

國立臺灣大學工學院應用力學研究所

碩士論文

Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



液滴撞擊有邊界液面所產生大氣泡之研究

Investigation of large bubble entrapment by drop impact
onto liquid surface with restricted wall

簡碩廷

Jain, Shuo-Ting

指導教授：王安邦 博士

Advisor: Wang, An-Bang, Ph.D.

中華民國 103 年 10 月

October, 2014

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

液滴撞擊有邊界液面所產生大氣泡之研究

Investigation of large bubble entrapment by drop
impact onto liquid surface with restricted wall

本論文係簡碩廷君（學號：R00543071）在國立臺灣大學應用力學研究所完成之碩士學位論文，於民國 103 年 10 月 3 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

王安邦 王安邦
(指導教授)

李 雨 李 雨

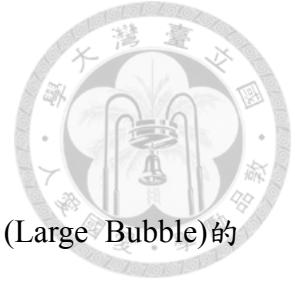
趙修武 趙修武

廖英志 廖英志

所 長

張家歐 張家歐

中文摘要



本研究探討液滴撞擊在有邊界限制下的水面，大氣泡型態(Large Bubble)的形成與發展此邊界限制指的是液滴滴入深液時，其撞擊點周圍在動量傳遞的過程有無法忽略之環型壁面限制，透過找出有/無邊界限制下水窪發展的不同特性差異，嘗試找出影響大氣泡型態生成機制的關鍵參數。

本文的第一部分首先將水窪上半部分(頸部產生區)加上固定的邊界限制，比較此條件下生成的大氣泡與無邊界狀態者所對應的液滴振盪形狀參數和發生速度範圍之關係，由此得知大氣泡生成所對應液滴撞擊速度範圍確有明顯的差異，而在不同撞擊速度下，所產生的水窪尺寸與氣泡大小也不一樣。第二部分則將限制環的位置從包圍限制水窪的上半部分一直持續降至其下半部分(底部擴張區)，甚至將限制環上緣完全浸沒於水平面下，藉此歸納出不同限制邊界位置的，對於大氣泡產生的助益程度影響。本文將有邊界限制下大氣泡產生的速度範圍大於無邊界狀態者，稱為建設區，反之稱為謂破壞區；在不同的相對位置會形成三大特性區域：建設區、顯著建設區和破壞區。在本文第三部分所進行的定量分析，則對有/無邊界限制下的大氣泡生成差異性及三大特性區域的成因提出可能的物理解釋。

最後，本文發現限制環上緣深度為零的深度值，可產生最大的氣泡產生範圍，且打破過往間大氣泡間斷式分布的生成規則：可以連續式的生成。而在限制環長度的效應中可發現 $l/d \approx 2$ 以後，所產生的大氣泡增益效果以似乎最大。而以時間尺度來看，產生大氣泡過程，水窪頸縮的時間水平時間尺度所占水窪向下發展的時間(垂直時間尺度)的比例會隨著速度的增加而縮小(從 50%縮至 20%)。

關鍵字:限制環、頸部產生區、底部擴張區、上緣深度、建設區、顯著建設區、破壞區、液滴形狀參數

Abstract



The study focused on the investigation of large bubble entrainment induced by a drop impacting upon the bounded liquid surface. We used a ring-shaped wall as the restricted boundary of the target liquid in which the impact point the drop touch down is in the center. Comparing the cavity development for bounded liquid surface with that for free surface, the key parameters of large bubble entrainment can be revealed.

First of all, the ring-shaped wall was set at the position with respect to the upper part of cavity. The occurrence range of large bubble entrainment can be varied with the phases of drop shape and the target liquids with / without being bounded. In addition, the size of the bubbles can be also different with various impact velocities. Secondly, the ring-shaped wall has been vertically moved along the impact line to affect the development of cavity. It has been found that there are major differences of cavity evolution between the cases by utilizing different positions, lengths, and inner diameters of the ring-shaped wall. Three main effects of rings have been found, “constructive influence”, ”significant constructive influence” as well as “destructive influence”, respectively. Thirdly, in order to gain the insight into the generation mechanism of large bubble entrainment, we used high-speed camera to capture the cavity profiles and to analyze the data quantitatively with the techniques of image processing.

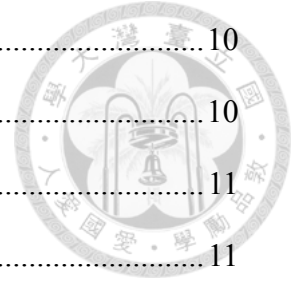
Consequently, we have determined an optimal position and geometry of the ring-shaped wall, exploring the occurrence distribution of large bubble is incredibly large and ever continuous instead of discontinuous as previously thought. It has been concluded that effects of wall at certain positions could be beneficial to large bubble formation and reduce the requirement of specific drop shapes.

Keywords: restriction ring, neck, lower cavity, constructive influence, significant constructive influence, destructive influence, droplet shape parameter

目 錄

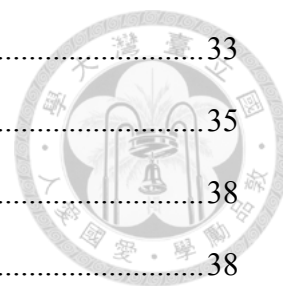


中文摘要	i
Abstract	ii
目 錄	iii
圖目錄.....	vi
表目錄.....	xii
符號說明.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 文獻回顧.....	1
1.3 研究動機.....	4
第二章 實驗設備與架設.....	5
2.1 實驗條件.....	5
2.2 液滴產生系統.....	5
2.2.1 液滴滴頭裝置.....	5
2.2.2 液滴粒徑與產生週期.....	6
2.2.3 升降設備.....	6
2.2.4 水槽裝置.....	7
2.2.5 液滴與目標水池恆溫架設.....	7
2.3 限制環調整系統.....	8
2.3.1 夾置具微調裝置.....	9
2.3.2 限制環幾何參數.....	9
2.3.3 限制環水平及中心度校正架設.....	9



2.4 影像處理系統.....	10
2.4.1 高速攝影機.....	10
2.4.2 觸發設備.....	11
2.4.3 燈光及拍攝方法.....	11
2.4.4 影像數位化架設.....	11
2.5 聲音擷取系統.....	12
2.5.1 水下麥克風與電荷放大器.....	12
2.5.2 示波器.....	13
2.5.3 聲壓訊號與高速攝影機同步探討.....	13
2.5.4 確認聲壓擷取系統可判定正確斷裂時間.....	15
第三章 實驗重複性之影響參數探討.....	16
3.1 實驗控制與特徵參數.....	16
3.2 無/有限制環下大氣泡形成分布	17
3.2.1 液滴振盪形狀參數比較.....	19
3.2.2 液滴撞擊速度的關係比較.....	21
3.3 大氣泡產生寬幅的探討.....	22
3.3.1 液滴產生週期與大氣泡範圍位置的關係.....	22
3.3.2 液滴產生週期與大氣泡產生區域寬幅的關係.....	24
3.3.3 溫差對大氣泡產生區域寬幅的影響.....	25
第四章 限制環幾何外形與位置影響之實驗結果與討論.....	26
4.1 水漥動態發展與聲壓特徵點的關係.....	26
4.1.1 無限制環下大氣泡水漥發展.....	26
4.1.2 大氣泡斷裂時間比較.....	29
4.2 限制環位置與長度對大氣泡型態影響探討.....	30
4.2.1 限制環不同位置之影響.....	31

4.2.2 有限制環下水平液面抬升的影響.....	33
4.2.3 不同速度區段下之建設程度.....	35
4.3 水滲定量分析與邊界限制下產生建設/破壞成因	38
4.3.1 建設區與顯著建設區成因.....	38
4.3.2 破壞區成因.....	40
4.3.3 限制環環長的影響.....	41
4.3.4 限制環環寬的影響.....	42
4.3.5 回縮時間的比較.....	44
第五章 結論.....	45
圖.....	48
表.....	117
參考文獻.....	119



圖目錄



圖 1.2-1 液滴撞擊型態 V-d 圖[10].....	48
圖 1.2-2 不同液滴粒徑與撞擊速度的撞擊型態圖[25].....	48
圖 1.2-3 Zou et al.(2012)對有邊界限制下大氣泡(Large bubble)的實驗架設圖[19]	48
圖 1.2-4 邊界限制下大氣泡 We 對 D_t^* 實驗結果圖[19]	49
圖 1.3-1 限制頸部產生區邊界與限制底部擴張區邊界示意圖	49
圖 2-1 實驗架設圖	49
圖 2.2.2-1 無衛星液滴產生之影像	50
圖 2.2.4-1 水槽裝置與調整水平液面槽示意圖	50
圖 2.2.5-1 滴恆溫架設(a)液滴溫度量測實體圖(b)自製加溫器(c)液滴滴頭與加溫 器組合圖.....	50
圖 2.3.1-1 夾置具微調裝置	51
圖 2.3.3-1 限制環水平度調整示意圖	51
圖 2.3.3-2 限制環中心線調整實驗圖	51
圖 2.4.4-1 撞擊產生水中大氣泡型態的水窪數位化過程[25]	52
圖 2.5-1 聲音擷取系統圖	52
圖 2.5.1-1 B&K 8104 水下麥克風傳聲指向性(麥可風頭指向方向為負 Z 方向) ..	52
圖 2.5.1-2 水下麥克風與液滴撞擊點相對位置圖	53
圖 2.5.3-1 整體同步裝置可能產生延遲的來源	53
圖 2.5.3-2 觸發訊號至示波器與高速攝影機為同步訊號	53
圖 2.5.3-3 直徑 10 mm 小鋼球，高度 45mm，(a)撞擊至深液的聲壓與影像對應圖 (b)撞擊點影像隨時間推演關係圖	54
圖 2.5.3-4 不同拍攝速度(frame rate)下的判定影像的時間誤差	54

圖 2.5.4-1 各種液滴粒徑規則型態氣泡斷裂時間[10].....	55
圖 2.5.4-2 $d = 2.48 \text{ mm}$ 規則型態氣泡斷裂時間與 Pumphrey & Elmore (1990)比較	55
圖 3.1-1 實驗控制參數示意圖	55
圖 3.1-2 液滴撞擊至邊界限制比較示意圖	56
圖 3.1-3 液滴撞擊產生大氣泡之時序圖($d = 5.65\text{mm}$, $V = 0.92\text{m/s}$).....	56
圖 3.2-1 振盪模態為二階($n=2$)的液滴振盪行為模擬[24].....	56
圖 3.2-2 以液滴直徑 5.28mm 觀察液滴形狀參數對應大氣泡發生位置[25]	57
圖 3.2-3 液滴形狀參數示意圖	57
圖 3.2-4 液滴形狀參數(O_i 及 e)與水面上型態相對液滴撞擊時間的變化圖	57
圖 3.2-5 不同 D_i^* 泡於液滴形狀參數(e)的發生分布圖[19].....	58
圖 3.2.1-1 液滴形狀參數 e ，釋放高度(H)與大氣泡發生在有無限制環之關係圖	58
圖 3.2.1-2 液滴形狀參數 O_i ，釋放高度(H)與大氣泡發生在有無限制環之關係圖	58
圖 3.2.1-3 液滴釋放高度可產生大氣泡區域在有無限制環與液滴振盪週期之關係	59
圖 3.2.2- 1 液滴振盪參數 O_i 於第二週期(p_2)有無限制環產生大氣泡速度比較圖	59
圖 3.2.2-2 液滴振盪參數 O_i 於第三週期(p_3)有無限制環產生大氣泡速度比較圖	59
圖 3.2.2-3 液滴振盪參數 O_i 於第四週期(p_4)有無限制環產生大氣泡速度比較圖	60
圖 3.2.2-4 $O_i_{p_2}$ 有無限制環大氣泡產生區域寬幅比較圖.....	60
圖 3.2.2-5 $O_i_{p_3}$ 有無限制環大氣泡產生區域寬幅比較圖.....	60
圖 3.3-1 沒有限制環的條件下，大氣泡形成機率與液滴產生時間的關係	61

圖 3.3.1-1 不同的液滴產生時間之機率變化與其液滴的初始速度關係圖	61
圖 3.3.1-2 不同的液滴產生時間與液滴尺寸參數之關係	61
圖 3.3.1-3 不同次實驗的平均液滴粒徑與液滴產生時間的關係圖	62
圖 3.3.1-4 不同液滴產生時間下液滴形狀參數 O_i 與釋放高度關係圖	62
圖 3.3.1-5 不同液滴產生時間下液滴形狀參數 O_i 振盪擬合曲線	63
圖 3.3.2-1 不同的液滴產生時間所造成的大氣泡產生區域寬幅的變化	63
圖 3.3.2-2 不同液滴產生時間與平均大氣泡寬幅的關係圖	64
圖 3.3.3-1 不同溫差下大氣泡區域寬幅關係圖	64
圖 4.1.1-1 O_{i_p2} , $V = 0.918$ m/s 大氣泡水上與水下合併之時序圖	65
圖 4.1.1-2 O_{i_p3} , $V = 1.338$ m/s 大氣泡水上與水下合併之時序圖	65
圖 4.1.1-3 O_{i_p4} , $V = 1.760$ m/s 大氣泡水上與水下合併之時序圖	66
圖 4.1.1-4 O_{i_p2} 大氣泡水漥深度(D_c)與時間的關係圖	66
圖 4.1.1-5 O_{i_p2} 大氣泡水漥頸部寬度(W_n)與頸部深度(D_n)關係圖	67
圖 4.1.1-6 O_{i_p2} 底部擴張區水漥最大寬度(W_{lc})與時間的關係圖	67
圖 4.1.1-7 O_{i_p2} 底部擴張區水漥最大深度(D_{lc})與時間的關係圖	67
圖 4.1.1-8 O_{i_p2} 大氣泡水漥最大寬度(W_{lc})與最大寬度的深度(D_{lc})關係圖	68
圖 4.1.1-9 $V = 0.908$ m/s, O_{i_p2} 之大氣泡時序圖	68
圖 4.1.1-10 將 $d = 5.65$ mm 所形成的大氣泡畫於 V-d 圖上	69
圖 4.1.1-11 O_{i_p3} 大氣泡水漥最大寬度(W_{lc})與最大寬度的深度(D_{lc})關係圖	69
圖 4.1.1-12 O_{i_p4} 大氣泡水漥最大寬度(W_{lc})與最大寬度的深度(D_{lc})關係圖	70
圖 4.1.2-1 不同 O_i 週期下限制環下緣深度與大氣泡斷裂時間和發生速度關係圖	70
圖 4.1.2-2 液滴形狀參數 O_i 第二至第四週期有無限制環大氣泡斷裂時間比較圖	70

圖 4.2.1-1 Oi_p3, Ring B, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	76
圖 4.2.1-2 Ring A, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	81
圖 4.2.1-3 Ring C, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	84
圖 4.2.1-4 Ring E, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	87
圖 4.2.1-5 Ring F, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	90
圖 4.2.1-6 統整不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成大氣泡高度上下邊界.....	91
圖 4.2.1-7 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成大氣泡寬幅中心(H_c)位置關係圖	91
圖 4.2.1-8 不同限制環下緣深度(h_b)與其可造成大氣泡寬幅(HB)關係圖.....	91
圖 4.2.1-9 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成 Oi_p3 大氣泡寬幅(HB)關係圖..	92
圖 4.2.1-10 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成大氣泡寬幅增益(ΔHB)關係圖.	92
圖 4.2.1-11 限制環上緣深度(h_t)劃分三大區塊：建設區、顯著建設區和破壞區.	92
圖 4.2.1-12 不同限制環上緣深度(h_t)與大氣泡的斷裂時間關係圖.....	93
圖 4.2.2-1 以大氣泡形成過程手繪時序圖，來表示其形成過程液面抬升狀況....	93
圖 4.2.2-2 抬升高度(h_r)兩種不同的計算方式示意圖.....	94
圖 4.2.2-3 同一速度下，不同上緣深度所形成的液面抬升(h_r)高度與時間關係圖.....	94
圖 4.2.2-4 不同的上緣深度(h_t)於大氣泡斷裂時間點(t_p)，液面抬升高度(h_r)關係	94
圖 4.2.2-5 不同的上緣深度(h_t)於 P 點液面抬升高度增益($\Delta h_{r,tp}$).....	95
圖 4.2.2-6 顯著建設區與建設區的劃分與抬升高度之關係.....	95

圖 4.2.3-1 O_i _p2, Ring B, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	100
圖 4.2.3-2 O_i _p4, Ring B, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖.....	105
圖 4.2.3-3 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成 O_i _p2 大氣泡寬幅(HB)關係圖.	105
圖 4.2.3-4 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成 O_i _p4 大氣泡寬幅(HB)關係圖.	106
圖 4.2.3-5 不同 O_i _period 所造成大氣泡寬幅增益(Δ HB)關係圖	106
圖 4.3.1-1 於 O_i _p3 不同上緣深度下, 所造成於斷裂時間的水窪外型比較圖 ..	108
圖 4.3.1-2 於 O_i _p3 不同上緣深度下, 所造成於斷裂時間的水窪外型比較圖 ..	110
圖 4.3.1-3 於 O_i _p4 不同上緣深度下, 所造成於斷裂時間的水窪外型比較圖 ..	112
圖 4.3.2-1 $V = 1.323$ m/s 下, 比較有限制環置於 $h_t = -2$ mm 與無限制環水窪發展	112
圖 4.3.2-2 利用無因次參數 $D_c / W_{c,l}$ 來顯現不同限制環所產生的破壞程度圖 ...	112
圖 4.3.3-1 不同限制環環長於 $h_t = 0$ mm, 所造成大氣泡寬幅增益.....	113
圖 4.3.3-2 由液滴形狀參數 O_i 來看 RA 於 $h_t = 0$ 所形成的大氣泡於振盪曲線分佈	113
圖 4.3.3-3 不同限制環環長於 $h_t = 0$ mm, 所造成液面最大抬升高度.....	113
圖 4.3.3-4 限制環位置置於上緣深度為零處, 將不同無因次限制環環長做比較	114
圖 4.3.4-1 不同的 D_i^* 下所產生大氣泡實驗點分佈於形狀參數 O_i 振盪曲線上 ...	115
圖 4.3.4-2 將限制環位置置於上緣深度為零處, 所產生大氣泡之範圍與 Zou et al.(2012) [19]比較	115
圖 4.3.4-3 將限制環位置置於上緣深度為零處, 所形成大氣泡分佈於型態地圖	115
圖 4.3.5-1 沒有限制環下有/無大氣泡之回縮時間比較.....	116

圖 4.3.5-2 大氣泡水窪發展頸縮時間與水窪向下發展時間之比例	116
圖 4.3.5-3 液滴粒徑不同所造成斷裂時間之比較	116



表目錄



表 2.3.2-1 各種不同幾何尺寸限制環參數表	117
表 2.5.1-1 水下麥克風中心至撞擊點距離(S)測試	117
表 2.5.3-1 聲壓訊號延遲時間分析	117
表 3.2.1-1 液滴粒徑 5.65mm 限制環相對初始頸部深度(D_{ni})對應關係	118
表 3.2.2-1 綜合三次以上之限制環下緣深度於初始頸部深度實驗結果	118

符號說明



a :	液滴最長橫軸的半徑 (mm)
b :	液滴最長縱軸的半徑 (mm)
b_1 :	液滴最長橫軸相對於最低點的垂直距離 (mm)
d :	液滴粒徑 (mm)
D_c :	水窪最底緣深度 (mm)
$D_{c,tp}$:	於 P 點時刻，水窪最底緣深度 (mm)
$D_{c,tp}^*$:	有限制環下，考慮液面抬升水窪最底緣深度 (mm)
D_i :	限制環內直徑 (mm)
D_{lc} :	最大寬度的深度 (mm)
$D_{lc,tp}$:	於 P 點時刻，水窪最大寬度的深度 (mm)
$D_{lc,tp}^*$:	有限制環下，考慮液面抬升水窪最大寬度的深度 (mm)
D_n :	水窪頸部深度 (mm)
D_{ni} :	初始頸部深度 (mm)
D_o :	限制環外直徑 (mm)
D_i^* :	無因次環型內徑 = D_i / d
e :	液滴形狀參數 (b/a)
HB :	大氣泡產生區域寬幅 (mm)
HB _{w/o} :	基本寬幅 (mm)
H_b :	產生大氣泡寬幅底部位置點 (mm)
H_c :	產生大氣泡寬幅中心位置點 (mm)
H_t :	產生大氣泡寬幅頂部位置點 (mm)
Im :	聲壓圖上聲壓開始上升的起始點
H :	液滴釋放高度 (mm)
h_b :	下緣深度 (mm)
h_r :	液面抬升高度 (mm)
$h_{r,tp}$:	於 P 點時刻，液面抬升高度 (mm)
$h_{r,max}$:	於水窪斷裂前，液面所抬升的最大高度 (mm)
h_t :	上緣深度 (mm)
l :	限制環長度 (mm)
O_i :	液滴形狀參數(b_1/r)
P_d :	液滴產生週期 (s/drop)
p :	液滴形狀參數振盪週期
S :	水下麥克風與撞擊點距離 (cm)

T_d :	液滴溫度 (°C)
T_t :	目標流體溫度 (°C)
$t'_{Dc,m}$:	水漥所能傳遞之最深時間 (ms)
t_{Im} :	聲壓圖上液滴撞擊入水的時間點 (ms)
$t_{D\ point}$:	聲壓圖上於發生振盪前最高點之時間點 (ms)
t_{ni} :	水漥初始頸部時間 (ms)
$t_{ni,min(N)}$:	無大氣泡下，水漥頸部最小寬度時間 (ms)
t_p :	大氣泡斷裂時間 (ms)
$t_{P\ point}$:	聲壓圖上於要發生振盪前之最低點之時間點 (ms)
V :	液滴撞擊速度 (m/s)
V_T :	終端速度 (m/s)
V_0 :	液滴初始速度 (m/s)
W_c :	水漥寬度 (mm)
$W_{c,l}$:	水漥於水平液面寬度 (mm)
W_{ni} :	初始水漥頸部寬度
W_{lc} :	底部擴張區水漥最大寬度(mm)
$W_{lc,tp}$:	於 P 點時刻，水漥最大寬度 (mm)
W_n :	水漥頸部寬度 (mm)
We :	韋伯數 = $\rho V^2 g / \sigma$
σ :	表面張力 (N/m)
ρ :	液體密度 (kg/m^3)
μ :	液體黏滯係數 ($N \cdot s/m^2$)

第一章 緒論



1.1 前言

液滴撞擊的現象非常普遍，自然界中有雨滴滴落於馬路積水攤、海平面上、石頭上，所形成的效應均不一樣，在流體力學當中，液滴撞擊一直是一門複雜且多樣的學問，且吸引著許多科學家、工程師、研究人員持續的專研，就是希望能多了解其現象。在日常生中亦很常見，例如將水倒入杯中，除了聽到有聲音外，還會有泡泡浮於水面上。使用噴墨印表機，其利用壓電晶體變形下，將墨水從噴嘴高速壓出，落於列印紙上。工業界中，液滴撞擊現象與應用更為普遍，像噴墨印刷、噴霧冷卻、電漿濺鍍、液晶滴入面板的技術(ODF)等。因此這也就是為什麼百餘年來對這學問的研究，是一直持續、不間斷的被學界以及業界當作主題進行探討。

液滴撞擊的種類太多了，除大致分為液滴撞擊液體和液滴撞擊固體外，還可依照液滴的尺寸和液體的特性再細分。大量文獻在液滴撞擊於深液的現象中總是沒有探討周圍壁面的造成的效果，那是因為周遭壁面相對於液滴直徑，大到可以忽略的地步。試想如果液滴撞擊深液，而此顆液滴落於周圍有邊界限制的壁面，且此壁面與液滴尺寸相比無法忽略，那麼將會形成甚麼效應呢?這是前人較少太探討到的，因此本文中將會針對有邊界限制的大氣泡型態(Large bubble)，與沒有邊界限制的大氣泡型態，做全面性的比較，並歸納出有邊界限制下對液滴撞擊的影響作分析與探究。

1.2 文獻回顧

關於液滴撞擊相關的研究，最早由 Worthington (1908)所提出，在那時已經利用影像凍結法來拍攝整個液滴撞擊的過程[1]。而這百餘年間對液滴撞擊的研究不勝枚舉，而其中對其做廣泛性統整、歸納的就屬 Rein (1993)。Rein (1993)

將其液滴撞擊研究依照液滴特性、撞擊型態及撞擊表面等差異做歸納[2]，令後繼研究者能很容易一窺這方面的研究概況。針對液滴特性而言，將其自由掉落的型態分為球形、不規則形、內部流場變化以及添加界面活性劑的影響等；關於撞擊型態則分為正面撞擊以及傾斜撞擊；至於撞擊表面型態則分布較廣，包括液體表面及固體表面，液體表面則分為淺液面、深液面還有平液面、波浪液面等，固體表面則分為平面、曲面、平滑面等。由此可知液滴撞擊的分類是相當廣泛的，但本研究為集中焦點，只探討液滴正面撞擊深液且撞擊點周圍有一無法忽略的邊界限制之現象。在深液狀況下，Cai (1989)則針對不同的撞擊速度，水窪的直徑、水窪的深度以及水窪發展時間等問題作深入的研究[3]。而針對水窪發展時間的探討，早期 Engel (1966)則以能量方式探討水窪隨時間的發展情形，其中作者將液滴撞擊能量分為兩部分：一部分是重力所造成的位能，另一部分則是表面所造成的位能，並且假設液滴所具備的動能，在撞擊時有一半傳給了池液 (Target liquid)，進而推導出水窪最大深度對液滴撞擊能量的關係式[4]，之後 Engel(1967)，再以理論的方式探討水窪深度與撞擊速度之間的關係[5]。另有些學者實驗發現液滴撞擊會產生渦環(vortex ring)，Rein 在 1996 年液滴撞擊(深池)液體時，當韋伯數非常小時，液滴撞擊使液體形成一凹洞，惟動量耗盡時，凹洞縮收，液滴融入液池中並產生一向下傳送的渦環。當韋伯數增加至一定程度時，在凹洞縮收時不產生渦環，而是在液體上呈現一個湧出之液柱(文獻稱為 central jet , Rayleigh jet or Worthington jet)[6]。Saylor and Gizzard (2003) 探討水加入活性界面劑產生渦環情形[7]。Peck and Sigurdson 於 1994 年以直徑 2.6mm 液滴，高度 35.5mm 撞擊液體，利用 3 支攝影機拍攝，其結果為渦環[8]。Cresswell & Morton (1995) [9]指出渦環形成原因與液滴掉落的高度和表面張力有關。

