

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果 報告

噴墨印表頭氣液界面氣泡生成之研究

計畫類別：C 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89 - 2212 - E - 002 - 117 -

執行期間：89 年 08 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

計畫主持人：陳炳輝

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

中 華 民 國 90 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

計畫編號：NSC 89 - 2212 - E - 002 - 117 -

執行期限：89 年 08 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

主持人：陳炳輝 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：徐金城、鄭文峰 臺大機械系

一、摘要

本文旨在研究單微圓孔在非恆壓系統下，對液氣界面間氣泡成長機制的影響，使用高速攝影機紀錄氣泡成長過程，並記錄測試容器內外的壓差隨時間的變動情形。由實驗結果討論氣泡脫離體積與工作流體性質和孔口尺寸間的定量關係。本實驗使用純水以及重量百分比濃度 10% 的異丙醇水溶液為工作流體，孔口直徑為 60、90、126、210、580 及 1200 μm ，控制液體的抽出速度為 0.006、0.01、0.02、0.035、0.05 及 0.1 ml/sec 。針對此研究系統，發展出氣泡體積計算的關係式。

關鍵詞：非恆壓系統、液體抽出速度、氣泡成對、氣泡體積關係式

Abstract

This study aims to investigate the formation of air bubbles at a submerged single micro-hole under non-constant pressure condition. A high-speed video camera was used to visualize the process of bubble formation. The air pressure in the test chamber was recorded during each measurement. In the present experiment, pure water and 10% w.t. isopropanol solution were used as working fluids. The hole's diameters with 60, 90, 126, 210, 580 and 1200 μm were respectively used for bubble generation. The liquid was drained out of the test chamber at a constant rate of 0.006, 0.01,

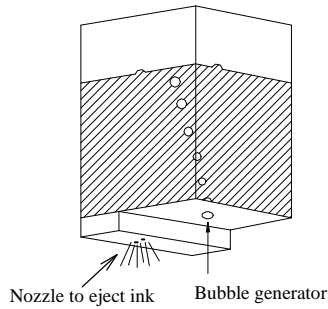
0.02, 0.035, 0.05, and 0.1 ml/sec respectively. A correlation has also been developed in the present study to obtain the relationship between a detached bubble volume, the physical properties of working fluids and the hole's diameter.

Keywords: non-constant pressure condition, liquid drained rates, bubble pairing, correlation

二、緣由與目的

對於氣泡因液氣界面間的壓差作用而成長的機制，在工業上有一相當特別的應用，即為噴墨印表機之墨水匣上稱之為氣泡產生器 (bubble generator) 的關鍵設計。

氣泡產生器 (如圖一所示) 應用在熱氣泡式的墨水匣上，其原理為印表機在運作過程之中，墨水匣內之墨水隨著墨水噴出而減少，因此墨水匣內的背壓 (backpressure) 逐漸升高，一旦背壓高於噴墨的工作壓力時，殘存的墨水便無法噴出，墨水匣的壽命也宣告結束。壓力產生器的作用便是利用氣泡的產生維持墨水匣內壓力，不至太高或太低，以確保噴墨品質。目前惠普 (HP) 對於其所發展的墨水匣上的氣泡產生器已有專利保護 (United States Patent, Patent NO.5, 526, 030)，而此氣泡產生器提供氣泡成長的間隙僅約 80 μm 左右。



圖一 氣泡產生器示意圖

一般氣泡產生器的工作僅是提供墨水匣內外的壓差維持於工作壓力區間，且要避免產生漏墨的問題。為減少墨水的大量蒸發，因此在設計上於氣泡產生器的後端連接了一彎延曲折的槽道，使之與外界空氣的距離拉長。由計算可知，墨水蒸發的速度與孔徑的四次方成正比，與槽道的長度則成反比，換句話說若將氣泡產生器的孔徑縮小，則可以將槽道的長度縮短，如此便可將氣泡產生器的設計簡單化，進而降低成本並減低因複雜設計可能衍生的種種問題。

