誤差 s の 2 倍の値である $|2s|$ の値を用いて表すと, エタノール, 純水, トルエン, HFE7200 はそれぞれ $\pm 0.08 \mu\text{m}$, $\pm 0.12 \mu\text{m}$, $\pm 0.28 \mu\text{m}$, $\pm 0.44 \mu\text{m}$ の精度で液膜厚さを測定している.

諸隈・宇高⁽⁴⁾は, 気泡接触時間 t_c ごとに液膜破断時の液膜厚さ分布を表すことで気泡合体時の液膜特性を調べ, 合体直前の気泡間液膜の形状は t_c の値に依存して変化し, 気泡のバウンド現象の有無で 2 種類に大別することができる. この傾向はバルク液の種類によらず, t_c の値により依存して破断時の液膜形状は変化した. 図5にエタノール

ルにおける接触時間ごとの破断直前の液膜厚さ分布を示す。 t_c はそれぞれ 1.0, 2.4, 3.0, 6.6 ms であり、空気流量 $Q = 17, 33, 83, 170 \mu\text{L/s}$ に対応している。気泡の接触後ただちに合体が起こる(a)の場合、気泡間液膜中央部が最も薄くなっている。 t_c の増加に伴い液膜の薄い領域が増加し、液膜内部で最も薄くなる箇所が液膜の中央部から外側へと変化する(b)。さらに接触時間が増加した(c)(d)の場合、形成される液膜の大きさはさらに拡大されるが、液膜の薄い領域は外周部のみ現れ、液膜中央部では反発後にめが厚くなるため、リング状に薄い領域が形成されるようになる。 t_c の増加に伴い液膜中心から破断時最も薄くなる箇所までの距離は増加し、液膜外周部に向かっていくことから、液膜の持続時間である t_c によって破断時の液膜の特徴を表すことが可能であると考えられる。このような傾向は諸隈・宇高(4)において示した水の場合と類似しており、他の試料についても同様であった。

図6に破断時最小液膜厚さ $\delta_{\min}$ と接触時間の関係を示す。諸隈・宇高(4)の研究では水を試料として、流量範囲は 83-500 $\mu\text{L/s}$ で行われたが、気泡の接近速度の影響をより広範囲に調査するため、本研究では 8.3-83 $\mu\text{L/s}$ の微小流量域も実験を行った。なお、 Q が大きくなり交互発泡が発生し同期が取れなくなる閾値が試験液によって異なるため、実験範囲は試験液によって異なっている。純水においては、 $Q < 50 \mu\text{L/s}$ の範囲では気泡接近速度の減少に伴い t_c の値は減少し、 $\delta_{\min}$ は増加した。しかし、 $Q < 50 \mu\text{L/s}$ では異なる傾向を示し、気泡接近速度の減少に伴い $\delta_{\min}$ は増加するが、 t_c の値も増加するため、変曲点を持つようになる。これは、接近速度の減少により、撮影された画像の気泡接触時(液膜厚さ約 $20 \mu\text{m}$ 以下)から合体が起こりうる厚さに到達するまでの時間が延びたためであると考えられる。この特徴は4つの試験液体すべてに見られる。バルク液の種類によって同一の t_c における $\delta_{\min}$ は異なるものの、気泡接近速度が増加するに従い破断時の最小液膜厚さは減少する傾向があるといえる。しかし、エタノールの $t_c > 8 \text{ ms}$ では気泡の接近速度が増加しているにもかかわらず $\delta_{\min}$ の値も増加している。これは、気泡が衝突したときに液膜全体が大きくバウ

Fig.5 Distribution of liquid film thickness at $t_c = 1.0 \text{ ms}$ (a), 2.0 ms (b), 3.0 ms (c), 6.6 ms (d) just before coalescence for ethanol

Fig.6 Relations between minimum rupture thickness of liquid film and contact duration for various test liquids.

Table 1 Liquid properties.

Test liquid	Density $\rho [\text{kg/m}^3]$	Viscosity $\mu [\text{mPa} \cdot \text{s}]$	Kinematic viscosity $\nu \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$	Surface tension $\sigma [\text{mN/m}]$
Water	997.1	0.89	0.893	72.0
Ethanol	789.4	1.08	1.373	22.0
Toluene	866.9	0.59	0.681	28.4
HFE7200	1430	0.57	0.399	13.6

ンドし、再接近時に気泡の合体が起こるため、再接近時は気泡接近速度が小さくなり、破断時の最小液膜厚さも増加したものと考えられる。そのため、気泡の接近速度は破断時の最小液膜厚さに影響を与えていると考えられ、液膜の破断を表すうえで重要な因子であるといえる。また、バルク液によって同一の t_c における $\delta_{\min}$ は異なることから、液膜の破断厚さにはバルク液の物性が大きく影響をおよぼしていることがわかる。表1に試験液体の物性表を示す。気泡の合体過程において、気泡同士の接近の仕方、気泡の変形のしやすさ、液の排出のしやすさなど様々な要因が液膜の薄化に絡んでいる。なかでも破断時の最小液膜厚さは同一の t_c においてバルク液の動粘度が大きい程小さくなっている。そのため、液膜からバルク液中への排出が行われにくい液体ほど破断時の最小液膜厚さは薄くなる傾向がみられるが、今後の検討を要する。

4. 結論

参照光を用いてレーザー消光法による気泡衝突時の気泡間液膜厚さ変化の測定を高精度化し、気泡接触時間をパラメータとして気泡合体過程の気泡間液膜厚さ測定を行った。その結果、気泡合体時の気泡間液膜の特性に関して、以下の結論を得た。

- (1)参照光による補正法を適用することで、気泡間液膜をエタノール、純水、トルエン、HFE7200で $\pm 0.08 \mu\text{m}$, $\pm 0.12 \mu\text{m}$, $\pm 0.28 \mu\text{m}$, $\pm 0.44 \mu\text{m}$ の精度で測定することができた。
- (2)合体過程の気泡挙動と破断直前の液膜厚さおよびその分布形状は、液膜形成から破断までの液膜持続時間と良好な対応を示した。
- (3)液膜の持続時間の増加に伴い、合体直前の気泡間液膜の最薄領域は、液膜中央部からリング状に移行する。破断時の液膜厚さは試験液体に依存して大きく異なり $0.1\text{--}10 \mu\text{m}$ であった。また液体動粘度が高い程薄くなる傾向を示した。

参考文献 (1)Chesters A.K. et al, Scientific Research, vol.38 (1982), 353. (2)P.C. Duineveld, Ph.D.Thesis, Twente University (1994). (3)真田, 他 3 名, 機論(B 編), 70 -700 (2004), 3128. (4)諸隈, 宇高, 機論, 80 -811 (2014), tep0045. (5)宇高, 西川, 機論(B 編), 68-672(2002), 2285.