而針對液滴正面撞擊深液產生氣泡現象定量探討最有系統性整理的就是 Pumphrey & Elmore (1990) [10]，其利用不同的液滴粒徑及液滴撞擊速度撞擊水體，並以高速攝影機及水下麥克風判斷撞擊型態，將複雜的撞擊型態大分為四個

區域：規則型型態(Regular)、不規則型型態(Irregular)、馬斯勒型態(Mesler)和大氣泡型態(Large Bubble)，除對其加以定義，並提出一至今被大家所廣為應用的液滴撞擊型態地圖(圖 1.2-1)，其中對大氣泡(Large Bubble)型態描述為：“Most of the volume of the crater is trapped as a bubble.”，液滴撞擊液面後會在水面下產生大體積的氣泡，且在地圖上為一圓形區域。此四個區域中，規則型型態是最多研究者著墨的區域，根據 Minnaert (1933)[11]氣泡共振理論，發現此拉扯斷裂的現象會有一定頻率的聲音產生，而此頻率會根據斷裂後產生氣泡的大小而有所不同。Franz (1959) [12]首先提出液滴撞擊液體的衝擊波為聲源之一，透過實驗，液滴撞擊速度與此衝擊波成正比。Pumphery & Walton (1988) [13]以實驗證明液滴撞擊所產生的氣泡會產生聲音，而其聲音訊號在時域圖上為一指數衰減的簡諧振盪。Watanabe (2004) [14]針對水窟產生的聲音做研究，實驗以液滴粒徑為 7.6mm、撞擊高度 365mm 撞擊水體，將會產生 850Hz 低頻聲音，並得水窟的反射聲音頻率為 581-1733 Hz。可利用聲壓的變化來判斷產生氣泡的時間，即氣泡與上緣水窪斷裂的時間，如 Nystuen & Medwin (1995) [15]；Oguz & Prosperetti (1993) [16]；Elmore & Chahine (2001) [17]都有對此型態做過分析及探討。

近期 Wang et al. (2013) [18]於此液滴撞擊型態地圖中提出反證，並說明大氣泡型態的分布並非是一連續的小區域範圍，而是間斷式地發生，且分布的範圍較原始的圖所標示的擴大許多，如圖 1.2-2，也舉證液滴振盪所引致外形的變化，由實驗結果顯示入水前為尖形液滴，是形成大氣泡的必要條件。Zou et al. (2012) [19]提出有邊界限制下的大氣泡，其為液滴掉落於一管內(高度 200mm)，實驗架設如圖 1.2-3，並定義 D_t^* ($D_t^* = D_t/D$)， D_t 為管內直徑， D 為液滴直徑，藉由改變不同的 D_t^* ，並發現受到有邊界限制下的大氣泡會使得產生大氣泡的最小速度會降低，以及在較低的 D_t^* 下，會受到液面劇烈晃動而導致無法生成大氣泡，如圖 1.2-4。另外也提及有壁面效應(wall effect)的影響，但是並未對壁面效應提出定量分析結果。



1.3 研究動機

由 Wang et al. (2013) [18]提出大氣泡(Large bubble)的新型態地圖(圖 1.2-2)，再加上 Zou et al. (2012) [19]提及將液滴撞擊落於周圍有限制的圓管中，針對大氣泡進行探討，不禁讓我們很想知道，受到邊界限制下的大氣泡所受到的壁面效應(wall effect)到底有哪一些參數是受到影響的，做出量化的分析。

另外一個動機是過去諸多的研究，因受限於實驗觀測設備與分析軟體，對於大氣泡型態的發展現象比較偏向定性上的介紹。在有邊界限制下是否更有利於大氣泡的形成，吾人大致將大氣泡水窪外型特徵分為兩大部分，一部分為頸部產生區域，另一部分是底部擴張區域，移動限制環位置，來達到不同區域性的邊界限制，如圖 1.3-1，且改變限制環限制位置及其長度，來找出邊界限制對大氣泡的有效影響區域，進而推測大氣泡生成的關鍵機制。

由 Zou et al. (2012) [19]所做的實驗，可知其邊界限制為對大氣泡生成做整體限制，在有邊界限制下的大氣泡，會因為周圍給予大氣泡於形成過程中，不同的流場變化，導致在較低的撞擊速度下，亦可以產生大氣泡。但是吾人所使用的限制環只會對於大氣泡生成時所產生的水窪做局部的限制，應此可以知道邊界限制對不同水窪區域的影響結果。

第二章 實驗設備與架設



本章節將介紹實驗所使用的設備以及架設，關於設備方面，如圖 2-1 為本實驗設備的配置圖，其中共分為四大系統：I. 液滴產生系統(Drop Generation System)、II. 限制環調整系統(Restriction Ring Adjustment System)、III. 影像處理系統(Image Process System)以及 IV. 聲音擷取系統(Acoustics Capture System)。關於實驗架設，共分為三大架設：液滴與目標水池恆溫架設、(Drop and Target Liquid Thermostatic Method)、影像數位化架設(Image Visualization Method)與限制環水平及中心度校正架設(Restriction Ring Horizontal and Center Correction Method)。以下將就這六大部分進行詳盡介紹。

2.1 實驗條件

本研究於台灣大學應用力學研究所 008 室內進行，由於位於地下室，室溫控制在攝氏 25 ± 2 度；所使用的工作流體均為「一次蒸餾水」、水溫與液滴溫度均控制於攝氏 27.1 ± 0.3 度、透過溫控表面張力可維持在 $0.069 - 0.070 \text{ N/m}$ ，密度為 996.5 kg/m^3 ，且每 2 次做實驗前都會將實驗流體重新換新，並在實驗區域周圍布置上防塵與防風的塑膠布。

2.2 液滴產生系統

液滴產生系統包含液滴滴頭裝置(Nozzle)、升降設備(Automatic traversing device)、水槽裝置、液滴與目標水池恆溫架設。

2.2.1 液滴滴頭裝置

如何重覆產生單一相同的液滴是本實驗首要的工作，且需要液滴在產生過程

時能不受任何外力所影響，因此液滴產生裝置則採用自由懸垂的方式來產生液滴，而不用其他如 VODG (Vibrating Orifice Droplet Generator) 方式或是脈衝擠壓方式來產生液滴，此方式有一缺點是因為其滴頭本身的尺寸限制以及表面張力的影響，造成其無法產生粒徑(直徑)小於 2mm 的液滴，但本實驗所需的液滴粒徑都在 3mm 以上。且此產生液滴的方式較為簡單且穩定，而且可以很快建立設備，當滴頭尺寸固定時，相對產生的液滴尺寸也會固定，如果需要更換液滴尺寸，則換一滴頭即可並接上一定背壓儲存槽裝置(Reservoir)以確保每次產生液滴時背壓都相同，進而讓液滴粒徑都相同，本實驗產生液滴粒徑 5.65 mm 的滴頭，為壓克力管，外直徑為 7.8 mm，內直徑為 5.6 mm。另外，小液滴粒徑 3.76 mm 之滴頭，為不鏽鋼管，外直徑為 1.6 mm，內直徑為 1.2 mm。

2.2.2 液滴粒徑與產生週期

液滴粒徑的量測方式，是利用重量反推完美球形時的體積，進而推出液滴粒徑。關於衛星液滴方面，其產生的原因為液滴在懸垂至落下的過程中拉扯進而產生一微小液滴，因此為了解決衛星液滴的方式，使用滴頭前再加上一縫線針，使液滴在拉扯過程，會形成衛星液滴的部分，留於縫線針上，如圖 2.2.2-1 所示，因此產生出來的液滴粒徑相同，也不會產生衛星液滴。

為本實驗是利用自由懸垂的方式產生液滴，故液滴產生的週期也是一個會影響到液滴粒徑的因素，吾人使用點滴管及點滴調節閥(Roller clamp)，調整液滴產生週期，本實驗都固定使用同一週期約每一滴液滴隔約 120 秒，在這個週期之下，可以確定液滴撞擊時，水平液面為無波傳狀態[20]，而且可使得產生大氣泡機率一致，此在 3.3.2 節會詳細討論。

2.2.3 升降設備

本實驗因為需要改變不同的液滴撞擊高度，進而改變液滴撞擊到水平面前的

速度，因此採用自動升降走台(Automatic traversing device)搭配可控制馬達所走的步數的控制器(Stepping motor controller)，其最大可變換高度為 500mm，精確度到 0.001mm，且連接一光學尺，精確度到 0.005mm，接至顯示器(Linear scale display)可知道目前的高度值，而液滴滴頭裝置架設於升降系統上面，如實驗設備配置圖 2-1 所示。本實驗目標水槽是固定不動的，而實驗液滴滴頭會跟著升降系統移動，這樣可使水槽內水平液面維持於一定值，但實驗過程會考慮經過時間乘上液滴頻率，將得知液面上升不斷的微微上升，吾人會將此部分的上升高度扣除，換算成真實高度。

2.2.4 水槽裝置

本實驗目標水槽(Target tank)為 $230 \times 230 \times 230 \text{cm}^3$ 的自製壓克力水缸，水對壓克力的接觸角(70.9°)較玻璃($0 \sim 5^\circ$)大，表示水對壓克力的潤濕性較玻璃差，因此在高速攝影機的畫面上，水平面以上的黑色條線寬度會較窄。吾人參考 Cossali et al. (2010) [21]調整液面之方法，使用兩個水槽，一為目標水槽(Target tank)，一為調整水平面池(Level pool)，如圖 2.2.4-1。這樣可大大降低做實驗時水平液面微微上升的高度，降低估計液滴落下高度的誤差。

2.2.5 液滴與目標水池恆溫架設

本實驗在實驗的過程中，因為實驗時間較長，且每次的實驗數據，會做為判斷依據，為了降低夏天與冬天溫度差異，使得流體表面張力性質不同，對實驗造成誤差，導致有誤判情況出現。吾人將液滴與目標液體的溫度調整至同一溫度，均設定溫度在 27.1°C ，主要就是可以控制流體的表面張力，在不同次的實驗都能維持定值，使得每次的實驗數據具有可重現性與可比較性的價值。因此在液滴滴頭中心加上可量測液滴溫度的 K-type 熱電偶，如圖 2.2.5-1 (a)，且連接到 YF-160A

數位式溫度計(Digital thermometer)，直接可得知液滴的溫度。因為液滴的體積相對於目標液滴體積實在為乎其微，因此液滴溫度非常容易受到室溫的影響，吾人的做法為在液滴滴頭外，加上一個自製的加熱器(Heater)，建立一個局部的加熱環境，以液滴粒徑 5.65 mm 來說，其體積只有 4.12 mm³，是很容易就可達到所設定穩態的液滴溫度。吾人的自製加熱器，如圖 2.2.5-1 (b)，可分成四部分，包括 30W 烙鐵電熱絲、紅銅管、玻纖絕熱層及電源供應器(Power supply)，藉由控制烙鐵電熱絲的工作電壓，來達到所要的液滴溫度，其中玻纖絕熱層可讓大部分的熱都集中在加熱液滴的流體，實線框代表加熱器玻纖絕熱層的外緣，外直徑為 23.4 mm，虛線代表紅銅管內直徑為 11.9 mm。將加熱器架設在液滴滴頭的周圍，如圖 2.2.5-1 (c)所示，經過所有實驗的量測，液滴溫度的變化量為 27.1±0.3°C。

至於目標流體的溫度的控制，就得藉由恆溫循環水槽(Thermostatic water bath)的方式來達成，因為其水體量很多，但是因為直接將循環水流體來當作目標流體的話，會有內流場的影響，導致目標水體不穩定狀態，故吾人使用另一個更大的水槽(Recycle bath)，裡面的流體為循環水槽的循環水，再將目標水槽置於其內部，如圖 2-1 所示，來使得目標水槽內的流體溫度，達到所要設定的 27.1°C。吾人使用 CHINO 溫度記錄器(Temperature recorder)，其中的兩支 Pt 測棒，一支放置於目標水槽內，量測水溫變化，另一支放置於大氣環境內，來得知室溫變化，其中兩支 Pt 測棒和 K-type 熱電偶均以置入恆溫水槽一同校正過。經過所有實驗的量測，目標水槽內水溫的變化量為 27.1±0.1°C。

2.3 限制環調整系統

限制環調整系統包括夾置具微調裝置、限制環幾何參數及限制環水平與中心線校正架設。



2.3.1 夾置具微調裝置

為架設限制環於水平面上，且可調整其所浸深度，因吾人想探討限制環於限制不同水滯區域，在不同的撞擊高度下，其水滯深度均不同，在實驗時可調整限制環上下位移，就需要有位移平台的加入。吾人利用車床加工市售壓克力管，選擇所要的內直徑，此值會隨著吾人的無因次參數 D_i^* (為環型內直徑(D_i)/液滴直徑(d))不同而做改變，厚度固定2mm及需要的長度，最後會以水砂紙研磨上下邊緣，來使得其平整且無毛邊。將限制環用塑鋼土，固定於不銹鋼棒上，再利用壓克力塊加工出垂直的插槽，配合不銹鋼棒，加上塑膠螺絲的固定，組合出 L 型的夾置具，再將其固定於傾斜平台(Tilt platform)、旋轉平台(Rotation platform)、Z 軸位移平台(Z-displacement platform)及 YX 位移平台(XY-displacement platform)一連串的可微調設備上，如圖 2.3.1-1。限制環要架設在水平面以前，均會以一次蒸餾水及牙間刷清潔兩次，在鎖在傾斜平台上，再利用高速攝影機畫面，來校正調整此限制環之水平度及液滴斷裂對稱線於環型中央處。

2.3.2 限制環幾何參數

吾人使用液滴粒徑為 5.65 mm 及 3.76 mm，搭配三組不同限制環內直徑，分別為 7.84、11.0 及 26.6 mm，將組合出最小 $D_i^*=1.96$ 和最大 $D_i^*=7.07$ ，來比較其大氣泡產生範圍。並且所使用限制環的長度一共有五種，如表 2.3.2-1 所示。由 RA、RB、RE 和 RF，其內直徑均固定，環長不同，藉此得知環長效應；由 RC 及 RG 來得知環寬的效應，因此可比較不同影響因子。

2.3.3 限制環水平及中心度校正架設

限制環水平度及中心線很重要，因為如果兩者有一沒有調整好，會造成大氣泡水滯於生成時受到周圍流體的受力或者壓力不平均，故要如何使限制環邊界與

水平面呈相對水平，將限制環中心線對準於液滴斷裂對稱線上，為做實驗的前提要件。吾人使用高速攝影機所拍攝到畫面，利用水平面(絕對水平)和限制環下緣的像數差異相等來做校正水平，如圖 2.3.3-1。以及利用液滴於滴頭斷裂時的斷裂線，與限制環的中心線重和來做中心度校正，如圖 2.3.3-2。此部分架設誤差約在 $50\mu\text{m}$ 以下。

以下是校正水平與中心度的過程，會將攝影機於 yz 平面與 xz 平面 2 方向拍攝，均會做以下動作：

- (1) 先校正高速攝影機水平。
- (2) 將限制環固定，調整限制環與水平液面的像數差異達相同($A \text{ pix} = B \text{ pix}$)。
- (3) 調整限制環中心線與液滴斷裂線重和($C \text{ pix} = D \text{ pix}$)。
- (4) 於 z 軸移動的行程內，檢查與水平與中心度的相位差異達相同。

2.4 影像處理系統

影像處理系統則包含高速攝影機(High speed camera)、觸發設備、燈光設備及影像數位化分析程式，由於整個液滴掉落以及撞擊水面過程的時間約幾百毫秒(ms)而已，又需要與液滴撞擊所產生的聲壓，同時做紀錄，因此須利用觸發設備搭配高速攝影機拍攝才能完整擷取到所需的影像。

2.4.1 高速攝影機

本實驗所使用的高速攝影機為 NAC Memrecam GX-1，其最高拍攝速度為 200,000fps (frame per second)、最大快門速度 $1\mu\text{s}$ 、最大解析度 1280×1024 像素(pixel)，高速攝影機在影像擷取上面都有一特點，就是每秒拍攝張數越多，則解析度相對減少越多，本實驗選擇的拍攝速度為 8000fps，而快門速度則選擇 20000(1/s)，因為本實驗需要拍攝水湍產生與氣泡斷裂過程，其拍攝速度速度如

果太低，則拍攝時將無法觀察水漥變化情況，進而影響判斷氣泡與水漥上緣斷裂的時間點。每次拍攝完畢後的影像會先暫存在高速攝影機主機內，經由網路線傳輸至電腦(PC)儲存，之後再進行相關的影像分析以及處理。



2.4.2 觸發設備

本實驗的觸發(Trigger)裝置為 Riko 光纖放大器(Digital fiber amplifier)，型號為 BR2-N，將光纖線頭是架在液滴滴頭的下方，其會發出一個光訊號，當有液滴通過進而遮斷此訊號造成反射時，觸發訊號會觸發高速攝影機以及要擷取聲壓的示波器開始記錄，此時高速攝影機才會開始進行錄製的動作，示波器才會開始記錄聲壓訊號。

2.4.3 燈光及拍攝方法

本實驗所使用的燈光有兩種，其一為 120W 的 LED 汎光燈，另外為 10W LED 美國奇異燈泡，前者為拍攝液滴振盪所使用，因為其亮度較高，不會使得液滴振盪有殘影的產生，而造成誤差；後者的使用原因為，此種光源較不會發熱，不致於改變液滴表面張力，且 120W 的 LED 汎光燈須轉接一大型變壓器，造成擷取聲音訊號會有 60Hz 的雜訊，因此在做大氣泡實驗時均使用 10W LED 美國奇異燈泡為光源。在燈光與水槽中間擺放一螢幕及面板常用的擴散板(Diffuser plate)以均勻化其光源，本實驗採用背光的方式進行拍攝，因為本實驗目地在於觀察液滴形狀的變化以及其大氣泡形成過程，因此利用背光方式拍攝最能得到清楚的物體輪廓。

2.4.4 影像數位化架設

影像數位化架設是本實驗最重要的部分之一，因為整個水漥發展過程是用

8000fps(每秒得到 8000 張照片)進行拍攝，而每次過程都歷時約 50-120 ms，代表其每次撞擊過程會得到上百張照片，因此需要借助電腦的數位化方法進行判斷。

本實驗利用電腦軟體 Matlab 進行影像數位化分析，並用學長及自行撰寫程式擷取所需要的資訊，分析水面下水窪動態發展的特徵參數。圖 2.4.4-1，為液滴撞擊產生水中大氣泡(Large Bubble)型態水窪數位化過程，(a)為原始從高速攝影機上擷取下來的影像，(b)則是利用 Matlab 軟體將其邊界輪廓數位化，轉換成只有 0 和 1 的矩陣，並且判斷出所需要的資訊(水窪特徵尺寸與所產生出的氣泡大小等)，(c)即為數位化後的影像，利用此種方式即可以序列式的判斷一系列的液滴形狀變化或水窪動態發展過程並輸出結果矩陣，並將結果繪出比較。

2.5 聲音擷取系統

聲音擷取系統包含水下麥克風(Hydrophone)、電荷放大器(Charge amplifier)、示波器(Oscilloscope)。當光纖線頭所發出了光訊號遭遮蔽時，即液滴通過時，此時光纖放大器會觸發高速攝影機及示波器，同時開始擷取訊號，整體系統如圖 2.5-1，其中括號內為儀器的廠牌及型號。

2.5.1 水下麥克風與電荷放大器

本實驗水下麥克風使用 B&K 8104，其敏感度為 $-205\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ ，頻率響應為 $0.1\text{Hz}\sim 120\text{KHz}$ 。由圖 2.5.1-1 可知水下麥克風在 XY 與 XZ 平面的指向性有差異，由圖可知道要接收到高頻訊號 XY 平面比 XZ 平面較佳，且考慮聲壓同軸傳遞效果較佳，因此吾人將水下麥克風做一 L 型的架設，利用 2 根中空的不銹鋼棒，將麥克風的電纜線與其固定在一起，使得麥克風 Z 軸平行於水平面，XY 平面與液滴撞擊線為平行，如圖 2.5.1-2，經由產生大氣泡實驗測試結果，如表 2.5.1-1，將水下麥克風的聲壓擷取的中心距離水平面 5.5 ~ 6.0 cm，為較適合的深度值。

使用電荷式放大器 B&K 2635，將水下麥克風將所感應之電量(pC)，轉換成電壓訊號，傳給示波器顯示，完成將聲音訊號由水下麥克風傳出至示波器顯示。注意的事是必須將電荷式放大器完成接地動作，以降低雜訊干擾。



2.5.2 示波器

示波器為 Agilent 6000 Series，此台示波器可以由外部觸發訊號，來完成輸入訊號的擷取，且使用最高的擷取頻率為 50 點/毫秒，擷取所選取的頻道訊號。吾人使用 Riko 光纖放大器將觸發訊號，經由 BNC 接頭接至 External 接頭，選取邊緣觸發(Either)，即不管觸發訊號在上升段或下降段均觸發，開始擷取聲壓訊號，可由示波器螢幕調整顯示觸發零點，以及欲想擷取的訊號時間長短和顯示振幅，最後經由 USB 傳輸線將擷取聲壓訊號儲存至電腦。

2.5.3 聲壓訊號與高速攝影機同步探討

在做水下麥克風距離撞擊點(S)測試時，發現由高速攝影機所拍攝到的照片中，可觀察出液滴已經撞擊至水平液面(因對焦水面下，可看到有黑色小點出現，此為液滴與液面之間的氣膜破裂，形成的小氣泡)，但是聲壓所顯示的曲線，卻未開始上揚，聲壓未開始增加，因此判定所擷取到的聲壓起始點，較高速攝影機起始點慢，或者是因為光速較聲速快的關係。故吾人為確定聲壓的延遲(delay)秒數，使用小鋼球替代液滴，撞擊至水平液面，因為小鋼球不會因撞擊液面，而產生外型變化，造成誤判。

先由整體需要同步裝置，來得知可能產生的延遲來源，可由圖 2.5.3-1 可知來源共有三種可能，其中由觸發訊號分別至示波器時間(t_1)與高速攝影機時間(t_2)，將訊號一同輸入至示波器，觀察可發現 t_1 與 t_2 的起始點是相同的，故確認為無延遲產生，作法為吾人將 Riko 光纖放大器所輸出的訊號，利用一分二的 BNC 轉接

頭，將輸出至高速攝影機訊號，接至示波器 CH1，將輸出至示波器訊號，接至示波器 CH2，然後利用 CH1 或 CH2 分別為觸發訊號源，得到如圖 2.5.3-2 所示，其中圖 2.5.3-2 (b)為將(a)中的訊號 0 零點位置(倒三角形)放大，由(a)中每格時間為 20 ms，放大為每格時間為 200 ns，訊號依舊並無任一延遲的狀況。因此延遲來源(1)：示波器紀錄聲壓時間(t_3)與高速攝影機紀錄影像時間(t_4)；來源(2)：聲音在水中傳播速度，所造成的延遲時間(t_5)；來源(3)：高速攝影機所使用的拍攝速度(frame rate)，所造成影像時間判定誤差，例如使用 frame rate=8000 fps，那麼每張影像所佔的時間為 0.125 ms，因此會造成誤判時間誤差就是 0.0625 ms。

由小鋼珠撞擊至水平液面的撞擊影像與聲壓訊號的對應，如圖 2.5.3-3 所示，可發現由圖 2.5.3-3 (a)聲壓判斷出撞擊的時間點為 16.33 ms，但是由影像所判斷出的撞擊影像(frame rate =8000 fps)，卻已經為撞擊時間點後的第三張了，如圖 2.5.3-3 (b)所示，因此以影像來判定撞擊時間為 16.13 ± 0.0625 ms，故聲壓起始點延遲時間為 0.20 ± 0.0625 ms。因為這樣的誤判時間誤差實在是太大了，因此實驗要減少延遲時間的誤判，將提高拍攝速度，且將小鋼球從不同高度自由落下，來得知不同撞擊速度下，是否造成延遲改變。見表 2.5.3-1 可得知在不同的拍攝速度下，並不會明顯地造成聲壓的延遲降低或升高，且由 Δt 又可知道不同高度下，其所造成的不同的時間差，均落在 frame rate 的時間誤差內，如圖 2.5.3-4 所示。以聲波傳遞時間觀察，麥克風距離水平面 6 cm，聲波在水中傳播速度為 1500 m/s，其可能造成傳播(延遲)時間為 0.04 ms，因此歸納出聲壓相對於高速攝影機拍攝影像，其延遲時間來自示波器紀錄聲壓時間(t_3)、高速攝影機紀錄影像時間(t_4)和聲音由撞擊點傳遞至麥克風的傳播時間(t_5)，總和($t_3 + t_4 + t_5$)大約為 0.2 ms。因此吾人之後所做的影像與聲壓的對應圖，均會將聲壓訊號的時間軸，往前移動 0.2 ms 來讓延遲效應消失，使得影像與聲壓訊號為同步之對應。

2.5.4 確認聲壓擷取系統可判定正確斷裂時間

首先必須確定聲音擷取系統所得到的聲壓，為正確訊號，並非環境雜訊。吾人利用 $d = 2.48 \text{ mm}$ ，來產生規則型態的氣泡，利用此系統來擷取聲壓訊號，由 Pumphrey & Elmore (1990) 文章中的規則型裡，有提及各種液滴粒徑的斷裂時間，如圖 2.5.4-1。吾人將所作粒徑 $d = 2.48 \text{ mm}$ 規則型態氣泡，由聲壓特徵點分析所得到的斷裂時間，與 Pumphrey & Elmore (1990) 所做的結果比較[10]，可發現 $d = 2.48 \text{ mm}$ (三角形的點) 所在的 Time from impact to bubble 就如預測的一樣，在 18~19ms 之間，如圖 2.5.4-2。因此由聲音擷取系統所得到的聲壓圖形，為液滴撞擊所引致的聲壓變化，並且可為水湮斷裂時間點判定的依據。