因此本實驗將針對單圓孔成泡（模擬氣泡產生器），進行實驗研究並輔以流場觀測，所著重者為圓直孔口尺寸上的變化與壓力補充的關係之探討及研究，以瞭解氣泡因壓差所造成的成長及脫離之機制。

三、結果與討論

本節將對不同的實驗操作條件，討論壓力影響氣泡成長的情形。並藉實驗結果以預測作用在非恆壓系統（non-constant pressure condition）下氣泡脫離孔口板後的體積，以進一步瞭解孔口尺寸與測試容器內的空氣壓力變動（air pressure variation）的定量關係。

1. 實驗系統之測試條件

本實驗所使用的工作流體為純水及重量百分比濃度 10% 的異丙醇水溶液（10%

w.t. isopropanol solution）維持等速的液體抽出速度（ Q ），分別為：0.006 ml/s、0.01 ml/s、0.02 ml/s、0.035 ml/s、0.05 ml/s 及 0.1 ml/s，將測試容器內的工作流體抽出 10ml 後停止動作。氣泡產生孔尺寸（ D_h ）分別為 1200，580，210，126，90 及 60 μm 六種圓直孔口直徑。

2. 因次分析

將影響本實驗系統結果的獨立參數列出，根據白金漢 π 理論（Bulkingham Pi Theorem），選擇 MLT 為主要的因次分析系統，最後可得：

$$\frac{V_b}{D_h^3} = f\left(\frac{dP}{\rho g D_h}, \frac{\Delta \rho g D_h^2}{\rho g D_h}, \frac{\mu}{\rho g D_h}, \frac{l}{D_h}, \frac{v}{D_h}\right)$$

為簡化分析，僅定義前 3 個無因次參數，並由實驗結果進行分析討論。定義如下：

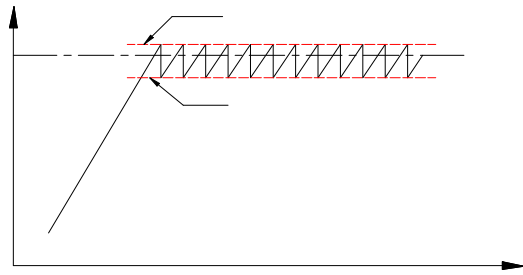
$$\bar{V}_b = \frac{V_b}{D_h^3}, \quad N_p = \frac{dP}{\rho g D_h}, \quad Bo = \frac{\Delta \rho g D_h^2}{\rho g D_h}$$

3. 實驗數據分析

針對本實驗的需求採用攝影術（cinematography）進行流場觀測，再利用影像分析的方式觀察並計算出氣泡脫離的體積，假設氣泡形狀沿著孔口中心線軸對稱。

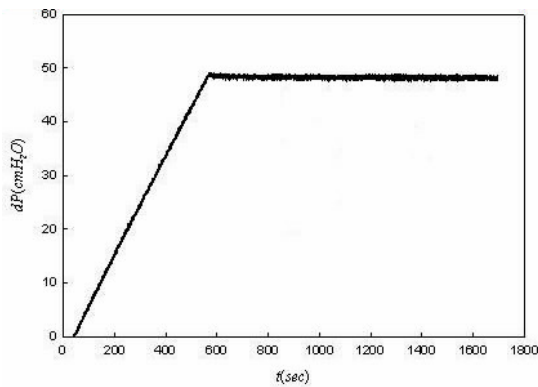
圖二為記錄器所擷取系統內外壓差隨時間變化的示意圖，其中縱軸的壓差 dP 定義為 $dP = P_{atm} - P_{air} - P_l = P_{atm} - P_{air} - \rho g H$ ， P_{atm} 為大氣壓力， P_{air} 為容器內的空氣壓力， P_l 為液體靜壓， H 為液面高度，從記錄圖中得知，隨著時間的增加因抽取液體的作用，造成容器內外的壓差持續地增加（即系統內的空氣壓力持續下降），一旦到達壓力補充的臨界值 $dP_{critical}$ （ $dP_{critical} = 4 \rho g D_h$ ）時，氣泡便開始產生成長乃至於脫離，在脫離氣泡上浮到液面破裂前的一瞬間即為容器內外所能維持的最大壓差 dP_{max} ；氣泡破裂後則壓差下降，