第三章 實驗重複性之影響參數探討



3.1 實驗控制與特徵參數

本文探討限制環幾何形狀與位置影響之實驗控制參數為：液滴粒徑(d)、液滴產生週期(P_d)、液滴釋放高度(H)、液滴撞擊深液之瞬時速度(V)、限制環內直徑(D_i)、限制環外直徑(D_o)、限制環長度(l)、限制環下緣深度(h_b)、限制環上緣深度(h_t)、液滴溫度(T_d)、目標流體溫度(T_t)、水下麥克風與撞擊點距離(S)、流體黏度(μ)和流體表面張力(σ)，如圖 3.1-1。吾人想藉由不同的限制環位置，來達到侷限水窪發展區域之目的，由圖 3.1-2 中可以明顯地觀察出吾人採用的液滴撞擊至限制邊界流體的實驗架設，與 Zou et al. (2012) [19]所使用的方式不同。第一、吾人使用大部分學者研究深液的水池做實驗，而在水平液面上置入不同幾何形狀的環型邊界限制，但 Zou et al. (2012) [19]是使用高度 200 mm，內徑不同的玻璃管做為目標水池。第二、以大氣泡型態形成的過程來看，吾人使用的邊界限制除了限制環長度可替換外，亦可利用微調平台做 z 軸的調整，來侷限不同區域的水窪，以得知邊界效應對大氣泡型態具體有效的影響區域，對比之下，Zou et al. (2012) [19]所用的圓形深管的邊界限制，是對大氣泡型態於形成過程時整體水窪發展均受局限的一種方式。

圖 3.1-3 為大氣泡型態的水窪發展過程時序，大致可將其分成兩個階段，第一階段為液滴撞擊水平面後至水窪產生頸部(neck)的時間，如 9.2 ms 的時序圖影像所示，在此階段以前的水窪區域，稱為頸部產生區。第二階段為水窪產生出頸部後至水窪斷裂而產生大氣泡的時間，如 9.2 至 21.6 ms 時序圖影像所示，並且定義產生出頸部後以下所延伸出的水窪為底部擴張區(lower cavity)。隨著時間的增加，頸部寬度越縮越小，水窪底部向徑向外擴張，同時將頸部深度往下延伸，形成像蘑菇狀外形的水窪，因此可以預期限限制環所浸的下緣深度與所要侷限的水窪發展區域，有很直接的關係；值得注意的是 l 、 h_b 以及 h_t 三者為非獨立變數，

經由關係式

$$l = h_b + h_t \quad (3.1)$$

可以直觀地知道限制環於水平液面的何處，緊接著記錄相對應的水漥發展輪廓，便可以深入地了解邊界限制的效應是如何影響到水漥特徵參數的變化。以水平面為基準，倘若 h_t 為正值，表示限制環上緣仍於水平面之上，但若 h_t 為負值，則代表限制環上緣已浸入水平面之下，然而若 h_b 為正值時，表示限制環下緣於水平面之下，負值時則於水平面之上。

此研究之重要特徵參數為：液滴形狀參數(e 及 O_i)、液滴形狀參數振盪週期(p)、大氣泡產生區域寬幅(HB)、大氣泡區域寬幅變化(ΔHB)、水漥最小寬度的深度，即頸部深度(D_n)、水漥最小寬度，即頸部寬度(W_n)、底部擴張區水漥最大寬度的深度(D_{lc})、底部擴張區水漥最大寬度(W_{lc})、水漥發展最底緣深度(D_c)、水漥發展於水平液面寬度($W_{c,l}$)、大氣泡斷裂時間(t_p)；主要使用兩個無因次參數為： We 及 D_i^* ，其定義如下：

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma} \quad (3.2)$$

$$D_i^* = \frac{D_i}{d} \quad (3.3)$$

3.2 無/有限制環下大氣泡形成分布

由 Pumphrey & Elmore (1990) 文章[10]裡面講述液滴撞擊形成大氣泡型態時，在結尾曾經提過一句話：“It is possible that this process, unlike regular entrainment, is partly caused by shape oscillations of the drop as it falls”，大意是指大氣泡型態的產生可能跟液滴在掉落過程中的振盪行為有關；液滴在自由掉落過程中會有振盪現象，此現象乃是因為在液滴生成過程中，拉扯斷裂掉落所致，在重力與表面張力的作用下，導致其振盪形狀有週期性變化。由振盪理論得知液滴在空氣中的外形變化 Becker et al. (1991) [22]和 Basaran (1992)[23]，存在有很多不同的模態，

其中第二階模態主要決定尖橢圓及扁橢圓的液滴形狀變化行為，可以看到此模態只有單純縱向以及橫向的變化，如圖 3.2-1；而有似正三角形或是似倒三角形的形狀發生，為高階模態的振盪行為來決定[24, 25]。

由管(2011)則有完整的液滴振盪對應大氣泡型態產生的討論[25]，他提到產生大氣泡型態的要素必須要同時滿足兩個液滴形狀參數的條件：第一、針對液滴形狀參數(e)而言，

$$e = b/a \quad (3.4)$$

必須要是在週期內從圓($e=1$)到尖(峰值)的區間內；第二、對液滴修正形狀參數(e_0)而言，

$$e_0 = b_1/a \quad (3.5)$$

必須是存在峰值附近的位置。以液滴粒徑 5.28 mm 為例，圖 3.2-2 可驗證管(2011)所提及的兩大要素。吾人所使用的形狀參數(O_i)，定義為：

$$O_i = b_1/r \quad (3.6)$$

b_1 為縱軸最低點相對於最長橫軸的垂直距離， r 為液滴為完美球形的半徑值。由圖 3.2-3 可知 e_0 與參數 O_i 不同在於 e_0 考慮的是液滴整體振盪形狀比例；而參數 O_i 單純考慮的是液滴縱向振盪與初始無振盪的完美球形比例。以本實驗的液滴粒徑 $d = 5.65$ mm 為例，形狀參數 e 及 O_i 對液滴撞擊時間的變化圖，如圖 3.2-4 所示。從近期 Zou et al.(2012)在有邊界限制對大氣泡形成的研究[19]中，瞭解到大氣泡型態受到液滴振盪影響，會有不連續性的生成條件發生，但是由 Zou et al. (2012) [19]的結果顯示在同一液滴粒徑，不同的 D_t^* 下，發生大氣泡型態所對應的液滴形狀參數(e)範圍不一樣，表示在邊界限制下的大氣泡生成與否會受到 D_t^* 的不同而有不同程度上的影響，導致在較大和較小 D_t^* 下，發生大氣泡範圍狹小，如圖 3.2-5，其文中有提及在較大 D_t^* 下大氣泡產生過程，所受到的邊界效應(wall effect)減弱，而在較小 D_t^* 下大氣泡產生過程，會受到水面抬升太劇烈，導致在水窪生成過程受到干擾。



3.2.1 液滴振盪形狀參數比較

此部分實驗，吾人會分三步驟進行，第一步做利用數位化的方法，來取得液滴形狀參數 e 及 O_i 隨時間獲液滴釋放高度變化曲線，並由理論公式

$$m \frac{d^2 H}{dt^2} = mg - D(V) \quad (3.7)$$

且假設空氣阻力 $D=\beta V^2$ ，可整理出 $V-t$ 方程式，速度的計算公式為

$$V = V_T \tanh\left(\frac{g}{V_T} t + \tanh^{-1} \frac{V_0}{V_T}\right) \quad (3.8)$$

其中 V_T 為終端速度， V_0 為液滴的初始速度， V_T 則是由 Dingle 和 Yean 以三次回歸方程式求得[26]， V_0 利用實驗迴歸分析可由 Wang et al. (2013)[18]得知

$$V_0 = 0.002 \times d^{2.836} \quad (3.9)$$

當液滴粒徑為 5.65 mm 時，其初始速度(V_0)為 0.271 m/s 及終端速度(V_T)為 9.153 m/s。取出形狀參數(O_i)附近峰值對應位置，來預測大氣泡可能會發生的高度。第二步將升降裝置升高至所預測的高度值，讓液滴撞擊到沒有限制環的深液中，吾人稱之為無邊界限制大氣泡(w/o ring)，記錄所發生的高度值。第三步為將壓克力限制環架設於水面上，並利用限制環調整系統將環限制微調至與水平面相對水平，限制環中心與液滴斷裂線重合。將限制環下緣深度(h_b)降至無邊界限制下大氣泡初始頸部深度(D_{ni})附近，如表 3.2.1-1 所示，調整升降裝置高度升降，開始做有邊界限制的大氣泡(with ring)，紀錄所發生的高度值。

因為在大氣泡發生的邊界，大氣泡所產生的機率並不是 100%，因此吾人制定了大氣泡型態的確認規則，在同一個高度下(速度下)記錄大氣泡所發生的次數，以 6 顆為單位，如果形成大氣泡機率大於或等於 0.5，則紀錄為有大氣泡產生，如果 6 顆液滴形成大氣泡機率小於 0.5，則再增加滴落顆數，最多為 12 顆，如果形成大氣泡的次數，聯合前六顆，有形成大氣泡的次數，達到 3 次，則紀錄為有大氣泡產生，不達 3 次，則紀錄為無大氣泡產生。每次實驗皆以此規則來判定，此高度值(速度值)下，是否有大氣泡形成。

吾人使用液滴粒徑 5.65 mm 搭配限制環 A，將限制環浸至下緣深度(h_b)可完全均侷限住大氣泡水漕初始頸部深度(D_{ni})的位置，整理出無邊界限制大氣泡的實驗結果，將水漕寬度(W_c)及初始頸部寬度(W_{ni})相除，定義出 $W_c/W_{ni} \geq 1.02$ 為初始頸部深度與未出現頸部深度的分界，如表 3.2.1-1 所示。觀察液滴形狀參數(O_i)於不同週期下，大氣泡所發生的範圍，並將無邊界限制的大氣泡發生範圍一起討論比較。

以液滴粒徑 5.65 mm，將限制環 A，下緣深度分別設置為於當液滴形狀參數 e 或 O_i 第二週期(p_2)時的 2.83 mm、第三週期(p_3)時的 2.02 mm 和第四週期(p_4)時的 1.50 mm，限制環於此下緣深度略大於水漕初始頸部深度，見表 3.2.1-1，液滴釋放高度(H)與大氣泡發生在有無限制環的比較，其中 e 或 O_i 第一週期(p_1)未產生大氣泡，如圖 3.2.1-1 及圖 3.2.1-2。由圖形可觀察出有邊界限制下產生大氣泡(方框點)的範圍比無邊界限制的大氣泡(圓形點)大，且上下範圍均擴大， p_2 發生大氣泡的釋放高度皆沒有集中分布於 e 或 O_i 峰值上，是偏向上升段，但以相對較靠近 O_i 峰值之處，從 p_3 及 p_4 發生大氣泡的釋放高度，則可以明顯的觀察出集中於液滴形狀參數 O_i 的峰值處並且較形狀參數 e 更為顯著，另外，由液滴形狀來看 p_4 所發生的大氣泡，撞擊的液滴在入水前一刻，其形狀接近為尖橢圓， b_1 約為液滴半徑(2.825mm)的 1.6 倍。觀察有邊界限制下產生大氣泡(方框點)更能清楚知道，在有邊界限制下要產生大氣泡，其撞擊到水平面的前一刻，液滴形狀不需要那麼的尖，即可形成大氣泡型態，且在液滴形狀參數 O_i 在 p_3 ，由原本無邊界限制只有峰值的左半側的發生範圍，但在有限制環下，其產生範圍擴大成以峰值對稱的區域範圍。由此圖也可得知在釋放高度越高的情下，發生大氣泡的整體範圍越來越小，表示能形成大氣泡的液滴振盪形狀參數越來越嚴苛。吾人將液滴形狀振盪週期為橫軸，液滴釋放高度為縱軸，畫出可產生大氣泡範圍，如圖 3.2.1-3，因此可知當有邊界限制於大氣泡初始頸部深度(D_{ni})時，會使得能產生大氣泡區域擴大，但是擴大比例在不同液滴形狀振盪週期是不一樣的，以 O_i p_3 發

生的大氣泡擴大比例最大，其次為 O_{i_p4} 之大氣泡， O_{i_p2} 發生大氣泡所擴大的比例最小。



3.2.2 液滴撞擊速度的關係比較

由實驗第一步可知，不同釋放高度掉落下的液滴可換算相對應的液滴撞擊速度，吾人將大氣泡發生的釋放高度對應飛行時間，經由公式換算成撞擊速度，並且將液滴振盪模態所對應的速度值畫上[18]，虛線為第二模態以作為參考基準，可得到液滴形狀參數 O_i 在 p_2 、 p_3 及 p_4 值，在有無限制環下發生大氣泡速度關係圖，如圖 3.2.2-1、圖 3.2.2-2 及圖 3.2.2-3 所示，並可發現有邊界限制下大氣泡發生速度範圍包住無邊界限制的大氣泡發生速度範圍，表示在有邊界限制下使得可產生大氣泡的最小速度降低，最大速度提高。

經由三次以上的實驗比較大氣泡產生區域寬幅(HB)，即有大氣泡發生範圍 H 的差值，得知液滴形狀參數 O_i 在 p_2 及 p_3 有/無限制環產生區域寬幅差異性，且此部分的數據為無溫度控制的結果，整理出如圖 3.2.2-4 及圖 3.2.2-5，得知在不同液滴產生週期，並無明顯趨勢，但是在 30s 以前有限制環的大氣泡產生區域寬幅似乎都比較大，這也讓吾人想得知實驗結果不穩定的原因，是因為使用的液滴產生時間或者是未控制溫度的結果。

可由圖整理出表 3.2.2-1 清楚的知道，大氣泡產生區域寬幅隨液滴形狀振盪週期越大，其所產生區域寬幅越小，在有限制環下緣深度於水窪初始頸部深度附近，將使得大氣泡產生區域寬幅範圍擴大，但液滴形狀參數 O_{i_p2} 並不明顯，相較於 p_3 ， O_{i_p3} 最明顯的擴大，大氣泡產生區域寬幅變化增加了 3.25 mm。這也讓吾人產生疑問，使用此限制環下緣深度是否為最佳的下緣深度呢?邊界限制在哪個水窪區域位置能使得大氣泡產生最大的區域寬幅?因此尋找邊界限制於水窪有效影響區域，為本論文重點所在，於第 4 章會有詳細的討論。



3.3 大氣泡產生寬幅的探討

由於在實驗初期對液滴產生週期大約控制在 45~50 s/drop，且沒有對液滴溫度與目標水槽內流體做溫度控制，發現在有/無限制環之下大氣泡產生的高度範圍位置，有些許的變化且出現不重複的結果，於是想得知不同的液滴產生時間 (dripping time) 是否會導致大氣泡型態產生高度之邊界造成移動，或者造成不同的大氣泡區域寬幅。吾人已經知道沒有限制環下大氣泡型態的產生高度範圍，因此將液滴滴頭高度調整至其產生大氣泡上/下邊界，統計 30 顆液滴實驗結果，計算產生大氣泡的機率，如圖 3.3-1 所示，隨著液滴產生時間的增加，對於產生大氣泡上/下邊界的機率，前者為減少，後者增加，且於液滴形狀參數 O_i 的 p_2 和 p_3 ，皆符合此項趨勢。但是為什麼會有此項趨勢呢？這樣的趨勢下是否造成大氣泡產生區域寬幅縮小呢？因此吾人將探討其發生的原因。

3.3.1 液滴產生週期與大氣泡範圍位置的關係

吾人最初懷疑不同的液滴產生時間，是否會導致液滴的初始速度會有些許的改變，導致產生大氣泡的位置的變化，於是將 O_i p_2 產生大氣泡的上邊界，與不同的液滴產生時間之液滴初始速度 (V_0) 整理做比較，如圖 3.3.1-1 所示，顯示在液滴產生時間 125 s 以內，液滴的初始速度 (V_0) 並不會因為不同的液滴產生時間，而造成大幅度變化，因此可知道不同的大氣泡發生機率變化與液滴的初始速度無關。由於在整理液滴初始速度時，吾人亦同時整理了液滴粒徑 (d)，這邊的液滴粒徑取得方式為，利用圖像數位化，先得知液滴於振盪情況下的外形輪廓，並假設液滴體積為軸對稱，將液滴每一像數的碟盤體積作累加，來得到此張照片的液滴體積，最後得到的液滴體積經由球型體積公式來得到液滴直徑的轉換。此部分所得到的液滴直徑會因為照片畫面的邊界扭曲，使得於邊界得到的直徑會比較偏大，因此須經由多張照片來取得平均液滴粒徑。

由四組不同的液滴產生時間，比較其取得的平均液滴粒徑，從圖 3.3.1-2 (a) 可知當液滴產生時間增加時，所得到的平均液滴粒徑隨之減少，但是由量測的平均液滴粒徑回推液滴重量時，得到的液滴重量為 0.094 g 或 0.095 g，由圖 3.3.1-2 (b) 可知道電子天平在液滴產生時間 30~100s 時，由平均液滴粒徑所推得的液滴重量，均在液滴重量為 0.095 g 以下，因此並無法判斷出其液滴的重量差異。因此吾人比較不同次實驗，改變液滴產生時間，將液滴從釋放高度 0 至 330 mm 變化的照片，一共 1340 張照片，得到平均液滴粒徑，由圖 3.3.1-3 所示，當產生時間越大，其平均液滴粒徑越小外，亦可發現其每次實驗的最大誤差範圍都在 1.0% 以內。吾人將其中一組實驗畫成液滴形狀參數 O_i 與釋放高度的關係圖，如圖 3.3.1-4 所示，可以發現在釋放高度 200 mm 以前，不同的液滴產生時間，所對應的振盪曲線非常重合，但是 200 mm 以後，振盪曲線顏色排序，由右至左，為綠→紅→藍，所對應的液滴產生時間為遞增，因此得知液滴產生時間越大，液滴粒徑越小，會造成液滴振盪週期減少，致使液滴振盪曲線往左平移；當液滴產生時間越小，液滴粒徑會越大，造成液滴振盪週期增加，使得液滴振盪曲線往右平移。

吾人目前得知在液滴粒徑誤差 1% 以內，但造成液滴振盪曲線平移的程度，會不會造成同一個高度下形成大氣泡機率產生變化，造成大氣泡的產生範圍位置的不同，因此吾人依據實驗狀況，假設如果振盪曲線平移大於 100 μm ，則會造成大氣泡範圍邊界的改變。吾人利用振盪理論，將不同的液滴粒徑代入，得出 3 條不同週期的擬合曲線，目的是為了不要因為實驗點數的不足或是因照片邊界扭曲，而造成判定平移誤差，故使用理論所得到的振盪擬合曲線來做平移判定，如圖 3.3.1-5(a) 所示；吾人將觀察範圍縮小至 O_{i_p3} 產生大氣泡 2 的上下邊界，如圖 3.3.1-5 (b)，如果以液滴產生時間 42 s 為基準，來看液滴產生時間 83 s 之振盪曲線，其向左平移了 211 μm ，由圖 3.3.1-5(c) 可清楚得知，利用同樣的方式，亦可得知液滴產生時間 12 s 之振盪曲線相對於液滴產生時間 42 s，向右平移了 433 μm ，因此由此可知不同的液滴產生時間，會造成大氣泡邊界的些許移動。故大氣泡產

生範圍的位置會有不同的原因，為不同的液滴產生時間，液滴重量有些微變化(1%以內)，造成振盪曲線偏移，所以為了實驗的可重複性與可現性，必須固定液滴產生時間此項實驗參數。



3.3.2 液滴產生週期與大氣泡產生區域寬幅的關係

由上節知道液滴產生週期在實驗上需固定，但是要使用多久的液滴產生時間，就得找出大氣泡產生區域寬幅(HB)，不隨液滴產生時間變化，來得知吾人作實驗時所使用的液滴產生時間(dripping time)。因此吾人選定 O_{i_p3} 作為探討液滴產生時間(dripping time)與大氣泡產生區域寬幅(HB)的關係，因為由圖 3.2.2-5 可知有限制環下的 HB 隨著 dripping time 變化較劇烈，且這時候尚未加入溫控架設。所以在此部開始做實驗前，先確定目標水槽裡的流體水溫為穩定約在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 變化，且液滴溫度與目標水槽的流體溫差(ΔT)在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以內，才會開始做實驗。

吾人選定不同的液滴產生時間，由 dripping time = 30 ~ 300 s 來觀察，不同的液滴產生時間下，所造成 HB 的變化，如圖 3.3.2-1 所示，其中有 2 種不同環長，所浸下緣深度也不同。由圖 3.3.2-1 可知不論(a)或(b)圓形點(w/o ring)在不同的液滴產生時間似乎有隨著時間增加，HB 越小，但是在 120 s 以前不同次實驗(不同液滴產生時間代表不同次實驗)有約大於 1 mm 的大氣泡寬幅變化，以方形點(with ring)來觀察，不論(a)或(b)在 45 s 以前所產生的大氣泡寬幅為不穩定狀態，在 30 s 時，甚至還有 w/o ring HB 大於 with ring 之 HB，在液滴產生時間 120 s 以後不同次實驗，HB 差距不大，以圖 3.3.2-1 (b)來說不同次實驗，HB 差距在 0.2 mm 以內，趨於穩定的大氣泡產生寬幅(HB)。吾人將不同的液滴產生時間，隨這時間的增加次數來作大氣泡寬幅平均(avg.HB)，如圖 3.3.2-2 以結果來看在液滴產生時間為 120 s 以後，有/無限制環的大氣泡產生寬幅平均都趨於穩定，因此使用液滴產生時間為 120 s 為較適合的實驗參數。

3.3.3 溫差對大氣泡產生區域寬幅的影響

由於實驗初期對液滴與目標流體，並沒有做溫度控制，吾人想知道在液滴與目標流體存在有溫度差異下，對大氣泡產生區寬幅的影響，想像中大氣泡的形成是慣性力與表面張力的對抗所主導，當慣性力愈大時，水窪越橫向擴張，大氣泡就越容易形成，但若過大會使得頸部無法形成，水窪再大也無視於補，當調高液滴溫度，目標流體維持定溫時，其實就是在調低表面張力(恢復力)，抗衡的力量比原來小，大氣泡所形成寬幅也許會比較大，所以若無溫差控制，即可能造成實驗的不穩定性，導致實驗不重複的結果。因此吾人以液滴產生時間 120 s，選定不同的液滴與目標流體的溫差，目標流體溫度維持固定，調整液滴溫度，以 Ring B、 $h_b = 40 \text{ mm}$ 來作探討，如圖 3.3.3-1 所示。在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 以內的 HB 變化，並看不出趨勢，只知道會有不重複的結果，以圖的橫軸為 ΔT ，其中 ΔT 定義為

$$\Delta T = T_{\text{droplet}} - T_{\text{target liquid}} \quad (3.10)$$

目標流體溫度維持定溫的狀況($T_{\text{target liquid}} = 27.1^\circ\text{C}$)下，其實橫軸亦代表就是表面張力差值，將不同溫度下的液滴與定溫的目標流體表面張力，計算出差異%，可得到在 $\pm 0.8\%$ 的表面張力下，大氣泡所造成的區域寬幅並沒有太大的變化，但是會有不可預期的結果出現，如圖 3.3.3-1，因此吾人之後的實驗均將溫差固定 $\Delta T \leq |0.3|^\circ\text{C}$ 。

第四章 限制環幾何外形與位置影響之實驗結果與討論



4.1 水窪動態發展與聲壓特徵點的關係

大氣泡型態的水窪變化相當獨特，發展過程中會有一頸部產生，在此頸部下方會有一連結水窪獨自發展擴大成形，待頸部寬度隨著時間持續縮小到斷裂後，下方連結之水窪即斷裂自成一個殘留在水中的獨立大氣泡。由影像上可以觀察到隨著時間水窪動態的發展，與聲壓的對應上存在某種關聯性，吾人可由聲壓的特徵點，判斷此時水窪外型發展至何種階段。移動限制環位置做不同區域性的水窪限制，觀察大氣泡型態是否在有限制環的助力下，較容易形成大氣泡；或者在某特定位置的限制下，使得大氣泡越不容易形成，而造成破壞大氣泡型態的現象，因此吾人將分析比較有/無限制環下水中大氣泡的水窪動態發展，並且描述聲壓與大氣泡水窪動態發展的相互關係，將有助於更清楚了解形成大氣泡型態的物理機制，以及定量化的討論實驗結果。

4.1.1 無限制環下大氣泡水窪發展

吾人針對 $d = 5.65 \text{ mm}$ 於形狀參數 O_i 在 p_2 、 p_3 和 p_4 所形成的大氣泡，分別選出較有代表性的撞擊速度，以撞擊點時間為零點，將大氣泡時序圖與聲壓圖形並列，如圖 4.1.1-1、圖 4.1.1-2、和圖 4.1.1-3 所示。由圖可清楚地知道，在 p_3 和 p_4 所形成的大氣泡，其水窪動態發展與聲壓特徵點的關係，在液滴撞擊至水平面時聲壓會由基準值開始往上升，即聲壓圖中的 I_m 點，在 N 點附近時，聲壓為平緩成長，由影像圖可知，水窪開始向下延伸(為上寬下窄的鈍體外型)，即水下麥可風感受到流體往下壓的壓力，再來至 D 點時，為水窪底部周圍往上捲的起始時間，意即水窪頸部(neck)已經形成，水窪底部往徑向擴張，同時大氣泡的成長過程中，為聲壓的最高點，於此時間點以後，聲壓開始迅速地下降至負壓，

即水下麥可風感受到流體往下的壓力減緩了，直至 P 點為最低點，此時為對應水窪底部與大氣泡斷裂點，因為時間 P 點以後，聲壓會有振盪的情況發生，主要為大氣泡斷裂形成的氣泡振盪行為，但此時從影像看到的是水窪與大氣泡重疊，斷裂點被大氣泡遮住了，因此吾人才會以聲壓特徵點，來判斷大氣泡斷裂的時間。因此吾人可利用聲壓 P 點與 Im 點的時間差，來得知此大氣泡的斷裂時間。

由時序圖可知要描述水窪的動態發展，吾人必須先清楚地定義水窪外型參數，藉由此類參數來比較不同邊界的條件下，水窪發展過程的變化情形。以下針對水窪頸部形成後所延伸出的水窪區域，稱為底部擴張區(lower cavity)。並以其頸部位置(D_n : 水窪最小寬度的深度，即頸部深度， W_n : 水窪最小寬度，即頸部寬度)及“蘑菇”頭(即底部擴張區最大寬度 W_{lc} 及深度 D_{lc})和水窪發展最底緣深度(D_c : 水窪深度)一共五個參數來對此型態做定量分析。

以 O_{i_p2} 來說，由水窪深度隨時間發展，如圖 4.1.1-4 所示，在不同的撞擊速度下，水窪往下伸展的狀況差異不大，約在 0.02s 以後，水窪深度往上跳至零，表示水窪下緣與大氣泡斷開，整體分成 2 部份，一部分為回縮的上緣水窪，一部分為形成的大氣泡，因此水窪底緣深度會出現不連續。而後水窪除了往下延伸外，也會有頸部(neck)產生，如圖 4.1.1-5 所示，水窪大約水面下 1.5 mm 的地方開始有頸部形成，初始的頸部寬度大約 5.0 mm，隨著水窪往下移動，頸部深度延伸但是漸漸產生頸縮(necking)，延伸深度至 3.5~5 mm 不等，斷裂形成大氣泡。當頸部產生時，表示底部擴張區(lower cavity)開始形成，因此有 W_{lc} 與 D_{lc} 的出現，如圖 4.1.1-6、圖 4.1.1-7 和圖 4.1.1-8 所示，由圖可知在不同的撞擊速度下，lower cavity 擴張情況均不一樣，有三特徵階段：(1)擴張初期， V 越大，lower cavity 越早擴張，如圖 4.1.1-6，且擴張起點越淺，如圖 4.1.1-7，(2)擴張中期， W_{lc} 增加幅度比 D_{lc} 還快，即 lower cavity 往徑向擴張大於往軸向下沉還要多，(3)擴張後期， D_{lc} 增加幅度比 W_{lc} 還快，即 lower cavity 往軸向下沉的發展比徑向的擴張來得多，如圖 4.1.1-8，即 lower cavity 會有 2 段轉折(1)為中期開始往徑向擴張，(2)為後期

減緩擴張，開始往下延伸。

特別值得一提的是在 O_i_p2 所形成的大氣泡，可以發現 lower cavity 動態發展上，有些大氣泡最大寬度(W_{lc})都比較小而且其所對應的深度(D_{lc})也比較深，最後在斷裂時間上的最大寬度(W_{lc})都在 4 mm 以下，如圖 4.1.1-8 所示，其撞擊速度(V)分布在 0.899(▲)~0.911 (▲)m/s，一共有 5 組大氣泡。吾人列出其中一組的大氣泡時序圖，如圖 4.1.1-9，可觀察出與圖 3.1-3，最大的不同點是在時間 13 ms 以後的發展， $V = 0.908$ m/s(◆)此組水窪最大寬度(W_{lc})不再往徑向上發展，而是開始回縮，如圖 4.1.1-6 所示，且最大寬度的深度(D_{lc})，持續往下延伸，並不像 $V = 0.908$ m/s(□)水窪發展，其在 D_{lc} 發展有一段往上抬，如圖 4.1.1-7，且在寬度(W_{lc})上持續地往徑向擴張。最後斷裂的情況，以 $V = 0.908$ m/s(◆)時序圖，如圖 4.1.1-9 來看，似乎是其上半部水窪回縮，導致上下水窪斷開，形成比較較小顆的氣泡。以斷裂方式來看，很像是規則型態的氣泡斷裂方式[10]，因此吾人將所做的液滴粒徑 $d = 5.65$ mm，所有形成大氣泡的撞擊速度(V)，畫在 $V-d$ 圖上，並且區別此 5 組大氣泡，用菱形綠色點標出(◆)，如圖 4.1.1-10 所示，可以發現在 $V-d$ 圖上的分布為規則形態的延伸線[27]與 $p = 2$ 預測線偏下的位置，因此在此型態下有大氣泡的頸部(neck)，但在斷裂時的過程為上半部水窪回縮時斷裂，此為規則型的斷裂方式，且產生出的氣泡大小比規則型氣泡大很多，故吾人稱為大氣泡與規則型態合體(Large bubble coupled with Regular)。

以 O_i_p3 及 O_i_p4 來說，由圖 4.1.1-2 和圖 4.1.1-3 可知由影像圖並無法判定，氣泡是否與水窪上緣斷開，只能看到大氣泡與回縮水窪不重疊的時候，回縮水窪已經回縮一段時間了(底部為平整的)，且由聲壓判定的斷裂時間點(P point)，以影像上看到的為一蘑菇外型的情況，因此在 O_i_p3 與 O_i_p4 的水窪最大寬度與深度判定，以看到大氣泡與回縮水窪不重疊的時候，為結束的時候，並無法代表真實形成上下水窪斷開的情況。如圖 4.1.1-11 及圖 4.1.1-12 所示，由圖可知在 O_i_p3 時，其不同速度的水窪擴展情況相近，中期擴展深度(D_{lc})約在水面下 1.5~2.0 mm

之間，D點時間點(水窪開始往上捲)也分布於此，最大水窪寬度(W_{lc})可達約 13 mm，可以看到 P 點分布大致落在深度約 2.6 mm；在 O_{i_p4} 時，中期擴展深度(D_{lc})約在水面下 1.5 mm 附近，最大水窪寬度(W_{lc})可達約 14~15 mm 之間，P 點分布深度約在 1.5~2.0 mm 之間，表示水窪在中期擴展深度下，水窪上下半部就斷開形成大氣泡了，且統計 P 點時刻， O_{i_p3} 及 $p4$ 其最底緣深度(D_c)約分別為 8.2 mm 與 7.4 mm。因此可知隨著撞擊速度的增加，大氣泡水窪開始擴張的起始深度越淺，且水窪的最大寬度越大。

4.1.2 大氣泡斷裂時間比較

利用影像數位化分析來得知大氣泡型態的斷裂時間(t_p)，只能知道形狀參數 O_{i_p2} 所產生大氣泡的對應斷裂時間，因為在液滴形狀參數 O_{i_p2} 所形成的大氣泡，並不會遮蔽其水窪下緣與氣泡的斷裂點，但是 $p2$ 以後，隨著振盪週期越大，其所形成的氣泡越大顆，會遮住水窪下緣與氣泡斷裂點裂點，因此量測大氣泡斷裂時間，最有效的方法為量測聲壓變化，利用聲壓特徵點來判斷其斷裂時間。這一部分，吾人將會以聲音擷取系統所得到的聲壓圖，利用聲壓圖上發生高頻振盪前的時間點(P point)與初始聲壓開始上升的時間點(Im point)之差值，來計算大氣泡斷裂時間，即

$$t_p = t_{p \text{ point}} - t_{Im \text{ point}} \quad (4.1)$$

來得到水窪的斷裂時間，意謂大氣泡的行程時間。最後比較有/無限制環大氣泡斷裂時間差異，來說明在有邊界限制下，帶給大氣泡型態發生的影響。

吾人目前分析了液滴形狀參數 O_i 第二至第四週期，比較有無限制環下的大氣泡型態斷裂時間，其中 O_i 第二週期可利用影像或聲壓來判斷斷裂時間，結果如圖 4.1.2-1，由圖可知限制環 A 在下緣深度(h_b)均侷限住初始頸部深度值(D_{ni})下，見表 3.2.1-1，可觀察到撞擊速度越大，大氣泡的斷裂時間越短，且斷裂時間均在 18 ms 以內。如果將無限制環的大氣泡斷裂時間一起比較的話，如圖 4.1.2-2 所示，

有限制環下的大氣泡斷裂時間，均來得比無邊界限制的大氣泡快，表示在此邊界限制下，限制環造成大氣泡水窪頸部附近區域流場內縮的動量變大，使得限制環內部水窪提早頸縮(necking)，進而斷裂形成大氣泡。



4.2 限制環位置與長度對大氣泡型態影響探討

由 3.2 節可知道當限制環下緣深度於初始頸部深度(D_{ni})時，對大氣泡型態有建設性影響，可使得大氣泡產生區域寬幅擴大，但是並不知道什麼樣的下緣深度值，才會使得大氣泡型態有最佳的建設性影響。因此本節將改變同一限制環的下緣深度值，尋找限制環對 $d = 5.65 \text{ mm}$ 所產生大氣泡的最佳建設性之下緣深度值。同時吾人亦會使用不同的限制環長度，來得知水平液面抬升對大氣泡產生的影響。在此節吾人先以形狀參數(O_i)第三週期大氣泡作為主要探討對象，選定 O_{i_p3} 來探討限制環於不同位置的影響，是因為在 3.2.1 節中得知在第三週期因邊界限制所產生大氣泡為最大的擴大比例。由沒有限制環下的大氣泡產生區域寬幅來決定基本寬幅($HB_{w/o \text{ ring}}$)，為 2.80 mm ，而後定義不同長度限制環於不同位置所造成的區域寬幅變化(寬幅增益)參數 ΔHB 為

$$\Delta HB = HB - HB_{w/o \text{ ring}} \quad (4.2)$$

此部分實驗，吾人會分三步驟進行，第一步將限制環架設於水面上，調整其水平度與中心度，轉動分離卡降至所要的下緣深度/上緣深度，第二步利用高速攝影機拍攝照片，重新確認為所設定的下緣深度/上緣深度，確認完後開始調整升降平台，依循大氣泡歸類規則紀錄有發生大氣泡的撞擊高度且用高速攝影機記錄水窪發展的過程，第三步為做完一組下緣深度/上緣深度後，再繼續調整分離卡將限制環降至所要的下一組深度。之後整理各組的大氣泡產生區域寬幅變化，來歸結出此限制環的最佳浸入深度，最後經由定量分析水窪發展，來得知有邊界效應下，影響水窪發展的參數變化，以及與無限制環下水窪發展的差異。

4.2.1 限制環不同位置之影響

首先，以限制環 B 來看不同下緣深度下，與發生大氣泡所對應的液滴釋放高度之關係，如圖 4.2.1-1 所示，同樣地，可將液滴釋放高度轉換成撞擊速度(V)，並與 w/o ring 做比較，吾人取出此 O_i 下的代表性速度 $V = 1.337 \text{ m/s}$ ，依照不同的邊界限制位置分別取出 C1、C2、C3 及 D 資料點，另外，針對相同邊界位置但不同撞擊速度下的情況，取出 C1' 資料點與 C1 相互比較，呈現出各種情況下，形成大氣泡的水窪時序圖及聲壓狀況。其中 C 代表建設性，即所形成的寬幅大於沒有限制環下的寬幅；D 代表破壞性，即所形成的寬幅小於沒有限制環下的，甚至無法形成大氣泡。由圖 4.2.1-1(b)及(c)可知，當限制環上緣深度為零時，即與水平液面切齊，此時液面抬升相當明顯，兩者間的差別為水窪斷裂後(P 點)伴隨噴發的液柱(jet)，其斷裂所形成的液滴大小與斷裂時間長短的差異。由圖 4.2.1-1(d)及(e)可知 C2 與 C3 的斷裂時間相近，且聲壓的發展趨勢相同，差別為液面抬升的影響，觀察水窪蘑菇狀最大寬度的地方深度不同。由圖 4.2.1-1(f)可知限制環 B 於此上緣深度下，造成原本無限制環下可形成大氣泡的液滴撞擊速度，均無法再引致大氣泡的生成，水窪受到限制環的擠壓，而往水平液面徑向外擴。

將限制環 B 更換為限制環 A，由圖 4.2.1-2 可知在 $h_b = 10 \text{ mm}$ 有最大的寬幅，因為環長為 10 mm ，故為 $h_t = 0 \text{ mm}$ ，觀察圖 4.2.1-2(a)及(b)狀況與限制環 B 很像，撞擊速度大時，液面抬升愈明顯，內縮程度愈大，但是斷裂時間也拉得比較長；觀察圖 4.2.1-2(c)其水窪於斷裂前，均在限制環內發展，因此水窪的最大寬度較小，斷裂時間較圖 4.2.1-2 (d)快。圖 4.2.1-2(e)為破壞性的影響，與限制環 B 發展相同。將小內直徑的限制環更換為限制環 C，內直徑約擴大了 2.4 倍，可發現圖 4.2.1-3(a)液面抬升明顯下降，沒有噴柱出現，且斷裂時間與圖 4.2.1-1(a)沒有限制環下的大氣泡相近($t_p \approx 13 \text{ ms}$)，觀察圖 4.2.1-3(b)及(c)其聲壓發展狀況差不多，與沒有限制環之下的聲壓發展相似。

將限制環長減短，限制環 E 或限制環 F，可發現限制環長度較小時，於 $h_t =$

0 mm 時的液面抬升高度亦減少，但都有噴柱(jet)的形成，隨著限制環長度減小，高度與產出液滴均縮小，如圖 4.2.1-4(a)及圖 4.2.1-5(a)所示。此兩種限制環於破壞性的影響，均不明顯，由圖 4.2.1-4(c)及圖 4.2.1-5(c)所示，大氣泡水窪發展於斷裂前，其最底緣深度(D_c)均可超過限制環下緣(h_b)，形成大氣泡，即水窪於水平面的徑向擴張寬度就減少很多，相較於圖 4.2.1-1(f) 及圖 4.2.1-2(e)。

吾人統整不同限制環下，於 Oi_{p3} 發生大氣泡的液滴釋放高度之上下邊界，及寬幅中心位置(實心點)，如圖 4.2.1-6 所示，由圖可知當上緣深度大於零時，大氣泡發生的邊界會偏向較高的高度，而相反的當小於零時，大氣泡發生的邊界會偏向較小的高度，但是限制環 C 與之例外，其所發生的大氣泡高度邊界，略小於沒有限制環下的狀態。由圖 4.2.1-7 只列出大氣泡寬幅中心位置更清楚得知，內直徑越大其所形成的大氣泡寬幅中心位置，與小內直徑限制環完全入沒水中後，所產生大氣泡寬幅中心位置相近。

圖 4.2.1-8 為各種不同限制環下緣深度與寬幅，可明顯的看到四個峰值，為四種不同的下緣深度剛好為四種限制環的環長，即上緣深度為零的深度($h_t = 0$ mm)，因此吾人將 x 軸換為上緣深度，為圖 4.2.1-9 所示。由圖可看出在 $h_t \geq -0.5$ mm 時，所形成的大氣泡寬幅均大於無限制環的寬幅，以 $h_t = 0$ mm 能形成最大的寬幅，當 $h_t < -0.5$ mm 時分兩種情況：(1) RA 及 RB 隨著上緣深度越小，寬幅越大與無限制環越接近；(2) RE 及 RF 所形成寬幅略小於無限制環的寬幅。若考慮大氣泡區域寬幅變化，即寬幅增益(ΔHB)，形成如圖 4.2.1-10 所示。因此吾人可藉由圖 4.2.1-9 來劃分於不同上緣深度所形成的寬幅大小，大致呈現三大區域：分別為建設區，代表有環限制下所能產生的大氣泡寬幅大於無環者；顯著建設區，代表有環限制下所能產生的寬幅遠大於無環者；破壞區，代表有環限制下能產生的氣泡寬幅小於無環者，如圖 4.2.1-11 所示。

將不同上緣深度下大氣泡斷裂時間統計出來，如圖 4.2.1-12 所示，可發現在 $h_t > 0$ mm 時，內直徑較小的限制環平均斷裂時間，均小於無限制環者，而在 $0 <$

$h_t < 4 \text{ mm}$ 時斷裂時間會有大於無限制環者，其原因為速度較大時，會有液面抬升高度大於上緣深度的情況出現，導致延後斷裂。而限制環 C 所造成的斷裂時間略小於或等於無限制環者，推測原因為限制環無法提供大氣泡水窪頸部附近區域流場內縮，因此才無法造成較佳的建設性。在 $h_t = 0 \text{ mm}$ ，有最大的區域寬幅，大氣泡斷裂時間跨越很大的範圍，但還是集中在沒有限制環者的斷裂時間之後。而在 $h_t < 0 \text{ mm}$ ，大氣泡平均斷裂時間略大於或接近無限制環者。

4.2.2 有限制環下水平液面抬升的影響

吾人在做限制環所浸深度變化實驗時，除了拍攝水面下的情況，有時也會拍攝水面上的情形，會發現在限制環下緣深度增加時，限制環內水平自由液面抬升的趨勢增加，因此吾人利用兩台高速攝影機，同時拍攝同一顆液滴撞擊至有限制環於目標水池的過程，想得知限制環內液面抬升與水面下水窪發展的關聯性，以 $V = 1.337 \text{ m/s}$ ，氣泡形成過程手繪時序圖為例，如圖 4.2.2-1 所示，此手繪稿的參考來源來自圖 4.2.1-1(a)及(d)。由圖(a)可知道無限制環下大氣泡水窪形成過程，就會有液面抬升現象，因此在有加上限制環的侷限下，如圖 4.2.2-1(b)於初始狀態時，限制環內與環外的水平液面高度差異是因為環內所形成的潤濕現象，在液滴撞擊到限制環內水平面後，開始有水平面抬升情況，在 $t = 5 \text{ ms} \sim 10 \text{ ms}$ 有明顯的抬升，到 $t = 11 \text{ ms}$ (P point)時接近為最大抬升高度，之後抬升高度持平，然後在 $t = 16 \text{ ms}$ 後抬升高度開始下降。

吾人定義限制環外的水平(自由)液面為起始零點，抬升高度(h_r)為抬升的液氣介面超過起始零點後開始計算，但是由於限制環的環長與位置的不同，有些條件下會使得抬升高度(h_r)超過限制環上緣深度(h_t)，如圖 4.2.2-2，此為上緣深度為 4 mm 的例子，綠色實線框為 $t = 11 \text{ ms}$ 時($h_r < h_t$)，此時抬升高度(三角形)還未接觸到限制環上緣，此時的抬升高度(h_r)計算方式為將液面接觸的環內壁左右兩點平均，另外紅色虛線框為 $t = 13$ 及 17 ms 的情況($h_r \geq h_t$)，在 $t = 13$ 時液面抬升已

經接觸到限制環上緣，且中間的部分有超過上緣深度(h_t)，此時的抬升高度(h_r)計算方式為只計算最高的單點。

吾人統計限制環 B，同一個速度 $V = 1.358 \text{ m/s}$ 下，不同上緣深度(h_t)所形成的液面抬升高度(h_r)對時間的圖，如圖 4.2.2-3 所示，有將不同的計算方式，以實線($h_r < h_t$)及虛線($h_r \geq h_t$)作區別，由圖可知在限制環未完全沒入水平面時，限制環內於液滴撞擊前形成的潤濕現象，會造成有初始的抬升高度約 $1.0 \sim 1.7 \text{ mm}$ ，在 $h_t = 4 \sim 48 \text{ mm}$ 其液面抬升高度與時間關係有相同的趨勢，先迅速地抬升至 P 時間點附近，於 P 點時間(大氣泡斷裂時間)後抬升高度持平，然後抬升高度緩慢的減小，但是在 $h_t = 0 \sim 3 \text{ mm}$ ，其液面抬升狀況比較沒有趨勢性，有一相同趨勢是在 P 點時間後，抬升高度依然持續上升，甚至有噴柱(jet)產生，斷裂形成液滴。在 $h_t = 2 \text{ mm}$ 其所產生的噴柱，還有 2 次的斷裂，形成抬升高度又驟降的情形，如圖 4.2.2-3 中小圖所示，且由實線與虛線區別可得知在此限制環上緣深度 4.5 mm ，開始出現抬升高度(h_r)大於上緣深度(h_t)。

吾人從圖 4.2.2-3 中取出 P 點時間點(☒)所對應的抬升高度(h_r)，想得知在大氣泡斷裂時間這個特徵時間點下，不同的上緣深度會有甚麼樣的變化。如圖 4.2.2-4 所示，深藍色實線代表在沒有限制環下， $V = 1.337 \text{ m/s}$ 大氣泡於 p 點時間所形成的抬升高度，其中空心點代表 $h_r \geq h_t$ 。先以 Ring B 來看以此四組大氣泡發生速度，吾人可大致歸類分為：I. 在 $30 \text{ mm} < h_t < 50 \text{ mm}$ 以後，抬升高度緩緩的上升，隨著 h_t 減小， $h_{r,tp}$ 隨之遞增。II. 在 $4 \text{ mm} < h_t < 30 \text{ mm}$ ，隨著 h_t 減小，各種撞擊速度下會有各自 $h_{r,tp}$ 大致落於一穩定的高度，所以此區域的抬升高度與環頂緣位置的關係會形成一平坦區。III. 當 $0 \text{ mm} \leq h_t \leq 4 \text{ mm}$ ，由實驗結果得知，撞擊速度越大，液面抬升高度(h_r)越高，在較大的上緣深度就開始會有 $h_{r,tp} \geq h_t$ 的現象出現，導致液面在抬升階段時流體會被環壁面部分所侷限(pin)並阻擋流體往水平方向運動，因此抬升高度(垂直方向)會有顯著抬升現象，因此抬升高度將隨 h_t 愈小而顯著的提高。

考慮於 P 點液面抬升高度增益($\Delta h_{r,tp}$)，如圖 4.2.2-5，以 Ring B、 $V = 1.337 \text{ m/s}$ 來看，其所形成的抬升高度趨勢與 $V = 1.358 \text{ m/s}$ 相同，只是所造成的抬升高度較小，這也說明了撞擊速度越大，其所造成的液面抬升會越顯著，而以 Ring C 來說，其抬升高度的變化很小， $\Delta h_{r,tp}$ 大致從 0 增加至 1.0 mm，這是因為液面抬升並不太會受到限制環的影響，可以往徑向上傳開，在前兩個區域(I與 II)不會造成超過 $\Delta h_{r,tp} > 0.5 \text{ mm}$ 以上的液面抬升狀況，與無限制環下抬升高度相近，在 III.才開始有較大的抬升高度。在上緣深度為負值時，代表限制環完全沒入水中，其抬升高度也會驟降，最後與沒有限制環的抬升高度相同。由圖 4.2.2-6，想要藉由 $h_{r,tp} - h_t > 0 \text{ mm}$ 來說明，顯著建設區與建設區的劃分，只是進入此顯著抬升階段的起始環上緣位置會受撞擊速度而有少許的偏移，由實驗整體結果得知，撞擊速度越大，液面抬升高度即愈高，導致在較大的上緣深度就開始會有 $h_{r,tp} - h_t > 0 \text{ mm}$ 的現象出現，但在圖 4.2.2-6 顯示的撞擊速度範圍下，起始進入顯著建設區的環上緣深度皆會大致落於 $h_t = 4 \text{ mm}$ 之附近

4.2.3 不同速度區段下之建設程度

由 3.2.1 節得知在液滴粒徑為 5.65 mm 時，液滴形狀參數 O_i 隨著高度變化，一共有三個週期可形成無限制環下的大氣泡，而吾人已在前面詳細探討過 O_{i_p3} 之下的有無環型邊界下大氣泡的發展及建設性影響，而在此節吾人將改變不同的液滴釋放高度，改變液滴撞擊入水的速度，來探討其他兩個液滴形狀參數 O_i 週期的大氣泡，分別為 O_{i_p2} 及 O_{i_p4} ，看看不同限制環位置的條件下，是否也與 O_{i_p3} 有相同的趨勢。

吾人選用限制環 B 來得知，不同限制環位置的條件下 O_{i_p2} 及 O_{i_p4} 的建設性程度影響，如圖 4.2.3-1 所示，位置 $h_b = -1 \text{ mm}$ 為無限制環下 O_{i_p2} 所形成的大氣泡，不同下緣深度所得到大氣泡之實驗點，觀察得知在 $h_b = 50 \text{ mm}$ 附近才有較大的區域寬幅，比較 C1 可知與無限制環下(w/o ring)大氣泡發展差異極大，

如圖 4.2.3-1(b)與(a)，在 C1 液面有較大的抬升，導致在水窪發展上其頸部的寬度很細小，整體所承受的靜水壓力更大了，造成斷裂時間縮短，因此有很大寬幅的大氣泡分布。而在能產生大氣泡最低速度下，如圖 4.2.3-1(c)所示，由時序圖顯示出抬升的液膜不會有溢出限制環外的情形發生，靠著表面波從撞擊點至限制環壁上的回彈，使流體向中心軸線集中流動，進而促使水窪上半部頸縮斷裂而形成氣泡，因此在斷裂時($t = 28 \text{ ms}$)以 2 維來看，液滴呈現如三角形的形狀。

圖 4.2.3-1(d)為在 C2 的時序圖，可知限制環在位置下，液面會有抬升的現象，斷裂時間也比無限制環者快，但是其所造成的寬幅卻與無限制環者相近，即加上限制環 B 於此位置，並沒有形成任何效應，此部分的說明吾人會在 4.3 章詳細討論。而在破壞性的影響，如圖 4.2.3-1(e)所示，可以發現此下緣深度下，原本無限制環下較高速的大氣泡無法形成，而較低速的大氣泡形成並不是很穩定，且氣泡較小顆。

在 O_{i_p4} 所形成的大氣泡，如圖 4.2.3-4 所示，可發現在此限制環下，小於下緣深度為 50 mm 以前，均可產生建設，選定代表速度值為 $V = 1.726 \text{ m/s}$ 在圖 4.2.3-4(b)液膜抬升明顯，且初始發展時液膜為外擴的，隨者時間發展而往內縮，因此斷裂時間就拉長了。而在圖 4.2.3-4(c)為 C2 的時序圖，可知大氣泡在斷裂前液面不斷抬升，斷裂後抬升高部持平，由聲壓圖可知斷裂時間比無限制環，圖 4.2.3-4(a)下來得更快。而圖 4.2.3-4(d)為 C3 的時序圖，觀察得知因為水窪於斷裂前可擴展至限制環外範圍，無限制環下 O_{i_p4} 的大氣泡最大水窪寬度(W_{lc})可達約 14~15 mm 之間，因此水窪幾乎擴展貼近限制環內壁，所形成的斷裂時間與無限制環者相近。在破壞性的影響，如圖 4.2.3-4(e)所示，因水窪往下的動量無法傳遞，使得液面往上抬升，最後水窪回縮擠壓形成破碎的小泡泡。

由圖 4.2.3-3 可知在 O_{i_p2} 下，改變不同限制環位置，建設區只有在 $0 \leq h_t \leq 5 \text{ mm}$ 時，有較佳的建設性，其餘 $5 < h_t < 50 \text{ mm}$ 所形成的大氣泡寬幅與無限制環下寬幅相近，而破壞區在 $-2 \leq h_t \leq -5 \text{ mm}$ 的區間，所形成寬幅均小於 2 mm。

而 O_i _p4 下的所形成大氣泡寬幅，如圖 4.2.3-4 所示，在 $h_t \geq -1$ mm 均產生建設性的影響，其中 $-1 \leq h_t \leq 7$ mm 為顯著的建設區。而在限制環完全沒末後，破壞區在 $-2 \leq h_t \leq -5$ mm 的區間，與 O_i _p2 相同。