此舉意味著容器

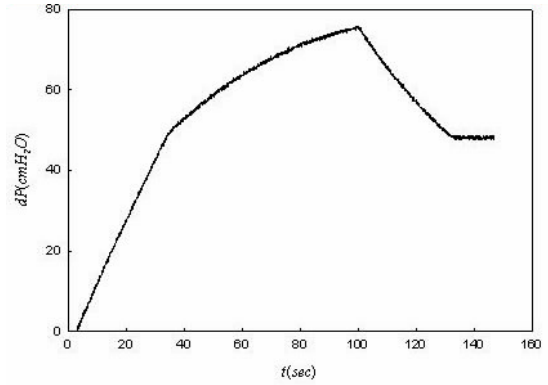


圖二 系統壓差變化說明圖

內的空氣壓力上升，至臨界壓差值以下 dP_{min} 的情況，一直到容器內外的壓差又大於臨界壓差值時，氣泡才又開始產生，氣泡成長因此呈現週期性啟動—停止直到液體停止抽出為止，實際情形如圖三 (a) 所示。但隨著液體抽出速度的增加，造成容器內外壓差急遽地提升，氣泡成長及脫離速度因此加快，以維持系統內外壓差始終低於臨界壓差值，甚至氣泡的成長連續不停，此現象尤其對於小孔口更為明顯，以補充系統在此快速抽液動作中造成的壓力下降。特別的是，一旦孔口的截面積過小，而液體抽出的速度較大時，將造成了壓力補充不及因抽出液體造成的壓力下降，便會有圖三 (b) 所示的情形發生，抽液的動作停止後，氣泡仍會繼續補充直到系統內的壓力低於臨界值時才停止。