吾人將有加入限制環 B，不同液滴形狀參數 O_i 週期下所形成的大氣泡寬幅增益(ΔHB)一起比較，來得知在相同的限制條件下，不同速度下的大氣泡所能形成的建設性或破壞性差異，如圖 4.2.3-5 所示。由圖可知於建設區 O_i _p4 與 O_i _p3 所形成的寬幅增益相近， ΔHB 約為 3 mm，而顯著建設區的起始點並不相同，此為液面抬升的關係，於 4.2.2 節有提及撞擊速度越大，在有限制環下能形成大氣泡的液面抬升高度越高，因此在 O_i _p4 的顯著建設區提早在高的上緣深度發生($h_t = 7$ mm)。而在 O_i 不同週期下破壞區大致集中在 $-2 \leq h_t \leq -5$ mm 區間內發生，差別只在於破壞程度的不同而已。



4.3 水窪定量分析與邊界限制下產生建設/破壞成因

4.3.1 建設區與顯著建設區成因

以限制環 B 來說，如圖 4.2.1-1(d)及(e)、圖 4.2.3-1(d)和圖 4.2.3-2(c)及(d)所示，建設區域的大氣泡生成時序圖，當目標流體受環型邊界限制時，液滴撞擊後將使目標流體的動量無法往外釋放，只能將動量反向傳遞，往限制環中心的水窪低壓處進行擠壓，此舉促進頸部斷裂的可能，上下半部的水窪會越容易斷開，於是相對無環狀態下的氣泡生成寬幅，氣泡能夠存在的範圍擴大，所以稱此些環型位置所造就的寬幅擴大現象為大氣泡建設區，而以斷裂時間來說，水窪發展整體均在限制環內的，其斷裂時間會更提早，如圖 4.2.1-12 所示，限制環於 $h_t = 45 \text{ mm}$ 時，大約為其分界；限制環 C 的建設程度並不明顯，主要原因受環內徑較寬影響($D_i = 26.6 \text{ mm}$)，水窪周遭流體對於環形邊界限制的作用力較小，使環 C 造成的氣泡寬幅較為接近無環狀態的撞擊結果。

以限制環 B 來說 $h_t = 0 \text{ mm}$ ，如圖 4.2.1-1(b)及(c)、圖 4.2.3-1(b)及(c)和圖 4.2.3-2(b)所示為顯著建設區域的大氣泡生成時序圖，當液滴撞擊至有邊界限制的水體區域時，水平面會有明顯的抬升運動，水平面的抬升不僅使水窪受到更大的靜水壓力，也會使水窪除了擁有向下擴張的運動外，同時受到抬升液面向上拉伸的影響，在上下兩相反的作用力拉扯水窪的情況下，氣泡的產生將多了一份額外的助力進而切斷水窪頸部而達成。最引人注意的是，從圖 4.2.1-9 中可以觀察到不同長度的限制環(RA、RB、RE、RF)皆會於環上緣位置平行於水平面之時，產生最大範圍的氣泡存在寬幅，這顯著的增幅效果如前所述，與液面的抬升效果息息相關，在液滴撞擊液面時液膜會筆直隆起，是因為目標水體的水平面上有限制環上部邊緣圍繞著，因此以二維視角來說，可視水平面的邊界條件為停滯點(stagnation points)，流體流經此點會停止往水平方向的動能並轉而朝垂直向上/下方向運動，但由於水平液面上方周圍並沒有限制環壁面存在時($h_t = 0 \text{ mm}$)，使

得流體向上受到運動摩擦阻力相對比所有限制環位置都來的更小，所以會導致液面往上抬升的動能最大，配合液面下的水窪同時往下發展，水窪頸部產生頸縮現象更為顯著，使得氣泡更容易斷裂，大氣泡寬幅將大幅的增加，因此限制環可在 $h_t = 0 \text{ mm}$ 時，成就最佳的大氣泡建設區。

另外吾人統計水窪斷裂時刻 P 點時間點，不同限制環上緣深度(h_t)下，水窪各項特徵深度($D_{c,tp}$ 、 $D_{c,tp}^*$ 、 $D_{lc,tp}$ 和 $D_{lc,tp}^*$)與寬度($W_{lc,tp}$)做整理，其中特徵外型參數加上*表示考慮 $h_{r,tp}$ ，即考慮斷裂時間下自由液面到各項水窪特徵深度，得到不同上緣深度下水窪特徵外型如 O_i_p2 圖 4.3.1-1、 O_i_p3 圖 4.3.1-2 及 O_i_p4 圖 4.3.1-3 所示。以 $D_{c,tp}$ 來說，如圖 4.3.1-1、圖 4.3.1-2 及圖 4.3.1-3，各圖的(a)可發現在沒有限制環下， $D_{c,tp}$ 的值大約為 8 mm，在未考慮抬升影響時，即以限制環外水平液面為基準，深度大致分布在 2.0~6.0 mm，又以 O_i_p2 為最深的水窪深度，但考慮抬升高度下水窪最底緣深度最深的為 p4，其次為 p3，與無限制環下深度相近，比無限制環者淺的為 p2 所形成的大氣泡。共通點為在顯著建設區的水窪最底緣深度均超過 10 mm，使得水窪受到較其他建設區更大的靜水壓力。

在水窪最大寬度的深度方面，均考慮平均深度，吾人分了兩種不同的計算方式， $D_{lc,tp}$ 為不考慮液面抬升，將限制環外水平液面當作零點，正值表示深度於水面下，負值表示深度於水面上； $D_{lc,tp}^*$ 表示考慮限制環內液面抬升高度，往下計算。由圖 4.3.1-1、圖 4.3.1-2 及圖 4.3.1-3 各圖(b)所示，先看 $D_{lc,tp}$ 隨著不同 h_t 的關係，可得知 p3 與 p4 水窪所形成最大寬度的深度值，在 $0 \leq h_t < 45 \text{ mm}$ 所形成的最大寬度的深度均在水上，代表 p3 與 p4 形成大氣泡時抬升高度大於 p2，如圖 4.3.1-2 (e)中(iii)~(v)所示。在 $h_t = 2、5 \text{ mm}$ 及 $h_t < 0 \text{ mm}$ ，其水窪最寬寬度的深度是在水面下，如圖 4.3.1-2 (e)中(ii)及(vi)所示。考慮限制環內液面抬升影響，可知在有限制環下，在相同的撞擊速度下，p3 及 p4 其最大寬度的深度($D_{lc,tp}^*$)與無限制環深度相近，撞擊速度越大深度越深，但是在 p2 的狀況，只有在 $h_t = 0 \sim 3 \text{ mm}$ 時 $D_{lc,tp}^*$ 較無限制環者高，其他上緣深度下所形成的最大寬度的深度值均

小於無限制環者，此現象與圖 4.2.3-5 所呈現出的趨勢相符合，在有限制環下考慮其斷裂時刻的抬升高度，水窪的最大寬度深度值與無限制環者的相近，即斷裂時刻的自由液面到水窪最寬的深度值，與無限制環者的相近，則可產生建設性大氣泡，如果其 $D_{lc, tp}^*$ 小於無限制環者，則無法有建設性的影響。

以水窪最大寬度來說，如圖 4.3.1-1、圖 4.3.1-2 及圖 4.3.1-3，各圖(c)中 p3 與 p4 可知在無限制環的狀態下，均大於限制環 B 內直徑($D_i = 11 \text{ mm}$)，因此只有在 h_t 大於 45 mm 時，水窪未受到限制環全部侷限住，但是在 p2 加上限制環的效應下，其所形成的大氣泡最大寬度與無限制環者相近。

這說明了在有邊界限制環下，得考慮液面抬升的情況，當水窪發展至斷裂時刻，其最大寬度的深度值($D_{lc, tp}^*$)與無限制環相近者，則會造成建設性的影響，可形成比無限制環者較大的區域寬幅，當最大寬度的深度值小於無限制環者，則無法有建設性的影響。

4.3.2 破壞區成因

圖 4.1.1-1(f)、圖 4.1.1-2(e)與圖 4.1.1-4(c)皆破壞區域的大氣泡生成時序圖，當 $-7 \text{ mm} < h_t < -1 \text{ mm}$ 之時，如圖 4.2.1-11，表示環型結構已全部沒入水下，此值的大小則代表環上緣與水平面之間存在的自由空間大小，自由空間可視為流體壓力往徑向外釋放的所在，所以在此階段環型邊界的位置將逐步遠離水窪頸部位置，而使水窪頸部周圍的流體不再受環型限制產生往中心軸方向的作用力，反倒因為水窪下半部的擴張受到環型邊界的阻抗而抑制其向下成長，促使水窪強迫收縮而導致氣泡無法形成，由圖 4.3.2-1(a)可知不同的限制環長，亦會造成水窪侷限性的不同，由無限制環下的水窪斷裂時的最底緣平均深度($D_{c, tp}$)為 8.2 mm，此圖的條件為 $h_t = -2 \text{ mm}$ ，因此可知限制環 E 及限制環 F 的下緣深度分別為 6mm 及 4.2 mm，故水窪最底緣可穿過限制環下緣，如圖 4.2.1-4(c)及圖 4.2.1-5(e)所示，依然可造成大氣泡。由圖 4.3.2-1(b)可知水窪往下發展受侷限，因此水窪於水平面的

寬度($W_{c,l}$)會往徑向上擴張，限制環長度越長， $W_{c,l}$ 越大。另外藉由 $D_c / W_{c,l}$ 此無因次參數來表示水窪被破壞的程度，如圖 4.3.2-2，可知環長越短，其值會越接近無限制環下的水窪發展。

若此空間距離太小，如 $h_t > -1$ mm，壓力透過此自由空間的釋放程度有限，並不會對氣泡生成有太多阻礙，因而在環上緣位置進入破壞區之前，仍保有一小區塊的非破壞區，如圖 4.2.1-11，相反地，若水中的環頂緣位置距離水平面太大，如 $h_t < -7$ mm，此時的自由空間長度已遠遠大於無環狀態下本可擴張的水窪最大深度($D_{c,tp} \approx 8$ mm)，這意味著此時的水窪發展對於環型邊界的限制已近無響應，從圖 4.2.2-5 亦可證明此論點，可以觀察到此階段的水平面最大抬升高度也愈趨近於無環狀態者，所以氣泡生成的寬幅會隨著環型邊界與水平面間的距離愈大，與無環狀態者愈為靠近，如圖 4.2.1-9。

4.3.3 限制環環長的影響

由圖 4.2.3-5 可知不同液滴形狀參數 O_i 週期下，有一共通點為在環上緣與水平面切齊時，即 $h_t = 0$ mm 為最大的大氣泡建設深度，因此吾人針對此一深度做更深入的探討，吾人統整不同 O_i 週期下的大氣泡，所能形成的大氣泡寬幅增益，如圖 4.3.3-1，由圖可知在環長為 10 mm 之前，其大氣泡寬幅增益隨環長增加而增加，在 $l = 10$ mm 以後，其所形成的大氣泡寬幅增益均相近，且在環長為 10 mm 時有發現原本在沒有限制環下無法產生大氣泡，而加上限制環 A，上緣深度為零時，可於 O_{i_p1} 發現大氣泡的產生，如圖 4.3.3-2 所示，此為重大發現，找到最佳產生建設性的限制環位置，使得原本無法產生氣泡的低速區域(O_{i_p1})，可形成大氣泡，其中虛線為劃分 p1 至 p4 的週期範圍。

此圖 4.3.3-2 可代表將限制環上緣切齊水平液面，可使得要形成大氣泡的前提條件液滴要為倒三角形於低速區域將不見，液滴撞擊速度愈大，欲使水窪發展形成氣泡，對於液滴形狀的依賴程度就愈大，從無法產生大氣泡型態的黑色資料

點便可窺見，當液滴撞擊形狀為扁橢圓形之時($O_i < 1$)，撞擊速度若太大，將使水窪無法發展成為氣泡，原因在於扁橢圓形的液滴因其撞擊底面具有較大的曲率半徑，液膜抬升的角度會較朝徑向外擴展，液滴撞擊速度漸大會使扁橢圓形液滴導致的噴發液膜向外程度漸愈大，雖然造成抬升程度優於速度較低的扁橢圓形液滴，如圖 4.3.3-3，可發現於不論限制環長度大小，其撞擊速度越大，液面的最大抬升高度越高($h_{r,max}$)，此邊的 $h_{r,max}$ 為水窪斷裂前，液面抬升的最大高度，但因噴發液膜不是垂直向上發展而是像徑向外擴展，失去上下相反作用力的拉扯，反而導致液膜無法內縮形成氣泡；但是，若撞擊速度足夠小，抬升的液膜不會有溢出限制環外的情形發生，靠著表面波從撞擊點至限制環壁上的回彈，使流體向中心軸線集中流動，進而促使水窪上半部頸縮斷裂而形成氣泡。最後將歸納環長效應為，在 $l/d \approx 2$ 以後，會使得所造成形成大氣泡的範圍達最大，如圖 4.3.3-4 所示。

4.3.4 限制環環寬的影響

最後吾人選定液滴粒徑(d)為 3.76 mm，亦得知限制環長在 $l=10$ mm 以後，所產生的大氣泡增益值達穩定成長，因此選用限制環 G 其內直徑(D_i)為 7.84 mm，組合出 D_i^* 為 2.09 的無因次環內直徑，與 Zou et al.(2012) [19]所做的液滴粒徑相近來一比較，且可由圖 1.2-2 可以發現，在無限制環下液滴粒徑 3.76 mm，是無法產生大氣泡的範圍，可產生大氣泡範圍為 $4 < d < 8$ mm。吾人將用所發現於顯著建設區域內，最佳的建設性深度 $h_t = 0$ mm，將限制環 G 置於此位置下，來觀察其是否有大氣泡產生。如圖 4.3.4-1 (a)所示，大氣泡分佈於形狀參數 O_i 振盪曲線上，可發現不論波峰($O_i > 1$)或波谷($O_i < 1$)均可產生大氣泡，大氣泡幾乎分佈跨越七個週期，呈現出連續式的分佈，這也代表了在此邊界限制下，要形成大氣泡的尖形液滴入水條件，已經不存在了，打破了大氣泡型態過往的生成規則。

而吾人想得知當 D_i^* 增大時會發生甚麼樣的變化，將液滴粒徑 3.76 mm，利

用限制環 A 來做為邊界限制，組合成 D_i^* 為 2.93 的無因次環內直徑，如圖 4.3.4-1 (b) 所示，可發現與圖 4.3.4-1 (a) 最大的不同點為波谷 ($O_i < 1$) 無法產生大氣泡，亦即液滴為扁形時無法形成大氣泡了，當限制環內直徑變大，其水窪形成過程中抬升高度較低，因此造成所能形成的大氣泡液滴外形條件變得較為嚴苛，但是在較高的液滴釋放高度下，還是可以產生大範圍的大氣泡寬幅。而利用限制環 C 來做小液滴實驗，所組成的 D_i^* 為 7.07，如圖 4.3.4-1 (c) 所示，在振盪曲線之波峰 ($O_i > 1$) 上均無法產生大氣泡，因此可知太大的 D_i^* 並無法造成有效建設性的影響。

將 $d = 3.76 \text{ mm}$ 所產生大氣泡的結果，繪製於圖 1.2-4 上與 Zou et al.(2012) [19] 做比較，如圖 4.3.4-2 所產生的大氣泡範圍遠大於 Zou et al.(2012) [19] 所能產生大氣泡的範圍，此結果顯示吾人所找到的邊界限制條件更有利於形成大氣泡，雖然 Zou et al.(2012) [19] 的邊界限制為將水窪形成過程均做限制，但是並非能產生最佳建設性的邊界限制條件，因為水窪於限制環形成過程中，限制壁面所帶給抬升的影響為阻抗，因此當限制環上緣與水平面切齊時，有最佳的建設大氣泡，因此可發現當 $D_i^* = 2.0$ 附近時， $d = 3.76 \text{ mm}$ 所產生的大氣泡範圍與 Zou et al.(2012) [19] 所形成的不同為，不是以間斷式的產生大氣泡，而是連續性的產生，因此打破了大氣泡型態過往的生成規則，在型態液滴圖中不再遵守間斷式分布，可以連續式呈現，如圖 4.3.4-3。



4.3.5 回縮時間的比較

由大氣泡時序圖如圖 3.1-3 可知，大氣泡的產生原因為水窪底部往下延伸，動量往下傳遞，而頸部附近的水窪往中心軸頸縮，動量往中心集中，因此吾人分析無限制環狀態下，水窪的特徵時間點，定義有大氣泡下參數分別有 $t'_{Dc,m}$ ：產生的大氣泡底緣傳遞至最深所對應的時間； t_p ：水窪的斷裂時間； t_{ni} ：水窪初始產生頸部的時間，此邊有產生大氣泡的液滴粒徑為 5.65 mm。定義無產生大氣泡下參數分別有 $t'_{Dc,m(N)}$ ：水窪傳遞至最深所對應的時間； $t_{n,min(N)}$ ：水窪頸部達最小寬度的時間； $t_{ni(N)}$ ：水窪初始產生頸部的時間。因此可知道有/無大氣泡產生，水窪底部由撞擊液面往下至最深的時間，水窪頸部頸縮所花的時間，如圖 4.3.5-1 所示，可發現在有大氣泡產生的情況下，頸部頸縮的時間隨速度愈快，其所花的時間愈短，但是無大氣泡產生大部分情況是，水窪頸部一旦形成，其寬度隨時間愈來愈大，即初始的頸部寬度為水窪最小寬度；而以 $t'_{Dc,m}$ 來說發現了有趣的現象，有大氣泡產生時大氣泡傳遞至最深的時間，大致上隨著速度愈大，時間愈短，相對於沒有大氣泡產生時，水窪所能傳遞最深時間($t'_{Dc,m(N)}$)卻是不隨速度而變化，大致為相近的時間，且液滴粒徑愈小，其時間愈小。

由圖 4.3.5-2 可知，在有產生大氣泡的情形下，水窪頸縮時間與水窪往向下傳遞之比例，在時間軸來看約為 50 %，隨著速度越快，其比例越小，以撞擊速度 1.75 m/s 來看，可縮小至約為 20 %。考慮在有限限制環下，如圖 4.3.5-3 所示，可觀察出不同的液滴粒徑的斷裂時間差異，但相同的趨勢為高/速度越大，大氣泡所產生頸縮為零(斷裂)的時間越快，這也說明了頸縮時間隨撞擊速度越大，其時間越短。不同點為不同的液滴粒徑下，大液滴粒徑所形成的斷裂時間，均比小液滴粒徑來得更快。

第五章 結論

本文以液滴撞擊有邊界之液面，來探討水中大氣泡的生成過程中，於不同位置下的邊界限制會產生兩大不同的影響，分別為大氣泡建設區與大氣泡破壞區，透過參數比較與定量分析，來得知有無邊界限制下，大氣泡水窪發展的差異性，得知邊界效應對於大氣泡的確切影響，並且可解釋邊界限制所產生的建設性與破壞性。以相同液滴粒徑、不同液滴撞擊速度、不同限制環長度與內直徑，以及改變限制環的下/上緣深度，針對所產生的大氣泡區域寬幅變化，水窪發展與聲壓特徵點對應關係進行一系列之探討，得到以下結論：

- 一、將限制環置於初始頸部深度(D_{ni})，有限制環下形成的大氣泡(Large bubble)在液滴形狀參數(e 及 O_i)或速度分布範圍比無邊界限制的大氣泡來得廣，且在液滴形狀參數 O_i 第三週期所產生的大氣泡比第二週期明顯。
- 二、經由實驗的驗證，得知液滴產生週期越大，液滴粒徑越小，會造成液滴振盪週期減小，致使液滴振盪曲線往左平移；當液滴產生週期越小，液滴粒徑會越大，造成液滴振盪週期增大，使得液滴振盪曲線往右平移。在本實驗中有發現大氣泡產生範圍的液滴撞擊高度/速度位置會有不同的原因，為不同的液滴產生週期造成液滴重量有些微變化(1%以內)，導致振盪曲線偏移，且考慮不同液滴產生時間下，造成大氣泡寬幅的差異，由結果顯示在液滴產生週期固定使用120s/drop以後，會有比較穩定的大氣泡寬幅。
- 三、吾人為了實驗的可重複性與可現性，架設液滴與目標水池恆溫裝置，來使得液滴與目標水池內流體，溫度固定在27.1度，溫差變化量在 ± 0.3 度以內，經由實驗驗證，在此差溫變化量下，所得到的大氣泡寬幅重複性很高。
- 四、由聲壓訊號與大氣泡水窪發展的時序圖可得到，水窪的動態發展與聲壓特徵點的關係，其中 I_m 點為液滴入水時間為時間零點，水窪開始以鈍體外型向下延伸，直到 D 點時為整段聲壓的最高點，此時對應為水窪底部周圍

往上捲的起始時間點，P 點為聲壓最低點，此時對應水窪底部與大氣泡斷裂點，在 P 點時間點以後，聲壓會有振盪的情況發生，為大氣泡斷裂形成的氣泡振盪行為。經由 D 點特徵時間點可知水窪開始往上捲的時間，由 P 點特徵時間點可知上下半部水窪斷裂的時間，也就是大氣泡的斷裂時間。

- 五、有無限制環下的大氣泡水窪發展定量分析可知，在底部擴張區(lower cavity)擴張情況均不一樣，有三個特徵階段(1)擴張初期，撞擊速度越大，底部擴張區水窪發展越早擴張，且擴張起點深度越淺 (2)擴張中期，最大寬度增加幅度比最大寬度所對應的深度還快，即底部擴張區水窪往徑向擴張程度大於往軸向下沉 (3)擴張後期，最大寬度所對應的深度增加幅度比最大寬度還快，即底部擴張區水窪往軸向下沉的發展比徑向的擴張來得多，總結為在底部擴張區水窪會有兩段轉折：1.為中期開始往徑向擴張，2.為後期減緩擴張，開始往下延伸。
- 六、為了得知最佳的大氣泡建設區，改變限制環位置，發現不同的邊界限制下，帶給大氣泡分別有建設性影響與破壞性的影響。將不同環長(1)與在不同限制位置，所造成的大氣泡區域寬幅變化(ΔHB)得到，三大區域：建設區、顯著建設區和破壞區。建設區與顯著建設區的劃分為 $h_{r,tp} - h_t > 0$ ，即有出現斷裂時刻液面抬高度超過限制環上緣深度時，開始產生顯著顯著建設區。
- 七、建設區域成因為當目標流體受環型邊界限制時，液滴撞擊後將使目標流體的動量無法往外釋放，只能將動量反向傳遞，往限制環中心的水窪低壓處進行擠壓，此舉促進頸部斷裂的可能，使得上下半部的水窪會越容易斷開，因此此區域的大氣泡斷裂時間均小於無限制環者。
- 八、顯著建設區域成因為當液滴撞擊至有邊界限制的水體區域時，水平面會有明顯的抬升運動，水平面的抬升不僅使水窪受到更大的靜水壓力，也會使水窪除了擁有向下擴張的運動外，同時受到抬升液面向上拉伸的影響，在上下兩相反的作用力拉扯水窪的情況下，氣泡的產生將多了一份額外的助

力進而切斷水窪頸部而達成。

- 九、 在有邊界限制環下，得考慮液面抬升的情況，當水窪發展至斷裂時刻，其最大寬度的深度值($D_{lc*,tp}$)與無限制環相近者，則會造成建設性的影響，可形成比無限制環者較大的區域寬幅，當最大寬度的深度值小於無限制環者，則無法有建設性的影響。
- 十、 破壞區成因上緣深度可視為流體壓力往徑向外釋放的所在，所以在此階段環型邊界的位置將逐步遠離水窪頸部位置，而使水窪頸部周圍的流體不再受環型限制產生往中心軸方向的作用力，反倒因為水窪下半部的擴張受到環型邊界的阻抗而抑制其向下成長，促使水窪強迫收縮而導致氣泡無法形成，且所形成的大氣泡斷裂時間會較無限制環者長。
- 十一、 藉由最佳的建設性的上緣深度，將限制環 A 置於此上緣深度，發現原本在無限制環下無法產生大氣泡 O_{i_p1} ，發現大氣泡的產生，此為重大發現，找到最佳產生建設性的限制環位置，使得原本無法產生氣泡的低速區域(O_{i_p1})，可形成大氣泡。
- 十二、 找到最佳建設性邊界限制條件，使得於小液滴粒徑 $d = 3.76 \text{ mm}$ 所產生的大氣泡範圍，不是以間斷式的產生大氣泡，而是連續性的產生，因此打破了大氣泡型態過往的生成規則，在型態液滴地圖中不再遵守間斷式分布，可以連續式呈現。
- 十三、 以時間軸來看，大氣泡水窪發展的頸縮時間占水窪向下發展比例約為 50%，隨著撞擊速度越大，其比例可縮小約為 20%，因此可知撞擊速度越大，水窪頸縮的時間所占比例越短。



圖

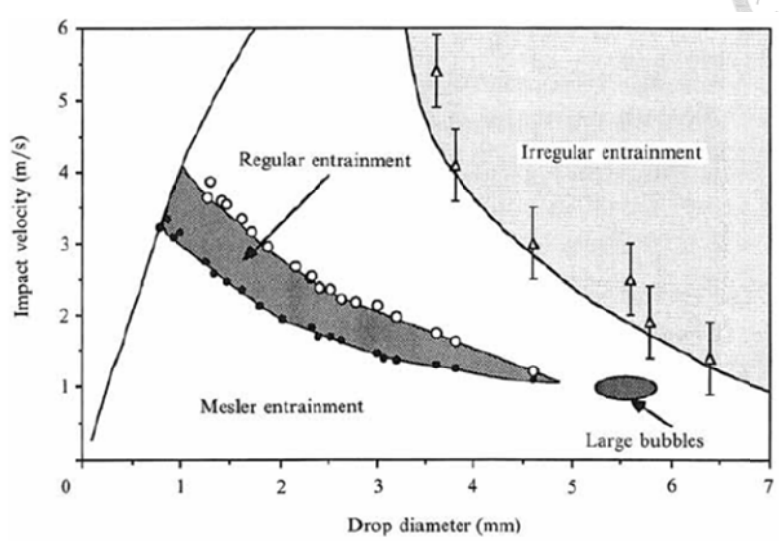


圖 1.2-1 液滴撞擊型態 V-d 圖[10]

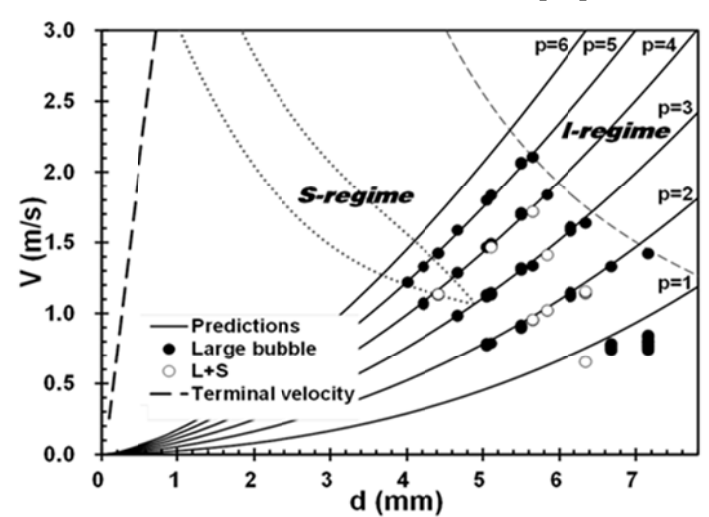


圖 1.2-2 不同液滴粒徑與撞擊速度的撞擊型態圖[25]

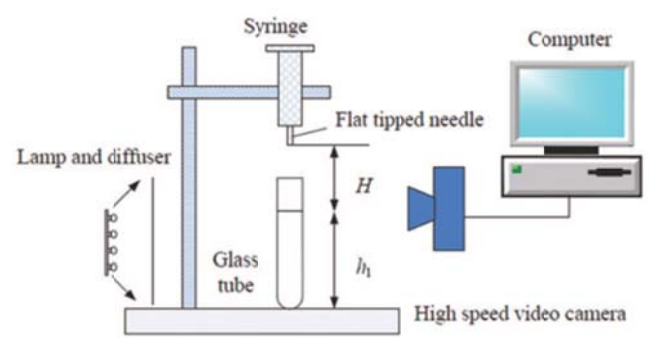


圖 1.2-3 Zou et al.(2012)對有邊界限制下大氣泡(Large bubble)的實驗架設圖[19]

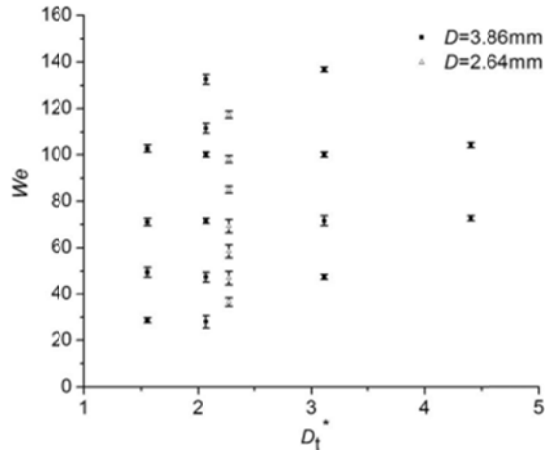


圖 1.2-4 邊界限制下大氣泡 We 對 D_1^* 實驗結果圖[19]



圖 1.3-1 限制頸部產生區邊界與限制底部擴張區邊界示意圖

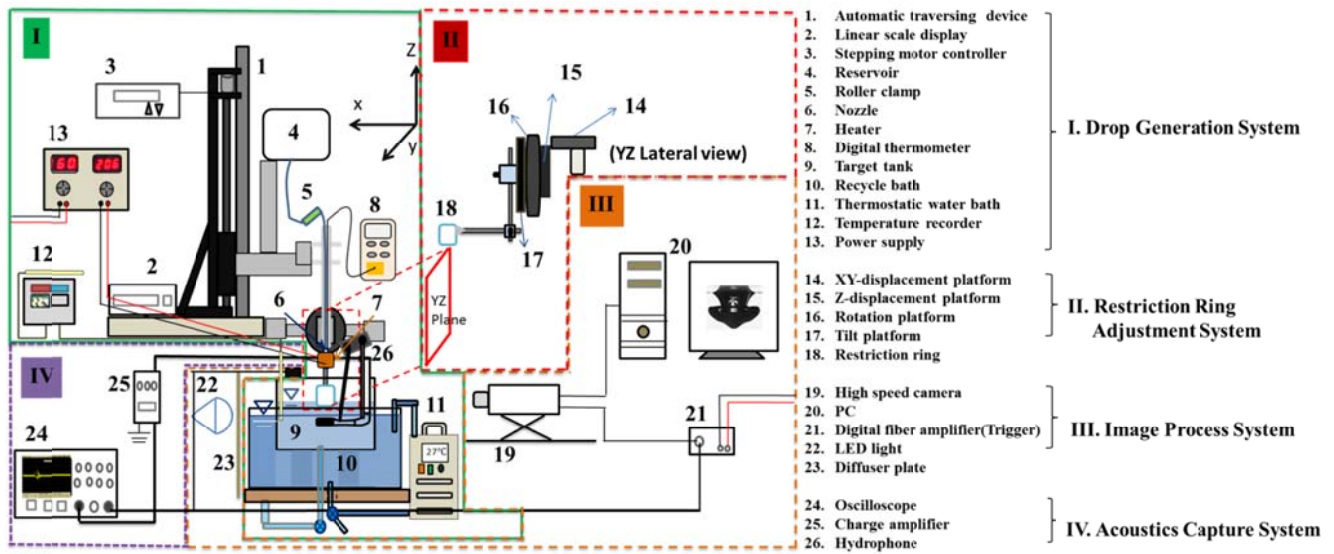


圖 2-1 實驗架設圖

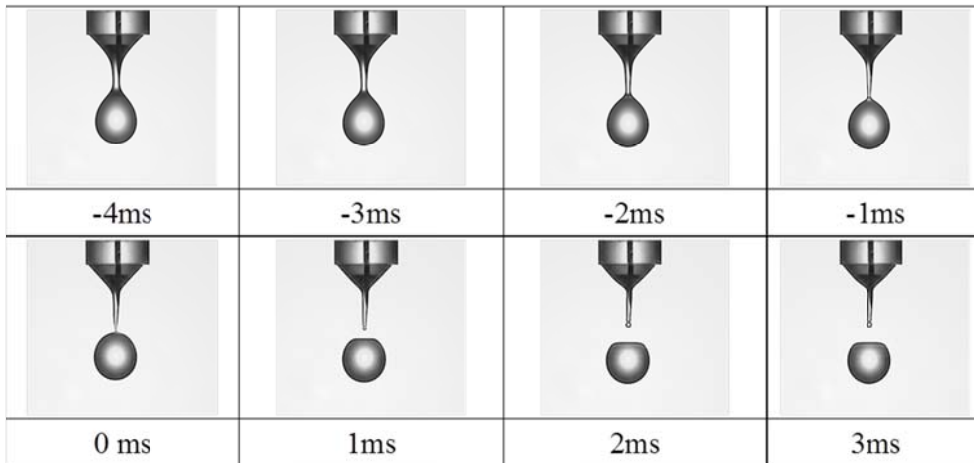


圖 2.2.2-1 無衛星液滴產生之影像

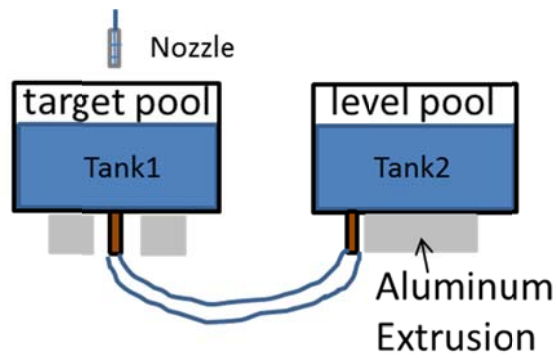


圖 2.2.4-1 水槽裝置與調整水平液面槽示意圖

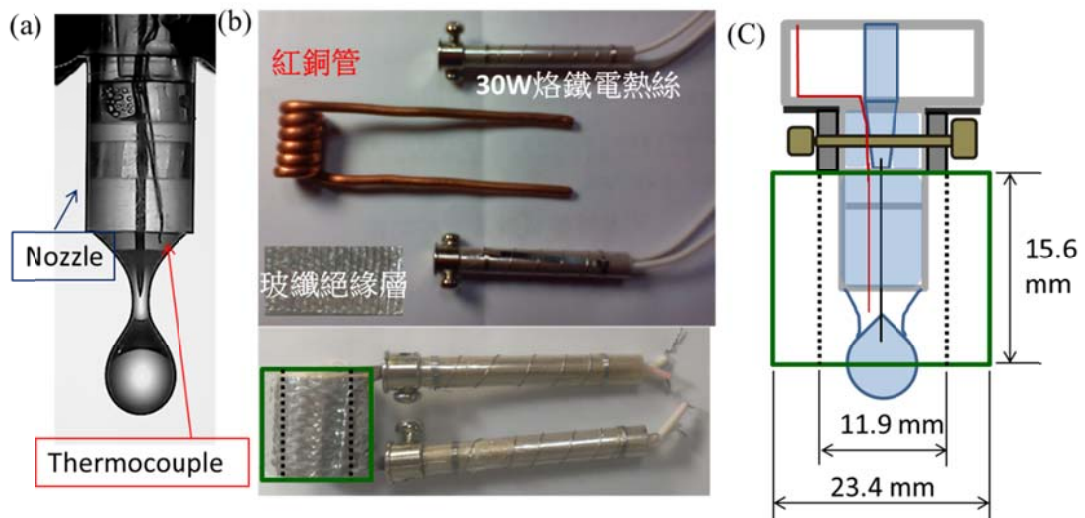


圖 2.2.5-1 滴恆溫架設(a)液滴溫度量測實體圖(b)自製加熱器(c)液滴滴頭與加熱器組合圖

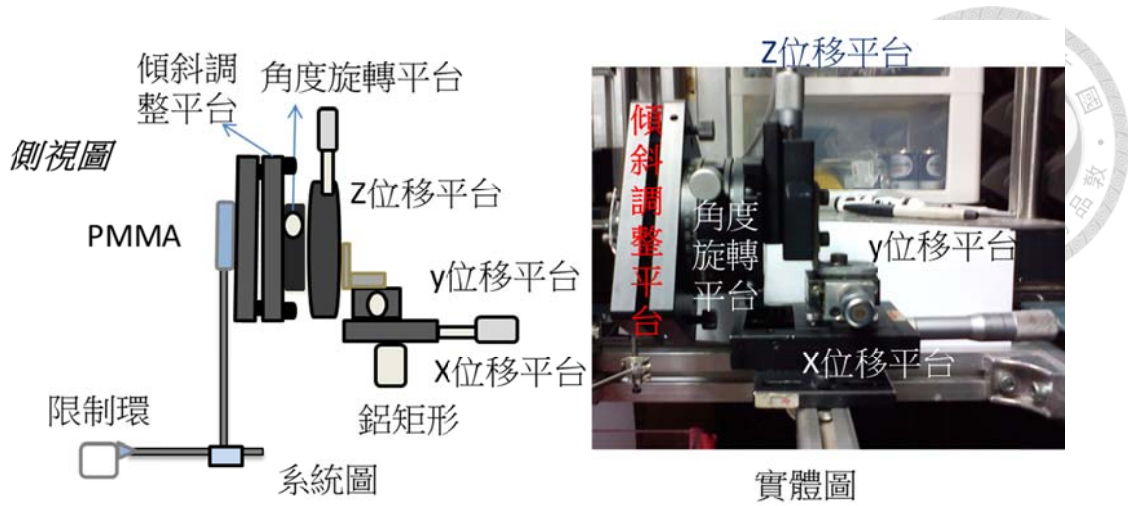


圖 2.3.1-1 夾置具微調裝置

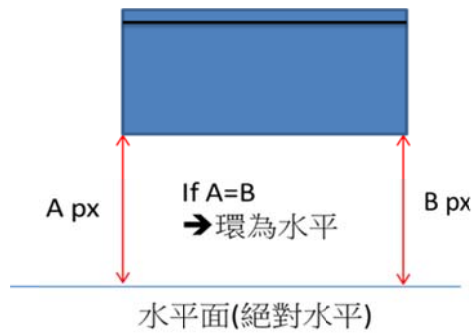


圖 2.3.3-1 限制環水平度調整示意圖

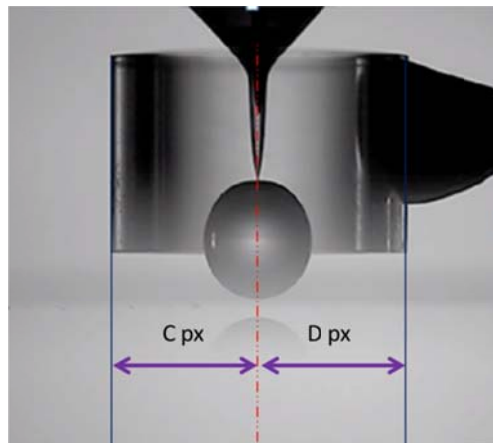


圖 2.3.3-2 限制環中心線調整實驗圖

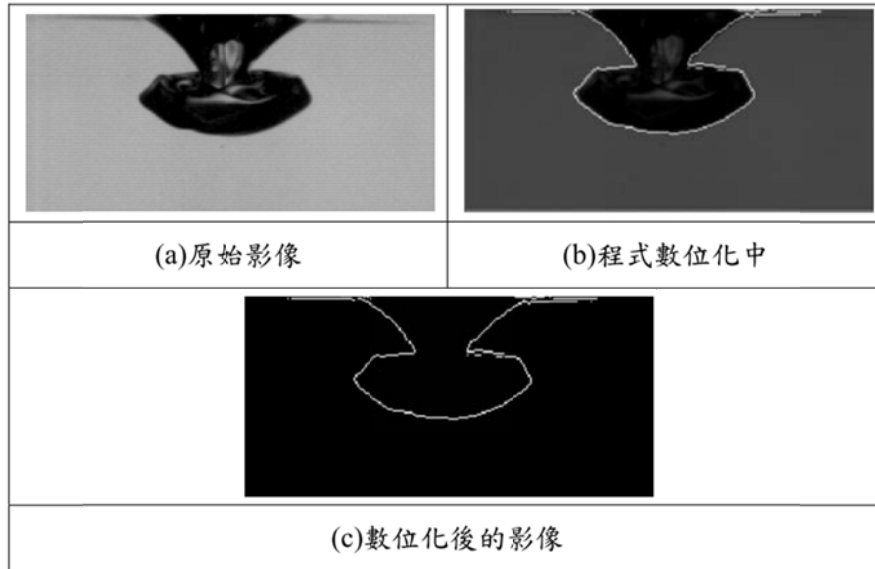


圖 2.4.4-1 撞擊產生水中大氣泡型態的水窪數位化過程[25]

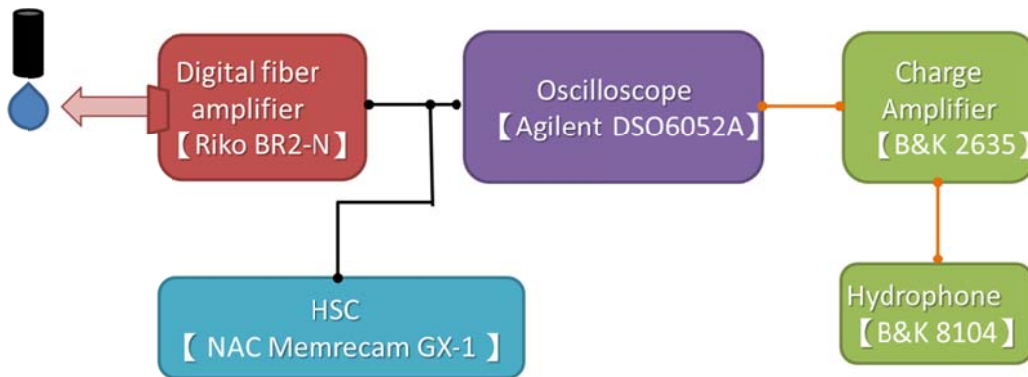


圖 2.5-1 聲音擷取系統圖

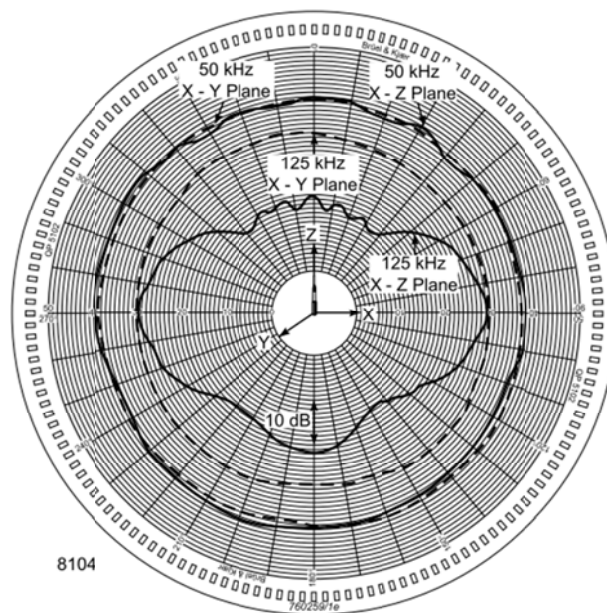


圖 2.5.1-1 B&K 8104 水下麥克風傳聲指向性(麥可風頭指向方向為負 Z 方向)

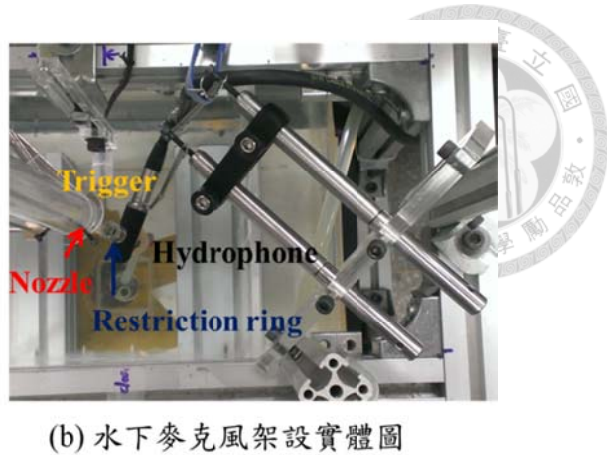
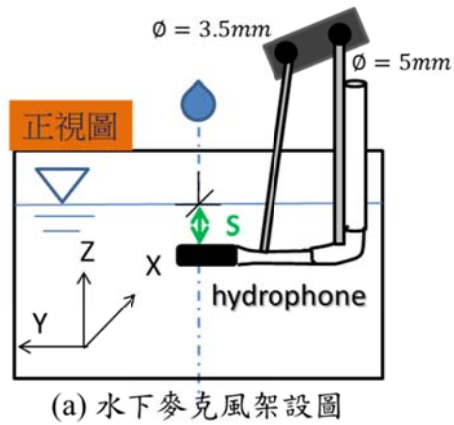


圖 2.5.1-2 水下麥克風與液滴撞擊點相對位置圖

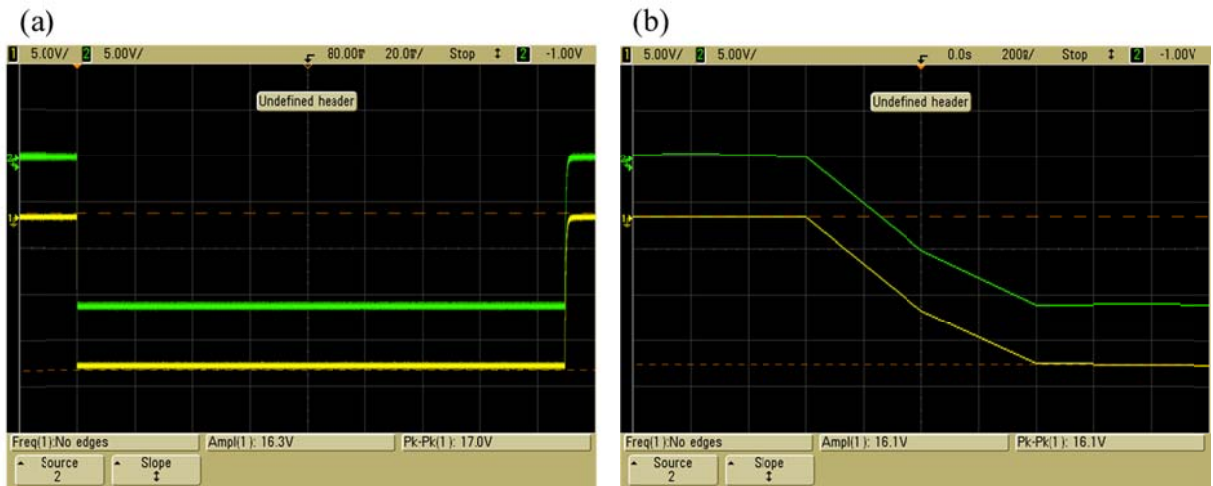
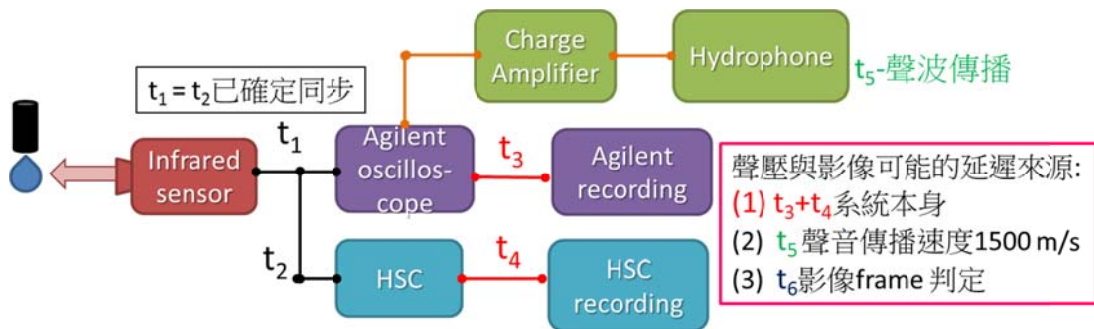


圖 2.5.3-2 觸發訊號至示波器與高速攝影機為同步訊號

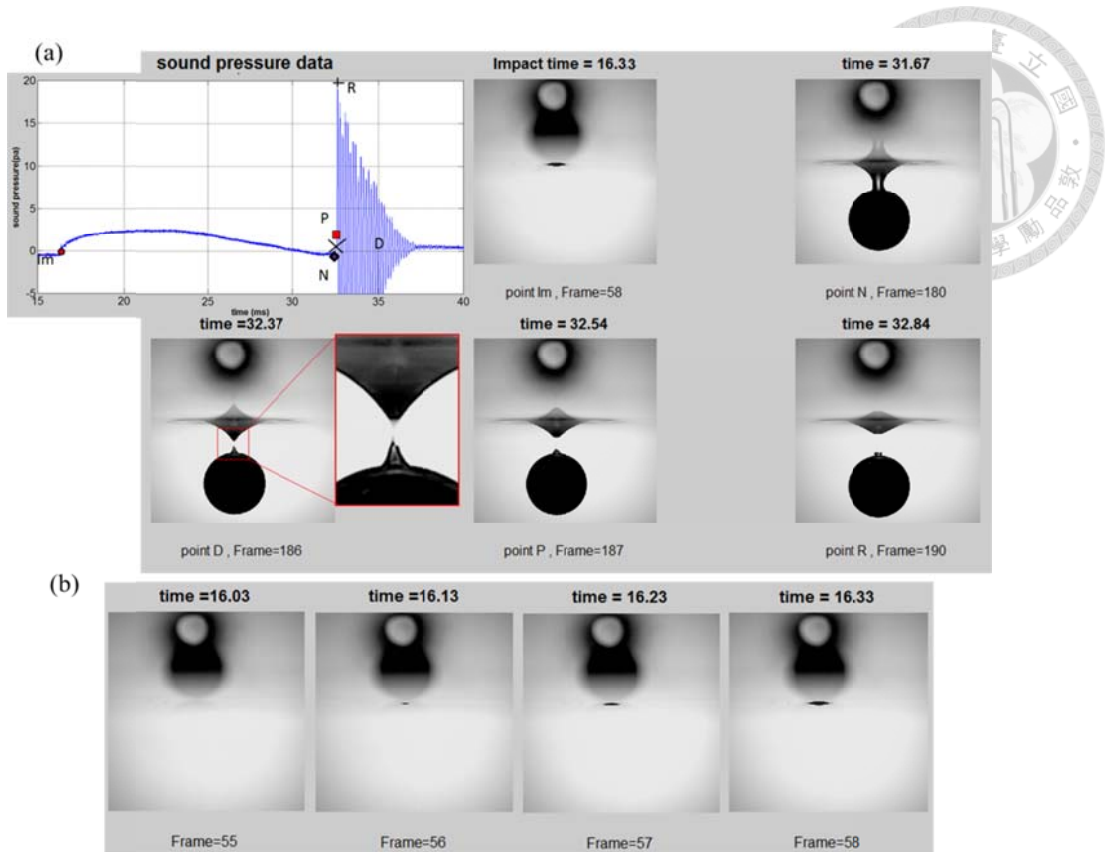


圖 2.5.3-3 直徑 10 mm 小鋼球，高度 45mm，(a)撞擊至深液的聲壓與影像對應圖
(b)撞擊點影像隨時間推演關係圖

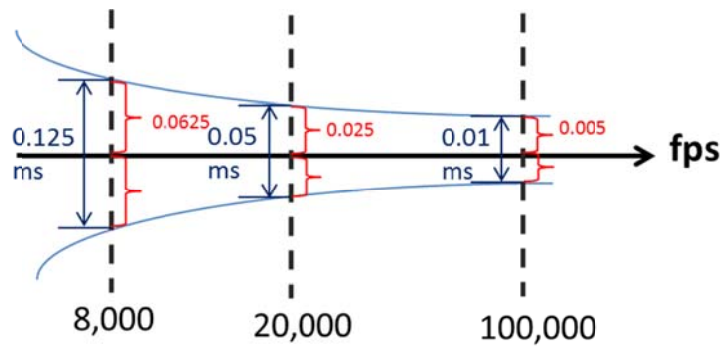


圖 2.5.3-4 不同拍攝速度(frame rate)下的判定影像的時間誤差

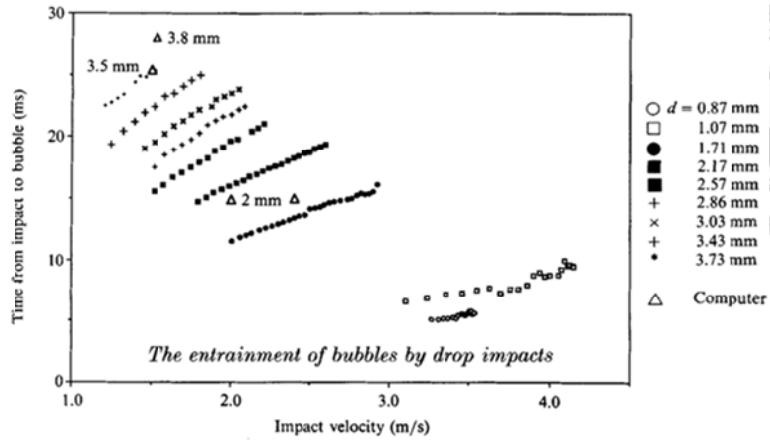


圖 2.5.4-1 各種液滴粒徑規則型態氣泡斷裂時間[10]