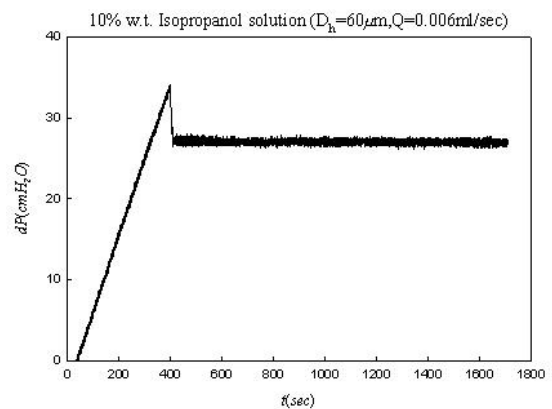


(a) $Q = 0.006 \text{ ml/sec}$, $D_h = 60 \mu\text{m}$



(b) $Q = 0.1 \text{ ml/sec}$, $D_h = 60 \mu\text{m}$

圖三 純水之壓差對時間變化記錄圖



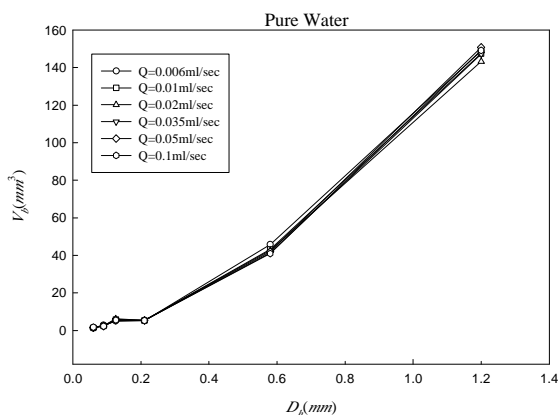
圖四 重量百分比 10% 的異丙醇水溶液之壓差對時間變化記錄圖

另外，從重量百分比濃度 10% 的異丙醇水溶液的實驗記錄圖中得知，每一組實驗氣泡第一次成長開始的時間較久，如圖四所示，也就是容器內維持的壓力高於臨界壓差值許多，但純水的各組實驗中卻無明顯的發生此種情況，針對此一現象我們再以純異丙醇 (isopropanol) 乙醇 (ethyl alcohol) 及重量百分比濃度 40% 的甘油水溶液 (40% w.t. glycerol solution) 進行相同的實驗，由實驗的壓差時間圖 ($dP-t$ 圖) 發現只有表面張力和純水相近的甘油水溶液沒有明顯的延遲成長的情況發生，但是甘油水溶液的黏滯性卻是純水的三倍之多，另外乙醇之黏滯性雖與純水相近，但表面張力卻為純水的 $1/4$ ，並由 $dP-t$ 圖可明顯的看到氣泡延遲成長的現象。由此

可知，在此實驗的操作範圍內(流體性質、孔口大小及抽液速度)，此延遲現象與流體黏滯性的關聯度不高，主要是因表面張力的作用。

4.孔口尺寸的影響

圖五為工作流體為純水時，氣泡體積與孔口直徑間的關係圖，明顯地從圖中得知，隨著孔口直徑的增加，氣泡的體積也隨之增大，因為此時氣泡的體積大小完全取決於孔口的截面積，此實驗結果與 Wilkinson 於 1993 年針對水 - 空氣於低氣體流率下所得到之結果相同。另外，氣泡內外所能維持的平衡壓差值為 $2/r_0$ ，因此在控制表面張力不變的情況下，隨著孔口半徑的增加，所能維持的壓差將愈小。

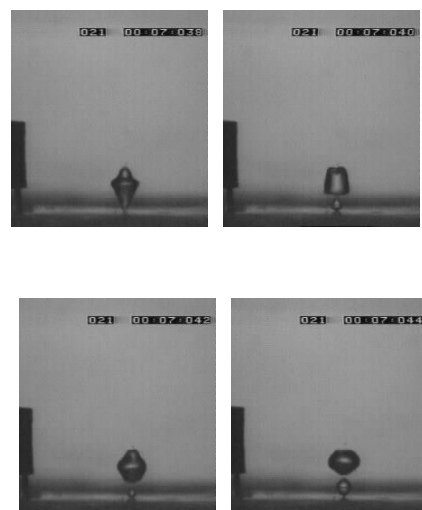


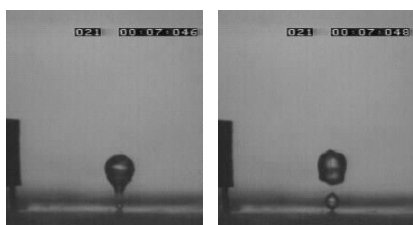
圖五 不同抽液速度下孔口直徑對氣泡脫離體積的關係圖

5.液體抽出速度的影響

在較低的液體抽出速度，造成壓差在 $dP - t$ 圖上升的趨勢較緩，導致氣體進入孔口的流速較低之情況下，氣泡成長的過程主要是由流體的表面張力及氣體的浮力所主導，因此氣泡的成長情形相當地單純；但若操作於高液體抽出速度下，會使得容器內外壓差急遽地升高，而造成氣體進入孔口之流速增加，此時氣泡的成長過程還要再考慮氣體動量以及液體黏性等效應，根據 Tsuchiya 和 Fan (1998) 以其數值模擬的結果發現，在壓力操作範圍介於