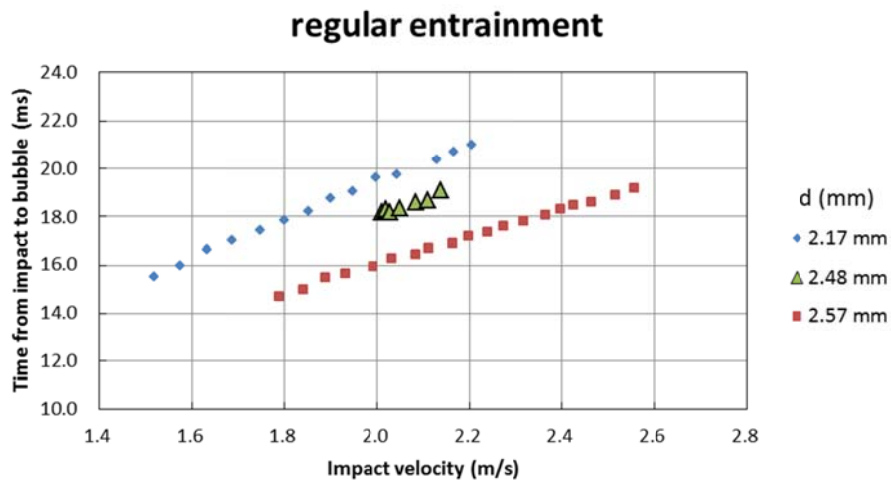


圖 2.5.4-2 $d = 2.48$ mm 規則型態氣泡斷裂時間與 Pumphrey & Elmore (1990)比較

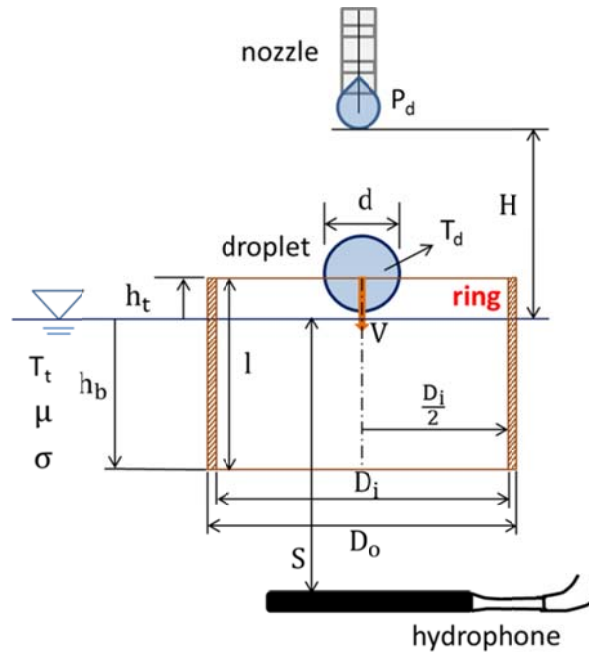
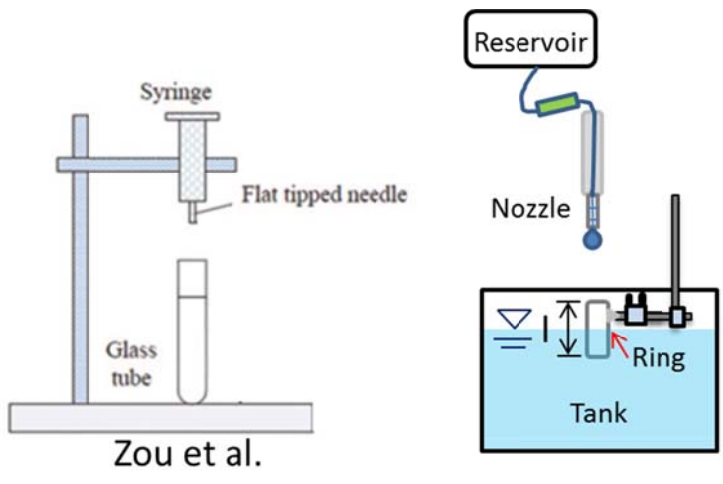


圖 3.1-1 實驗控制參數示意圖



Zou et al.

圖 3.1-2 液滴撞擊至邊界限制比較示意圖

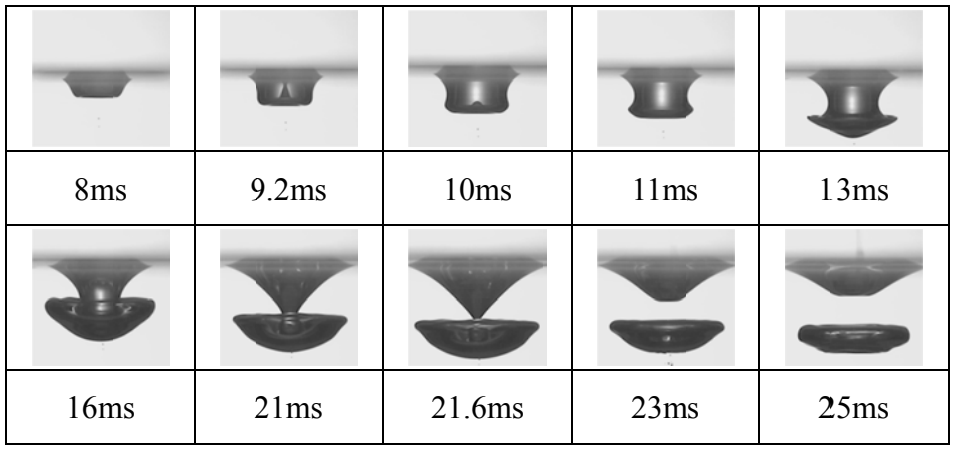


圖 3.1-3 液滴撞擊產生大氣泡之時序圖($d = 5.65\text{mm}$, $V = 0.92\text{m/s}$)

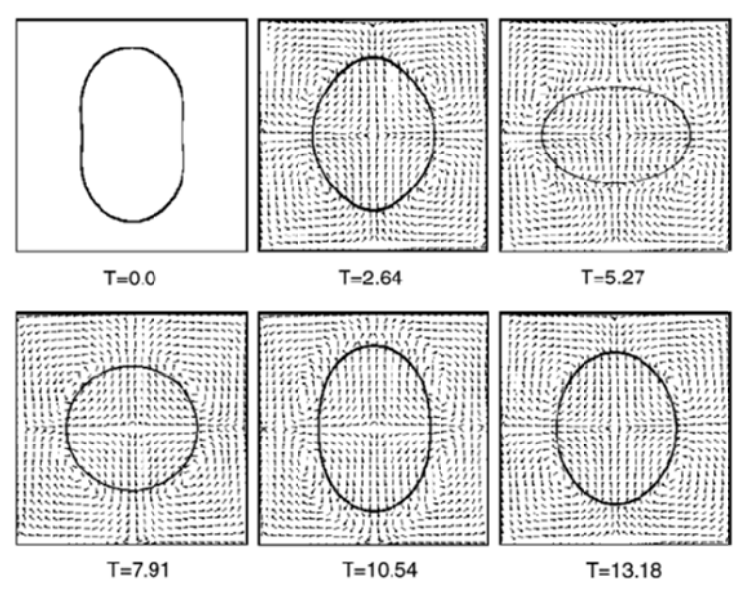


圖 3.2-1 振盪模態為二階($n=2$)的液滴振盪行為模擬[24]

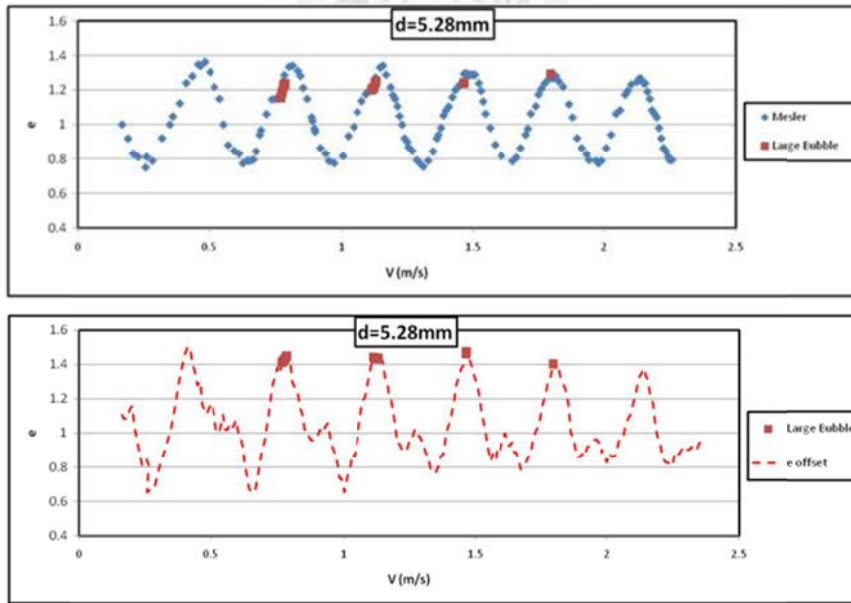


圖 3.2-2 以液滴直徑 5.28mm 觀察液滴形狀參數對應大氣泡發生位置[25]

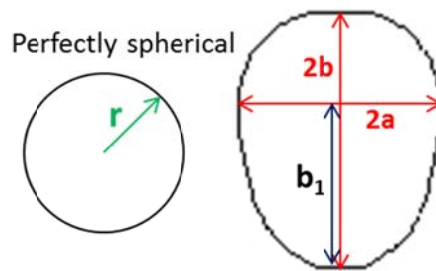


圖 3.2-3 液滴形狀參數示意圖

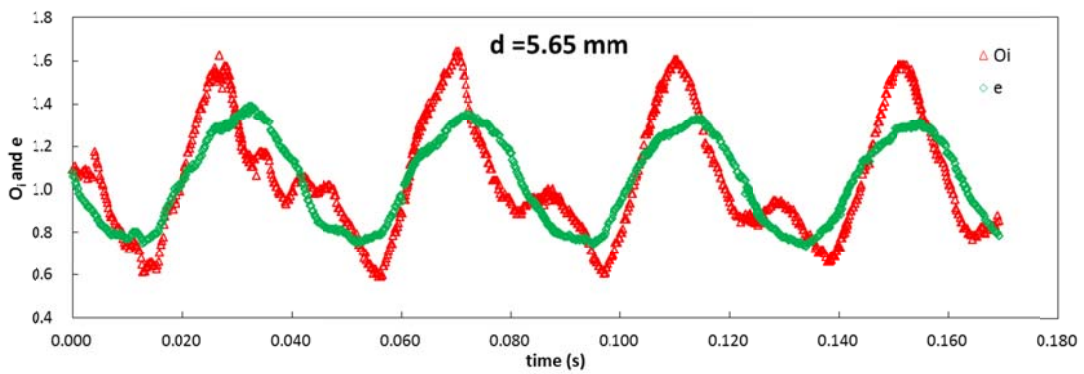


圖 3.2-4 液滴形狀參數(O_i 及 e)與水面上型態相對液滴撞擊時間的變化圖

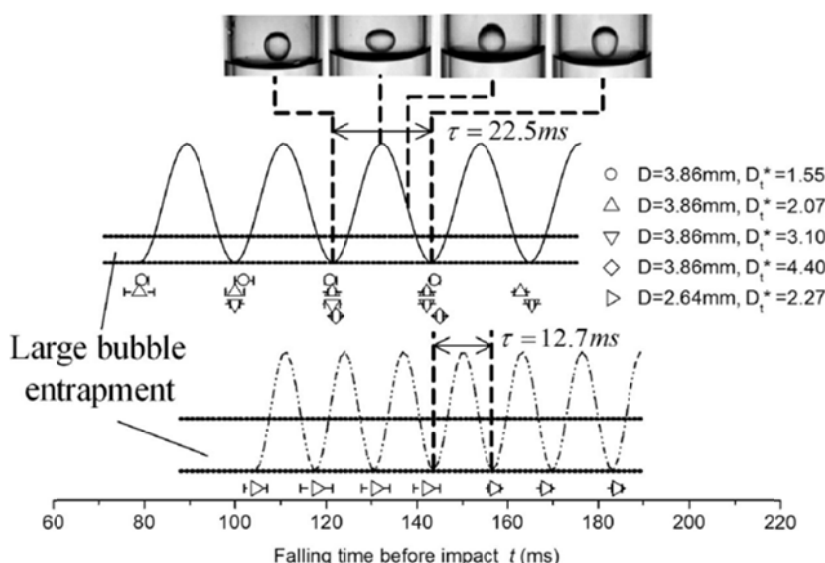


圖 3.2-5 不同 D_i^* 下大氣泡於液滴形狀參數(e)的發生分布圖[19]

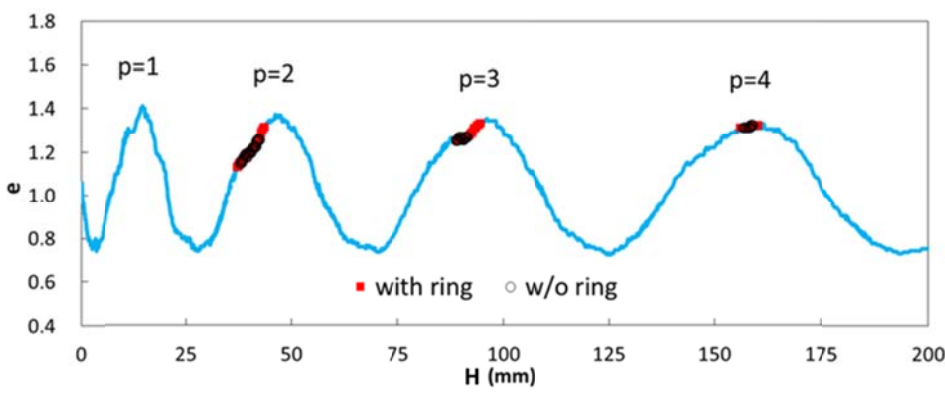


圖 3.2.1-1 液滴形狀參數 e，釋放高度(H)與大氣泡發生在有無限制環之關係圖

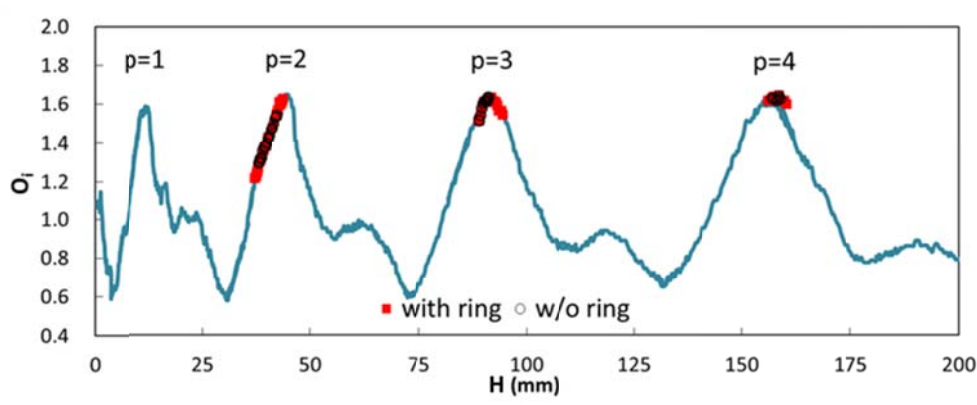


圖 3.2.1-2 液滴形狀參數 O_i ，釋放高度(H)與大氣泡發生在有無限制環之關係圖

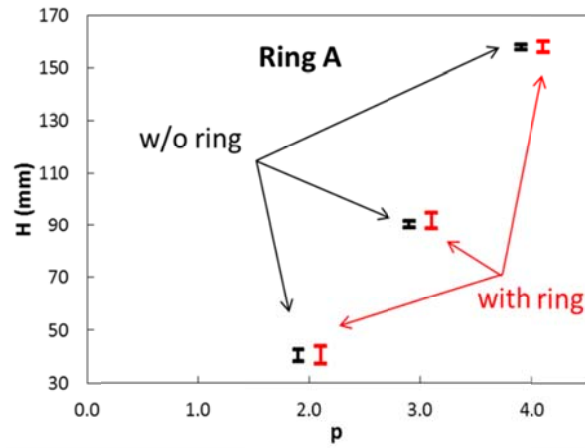


圖 3.2.1-3 液滴釋放高度可產生大氣泡區域在有無限制環與液滴振盪週期之關係

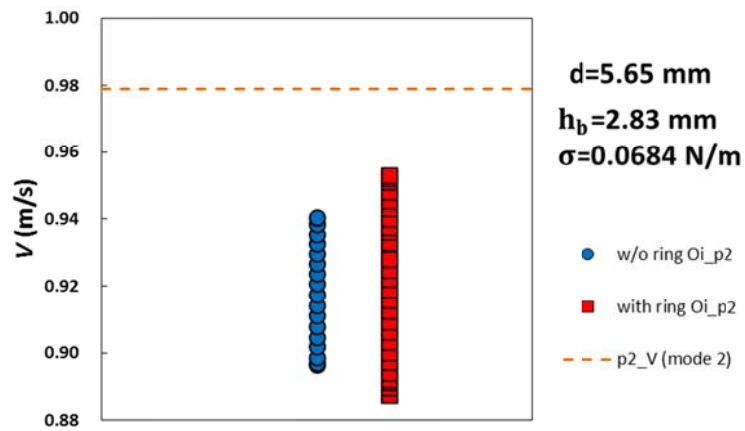


圖 3.2.2-1 液滴振盪參數 O_i 於第二週期(p_2)有無限制環產生大氣泡速度比較圖

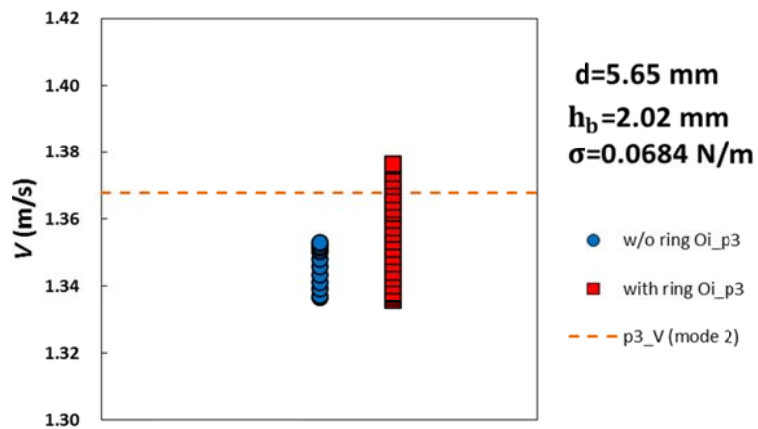


圖 3.2.2-2 液滴振盪參數 O_i 於第三週期(p_3)有無限制環產生大氣泡速度比較圖

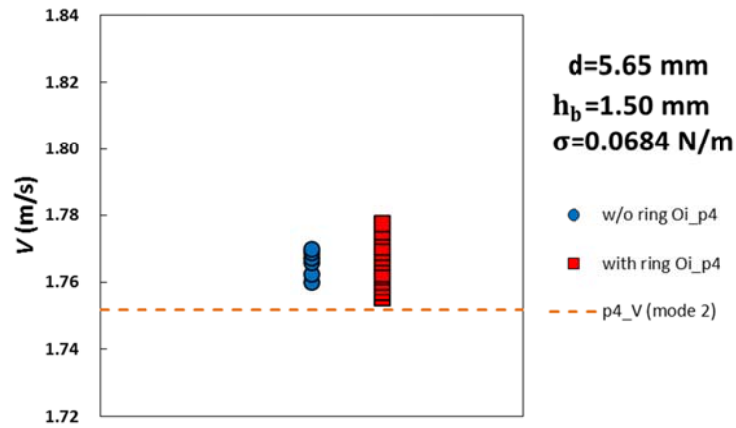


圖 3.2.2-3 液滴振盪參數 O_i 於第四週期(p4)有無限制環產生大氣泡速度比較圖

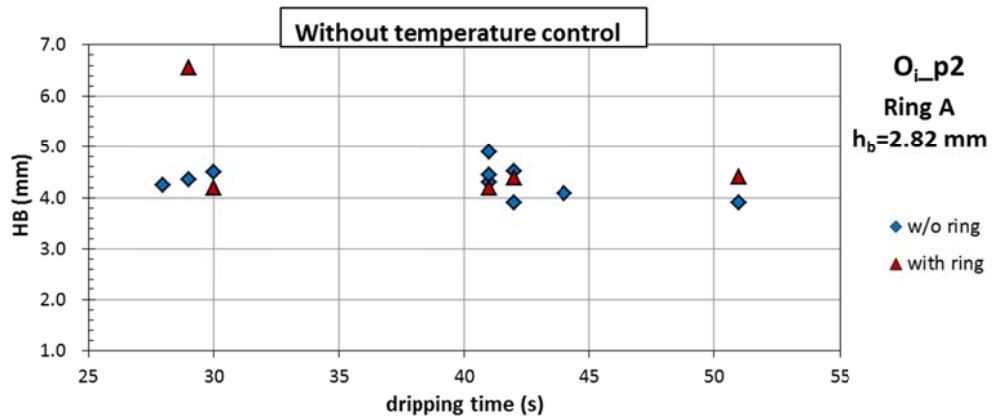


圖 3.2.2-4 O_i _p2 有無限制環大氣泡產生區域寬幅比較圖

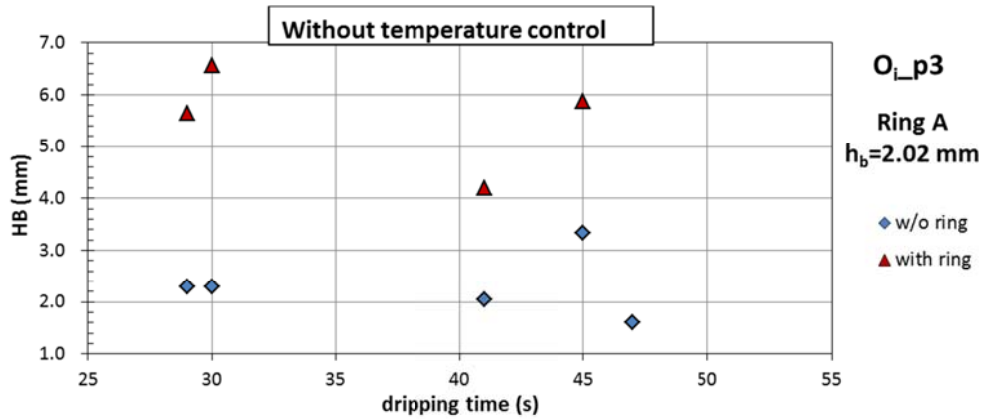


圖 3.2.2-5 O_i _p3 有無限制環大氣泡產生區域寬幅比較圖

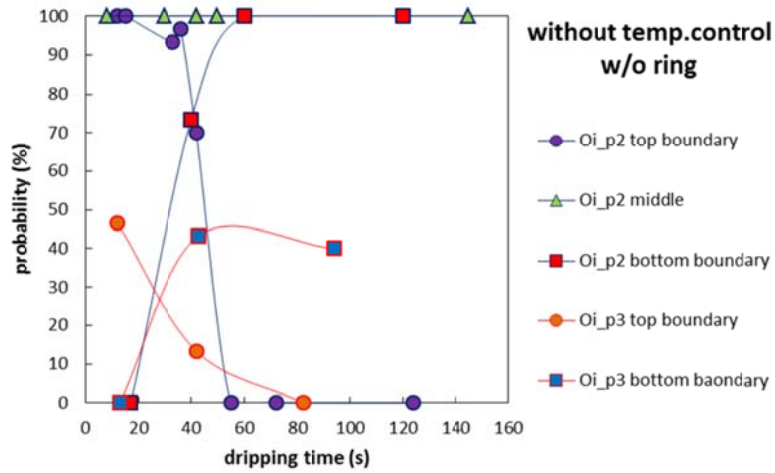


圖 3.3-1 沒有限制環的條件下，大氣泡形成機率與液滴產生時間的關係

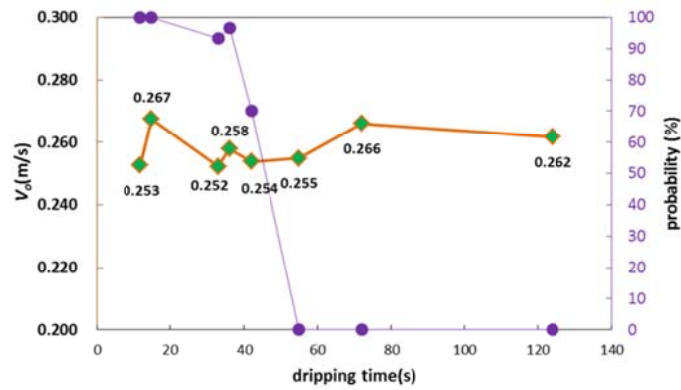
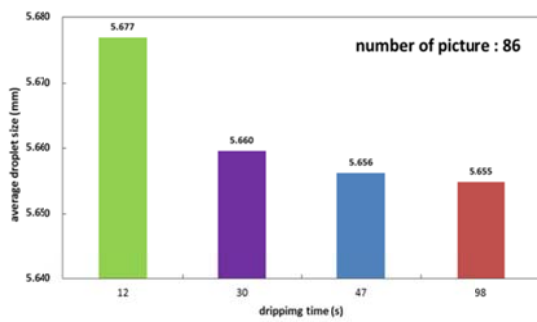
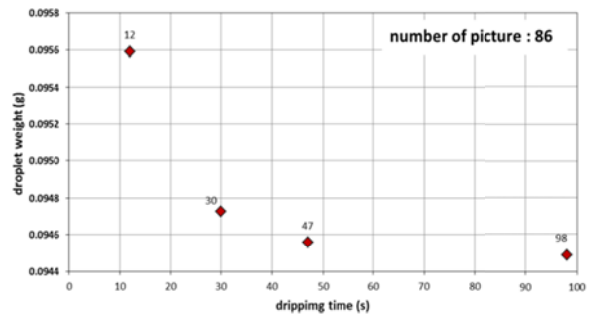