0~15MPa 之間的高壓系統 (實驗流體為 Paratherm NF heat transfer fluid - Nitrogen) 下氣體動量對氣泡體積的影響比流體的表面張力影響還要大，在此種情形下會造成氣泡提早脫離，使得氣泡的體積變小。從實驗結果發現，異丙醇溶液在孔口直徑為 60 μm 及 90 μm 時，抽液速度大於 0.035 ml/sec 之後即會有因氣體動量效應使氣泡體積變小的情況發生，而此時氣泡的成長呈連續式的成長，但就其他的孔徑來說此情況並不明顯，原因是孔口直徑大於 90 μm 時，孔口尺寸與抽液速度間因氣體動量效應造成氣體加速的效應並不明顯，不致於使氣泡提早脫離，故氣泡在不同的抽液速度下體積始終維持於幾乎相同大小。至於純水的各組實驗結果部分，也沒有此明顯的情況發生，主要原因為純水之表面張力較大，甚至在抽液速度達到 0.1 ml/sec 時，表面張力的影響仍較氣體動量效應顯著；比較特別的地方是，對純水而言，在孔口直徑為 126 μm 時，任何抽液速度所產生之氣泡體積與孔口尺寸為 210 μm 時，任何抽液速度所產生之氣泡體積尺寸差異不大，原因是氣泡成長過程產生對 (pairing) 現象 (如圖六所示) (McCann 和 Prince, 1971)，此一現象因此使得氣泡的體積增加。





圖六 純水於 $D_h=126 \sim m$ 及 $Q=0.01 \text{ ml/sec}$ 下氣泡產生成對之現象

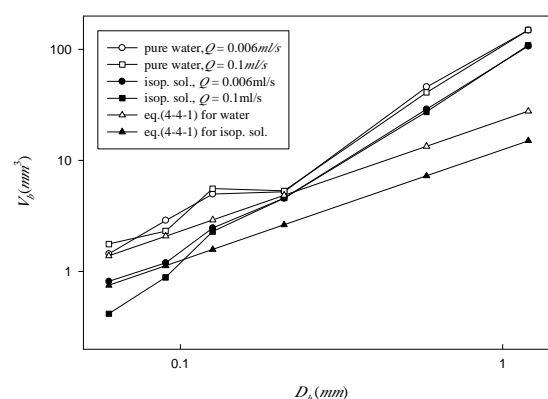
就本實驗所控制的條件而言，純水在 $126 \sim m$ 的孔口尺寸，抽液速度控制於 $0.006 \text{ ml/sec} \sim 0.1 \text{ ml/sec}$ 的範圍之間，測試容器尺寸與此實驗相當時，氣泡成長會產生成對 (pairing) 的現象，但並非表示其他的孔口時不會有此種現象的發生，只是成對現象不如 $126 \sim m$ 時產生的如此顯著。

針對低氣體流速，即由表面張力及氣體浮力所主導的氣泡成長過程，可由下列的式子來計算此時氣泡的脫離體積 (Blanchard and Syzdek, 1977)。

$$d_b = \left[\frac{6D_h \dot{V}}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

根據(1)式的計算結果以及實驗數據相互比對，如圖七所示，從圖中發現純水在孔口為 $90 \sim m$ 以下時，實驗量測值與計算結果相當符合，但在孔口為 $90 \sim m$ 以上時，因孔口的直徑變大，此時則必須要再考慮液體黏滯阻力以及慣性力等其它力量的影響，而(1)式僅針對低氣體流速的情況，故預估值會比實際的實驗值小了許多。而重量百分比濃度 10% 的異丙醇水溶液大致上的趨勢和純水相近，預估值與實驗值的差距在孔口直徑大於 $90 \sim m$ 之後即開始產生。另外，重量百分比濃度 10% 的異丙醇水溶液在孔口直徑小於 $90 \sim m$ 及液體抽出速度 0.1 ml/sec 時則產生了實驗值小於預估值的情況發生，此即為氣體動量效應造成氣泡較早脫離而使氣泡體積變小

的實例。



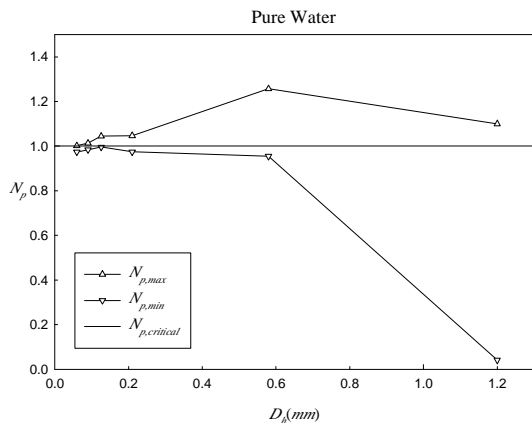
圖七 實驗值與(1)式計算預估值之比對 6.流體性質的影響

本實驗所使用的為兩密度及黏滯性近似的工作流體 (純水、重量百分比濃度 10% 的異丙醇水溶液)，其黏滯性均相當地低，著重的是表面張力的效應，因此我們選擇了此表面張力差距相當大的兩工作流體進行實驗。如圖七得知，隨著表面張力的增加氣泡的體積也隨之提升，此一結果與 Kumar 等人 (1969) 同樣針對純水及重量百分比濃度 10% 的異丙醇溶液進行實驗的結果相同。

7.孔口尺寸與系統壓差變化

從圖八中可以明顯得知於各孔口尺寸下氣泡成長脫離的時機 $N_{p,max}$ 均大於 1，而氣泡破裂產生壓力補充的時機 $N_{p,min}$ 則均小於 1，此實際的實驗結果完全符合物理現象的描述，我們雖無確切提供氣泡破裂之後能夠補充多少的壓力，但能夠確定的是氣泡開始成長的機制必須為 $N_p > 1$ 時，而氣泡破裂後必定會使得 $N_p < 1$ 。另外一樣可以從圖中發現，隨著孔口直徑的增加會使得壓力的補充量有提升的趨勢，很明顯的孔口直徑愈大其產生的氣泡體積也愈大，自然每一顆氣泡所能夠補充的壓力也較多，但至孔口為 $210 \sim m$ 以下時，此一狀況並不明顯，原因在於在大孔徑時 ($D_h > 210 \sim m$) 每一次循環週期僅需提供一顆

氣泡，就可以使得系統內外壓差值達到臨界壓差值之下，而此時每一顆氣泡壓力的補充值可能會使得 N_p 遠小於 1；而於小孔徑的情況下 ($D_h \leq 210 \sim m$)，每一次循環週期則必需提供好幾顆氣泡才會使得系統內外壓差值達到臨界壓差值之下，因此在每一顆氣泡所能夠提供較少的壓力前提下，不需提供過度的壓力，僅需產生足夠的氣泡數量來使得 $N_p > 1$ 即可，故在此情況下 $N_{p,min}$ 會愈接近於 1，因此壓力的補充量自然會比大孔徑少了許多，而此現象可以明顯從不同孔徑的壓差-時間圖 ($dP-t$) 中記錄曲線不同的振幅可得知。



圖八 無因次壓差對不同孔口直徑下之關係圖

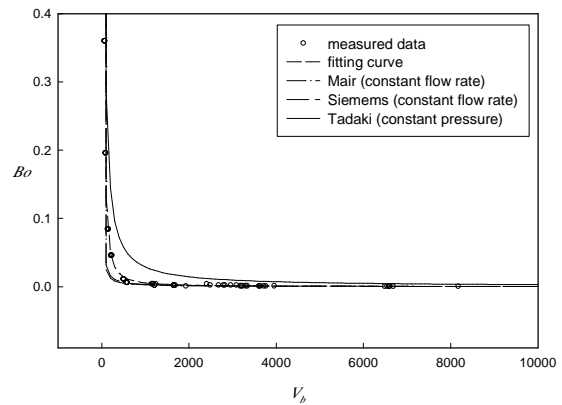
8. 氣泡體積及系統壓力因次分析

將實驗所獲得的結果代入第三章所定義之無因次參數 N_p 、 \bar{V}_b 及 Bo 中以曲線逼近 (curve fitting) 的方式來獲得氣泡體積與孔口尺寸與流體性質間的定量關係，如圖九所示。 N_p 所代表的意義為與記錄壓差值 dP 與臨界壓差值 $dP_{critical}$ 間的比值，唯有在 $N_p > 1$ 時氣泡才會開始成長，而 $N_p = 1.38$ 則為根據實驗統計結果所獲得容器內的最大壓差值， \bar{V}_b 則是氣泡體積與孔口尺寸三次方的比值，而 Bo 則為氣體浮力與流體表面張力的比值。根據曲線逼近的結果，最後可以得到以下之經驗式。

$$1 < N_p < 1.38 :$$

$$\bar{V}_b^{1.38} Bo = 77$$

由圖九可知，本實驗結果落於等流量與等壓力系統間，即為中介區 (intermediate condition) 但較近似於等流量系統，原因為當孔口如此微小 (微米尺度) 時，孔口的長度直徑比 (length-to-diameter ratio) 因此變大，氣泡成長因此進入等流量區 (constant flow condition) (Terasaka and Tsuge, 1993)。圖九中所使用的氣泡體積預測經驗式係參考 Tsuge 及 Hibino (1978) 的文獻而得。



圖九 本實驗結果的 fitting curve

另外，本實驗抽液的動作在抽出 10 ml 的工作流體後動作即停止，造成原實驗容器內 3.5 cm 的液面下降約 1 cm 左右，根據 Hayes 等人 (1959) 的說法，在液面高度大於二倍的氣泡直徑時 ($H > 2D_b$)，氣泡的成長與液面高度的變化關係是獨立的。本實驗所操作的液面高度大於二倍的氣泡直徑，因此液面的變化應不會影響氣泡的成長過程。

四、計畫結果自評

由實驗結果得知，測試容器內的壓差變動量及變動頻率與脫離氣泡體積有關，此研究因此對工業應用具有價值，因壓力的變動量或變動頻率常會影響此種系統的表現，需要準確的控制壓力，系統的表現

才能合乎需求。

本文僅對圓孔進行測試，遺憾的是未對非圓孔進行實驗，如此才更能滿足工業應用的需求，因為成泡在工業應用上不一定非在圓孔發生。

五、參考文獻

- Blanchard, D. C., Syzdek, L. D., "Production of air bubbles of a specified size," *Chem. Eng. Sci.*, **32**, 1109-1112 (1977).
- Davidson, J. F., and Schüler, B. O. G., "Bubble formation at an orifice in viscous liquid," *Tran. Inst. Chem. Engrs.*, **38**, 144-154 (1960a).
- Davidson, J. F., and Schüler, B. O. G., "Bubble formation at an orifice in an inviscid liquid," *Tran. Inst. Chem. Engrs.*, **38**, 335-342 (1960b).
- Fox, R. W., and McDonald, A. T., "Introduction to fluid mechanics," 4th ed., New York: Wiley, 271-273 (1994).
- Hayes, W. B., Hardy, B. W., and Holland, C. D., "Formation of gas bubbles at submerged orifices," *AIChE J.*, **5**, 319 (1959).
- Lide, D. R., "Handbook of chemistry and physics 75th," Boca Raton: CRC press, 6144-6198 (1995).
- McCann, D. J., and Prince R. G. H., "Regimes of bubbling at a submerged orifice," *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 1505-1512 (1971).
- Ramakrishnan, S., Kumar, R., and Kuloor, N. R., "Studies in bubble formation - I Bubble formation under constant flow conditions," *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 731-747 (1969).
- Satyanarayan, A., Kumar, R., and Kuloor, N. R., "Studies in bubble formation - II Bubble formation under constant pressure conditions," *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 749-761 (1969).
- Terasaka, K., and Tsuge, H., "Bubble formation under constant-flow conditions," *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 3417-3422 (1993).
- Tsuchiya, T. J., and Fan, L. S., "Bubble flow characteristics in bubble columns elevated pressure and temperature," *AIChE J.*, **44**, 545-560 (1998).
- Tsuge, H., and Hibino, S., "Bubble formation from a submerged single orifice accompanied by pressure fluctuations in gas chamber," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **11**, 173-178 (1978).
- Wilkinson, P. M., "A theoretical model for the influence of gas properties and pressure on single-bubble formation at an orifice," *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 1429-1438 (1994).
- 鄭文峰，微單孔氣泡成核流場觀測及壓力量測，國立台灣大學碩士論文，民國九十年七月