圖 3.3.1-1 不同的液滴產生時間之機率變化與其液滴的初始速度關係圖



(a) 不同液滴產生時間的平均液滴粒徑



(b) 由液滴平均粒徑推得液滴重量

圖 3.3.1-2 不同的液滴產生時間與液滴尺寸參數之關係

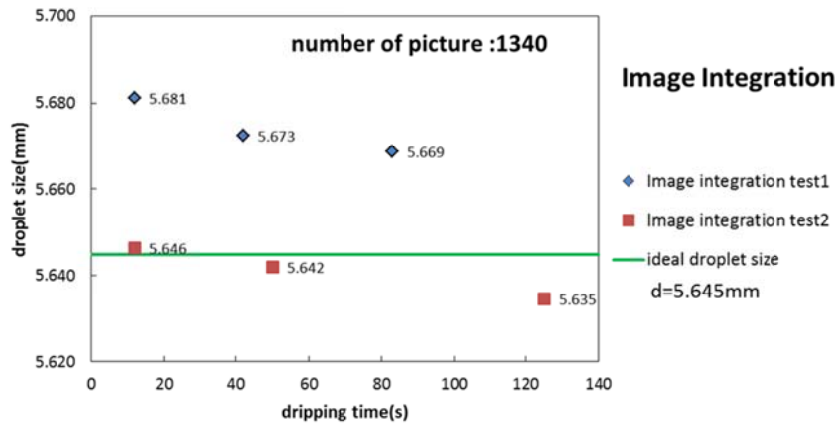


圖 3.3.1-3 不同次實驗的平均液滴粒徑與液滴產生時間的關係圖

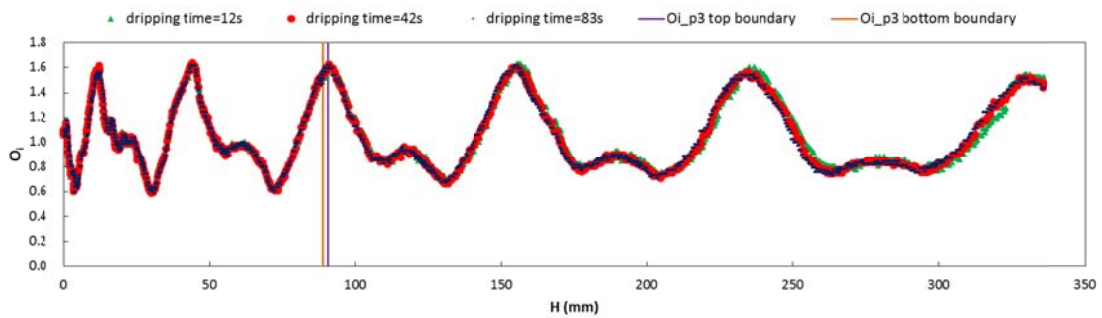
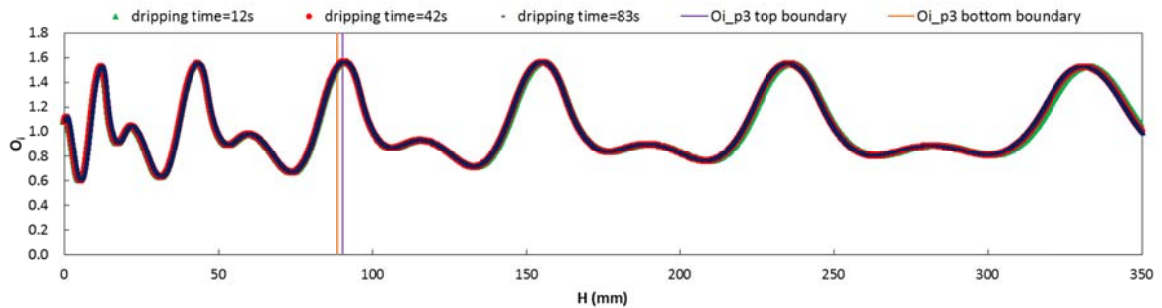
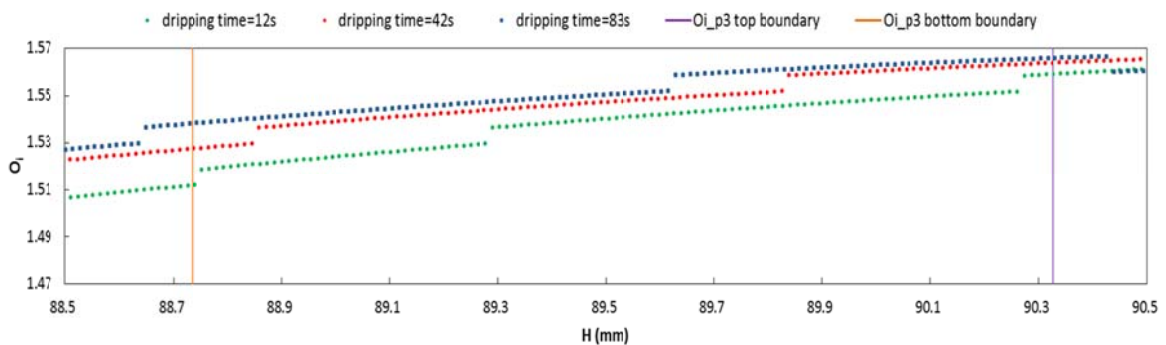


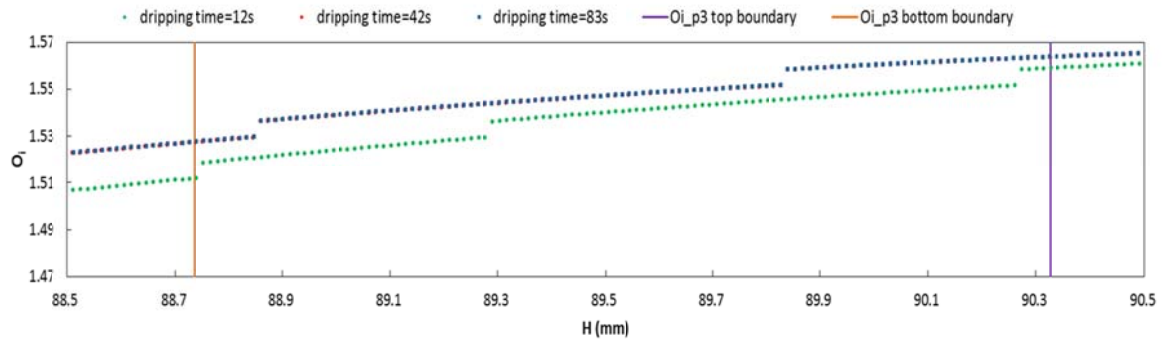
圖 3.3.1-4 不同液滴產生時間下液滴形狀參數 O_i 與釋放高度關係圖



(a) 不同液滴產生時間下液滴形狀參數 O_i 振盪擬合曲線



(b) 液滴形狀參數 O_i 振盪擬合曲線於大氣泡產生上下邊界範圍



(c) 將 dripping time = 83 s 平移至 dripping time = 42 s 振盪擬合曲線上

圖 3.3.1-5 不同液滴產生時間下液滴形狀參數 O_i 振盪擬合曲線

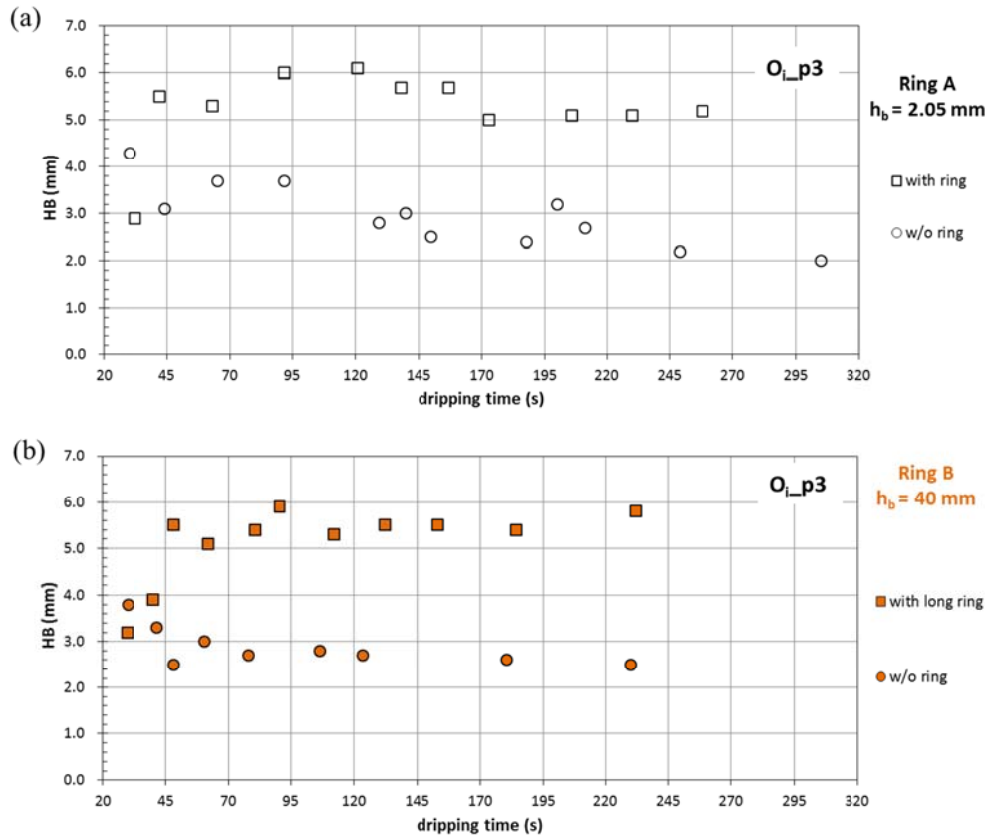


圖 3.3.2-1 不同的液滴產生時間所造成的大氣泡產生區域寬幅的變化

(a) 限制環 A、 $h_b = 2.05$ mm (b) 限制環 B、 $h_b = 40$ mm

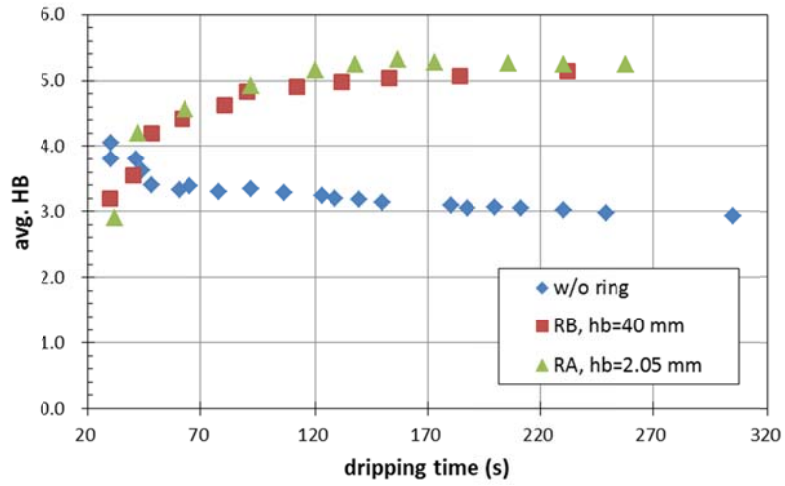


圖 3.3.2-2 不同液滴產生時間與平均大氣泡寬幅的關係圖

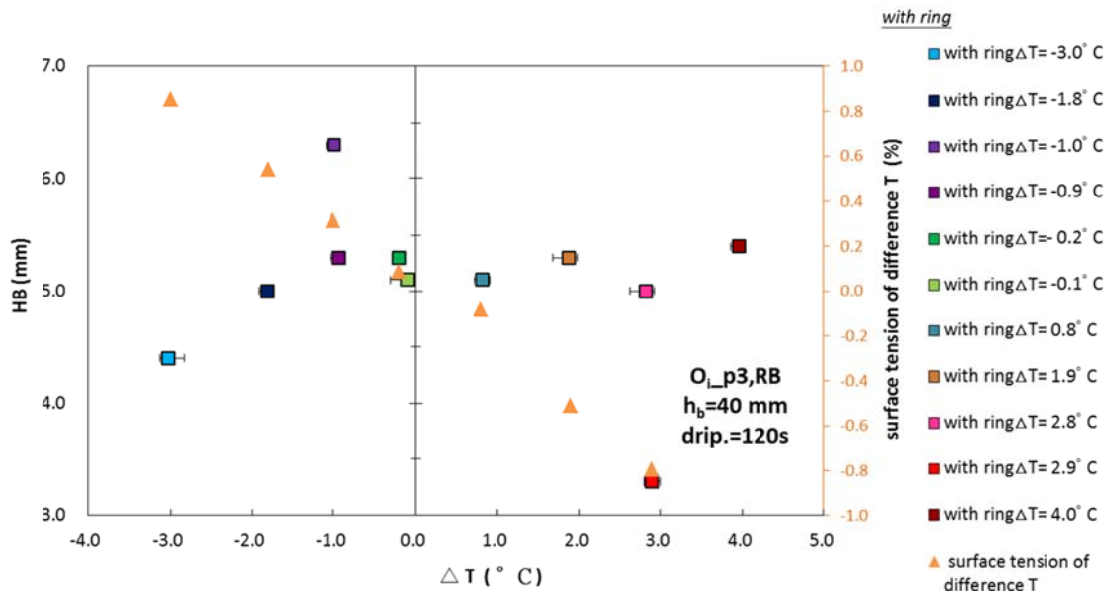


圖 3.3.3-1 不同溫差下大氣泡區域寬幅關係圖

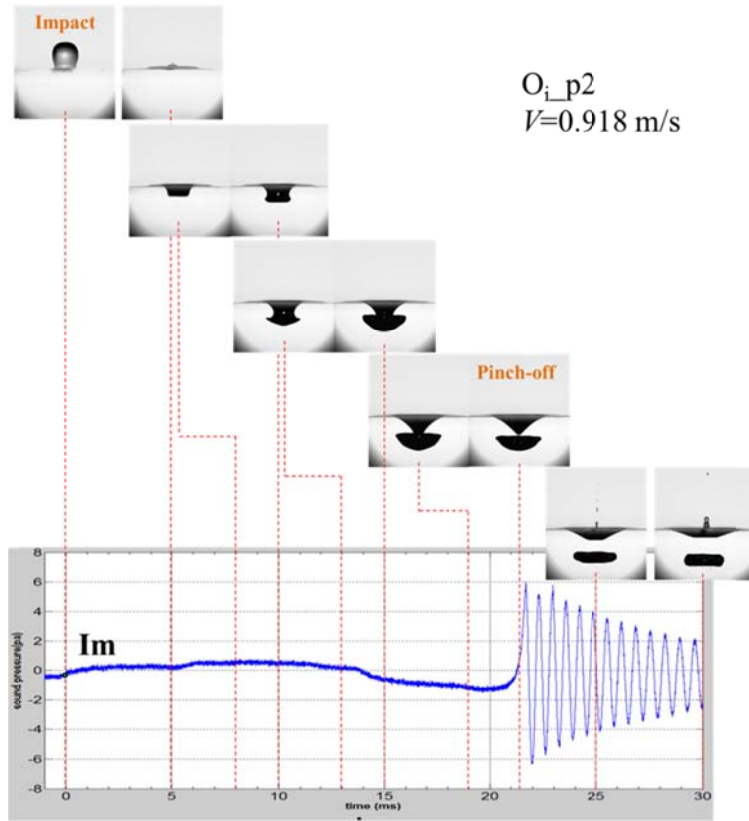


圖 4.1.1-1 O_{i_p2} , $V=0.918 \text{ m/s}$ 大氣泡水上與水下合併之時序圖

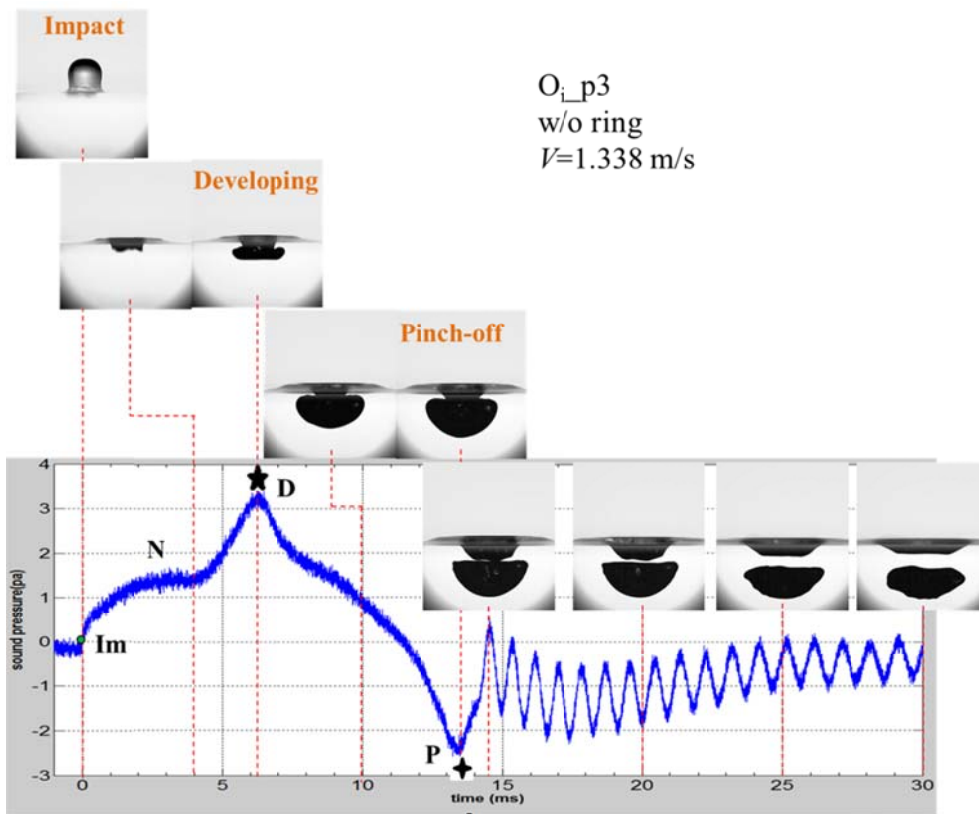


圖 4.1.1-2 O_{i_p3} , $V=1.338 \text{ m/s}$ 大氣泡水上與水下合併之時序圖

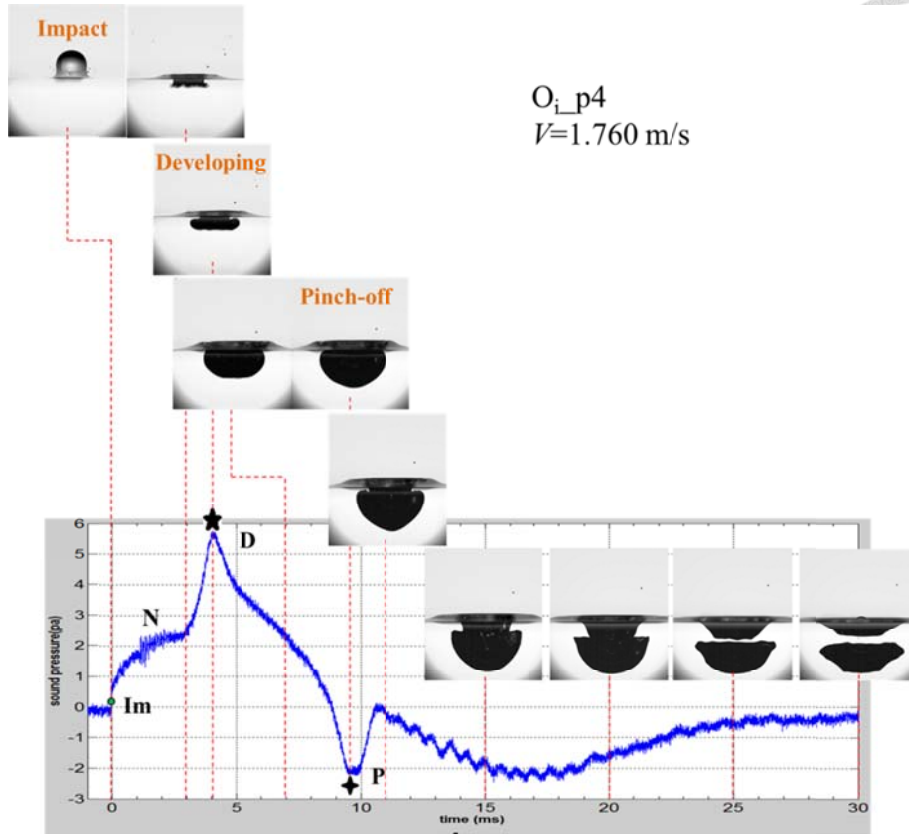


圖 4.1.1-3 O_{i_p4} , $V=1.760 \text{ m/s}$ 大氣泡水上與水下合併之時序圖

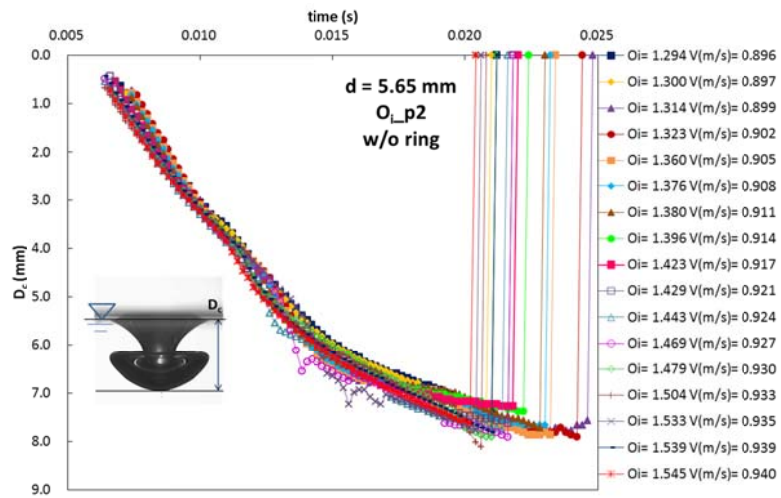


圖 4.1.1-4 O_{i_p2} 大氣泡水漚深度(D_c)與時間的關係圖

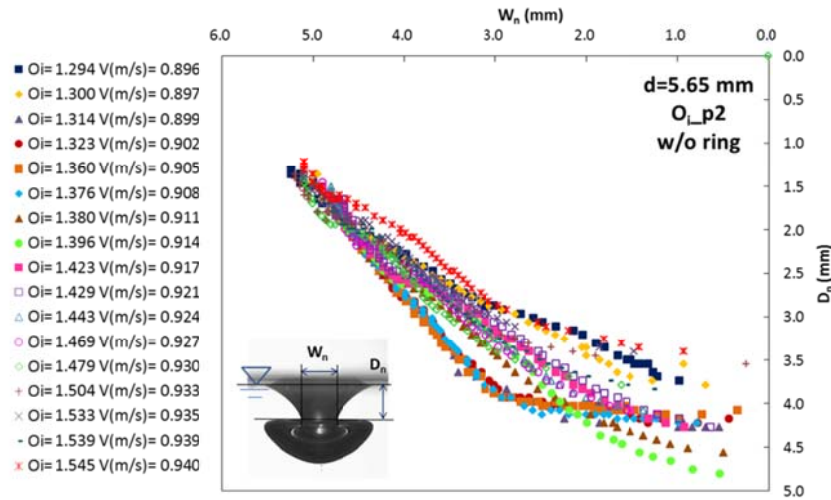


圖 4.1.1-5 O_{i_p2} 大氣泡水漕頸部寬度(W_n)與頸部深度(D_n)關係圖

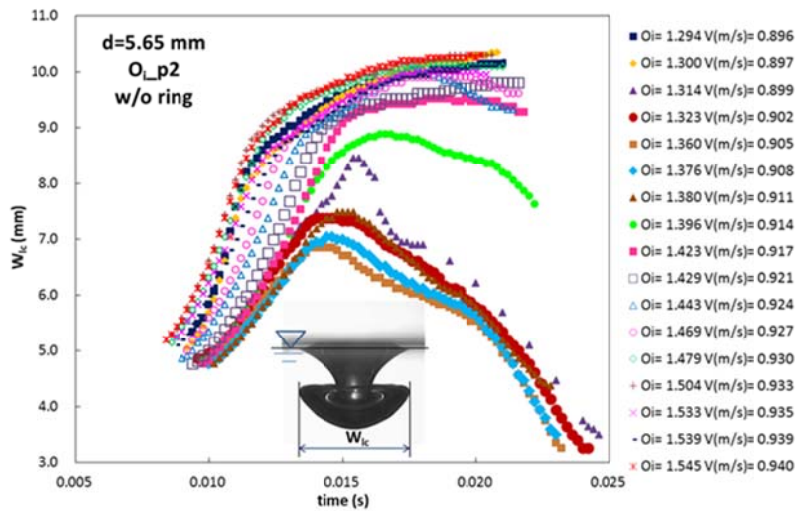


圖 4.1.1-6 O_{i_p2} 底部擴張區水漕最大寬度(W_{ic})與時間的關係圖

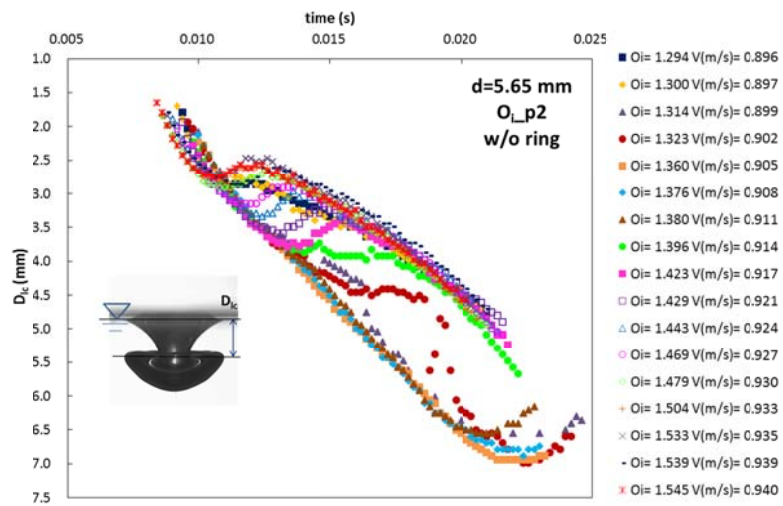


圖 4.1.1-7 O_{i_p2} 底部擴張區水漕最大深度(D_{ic})與時間的關係圖

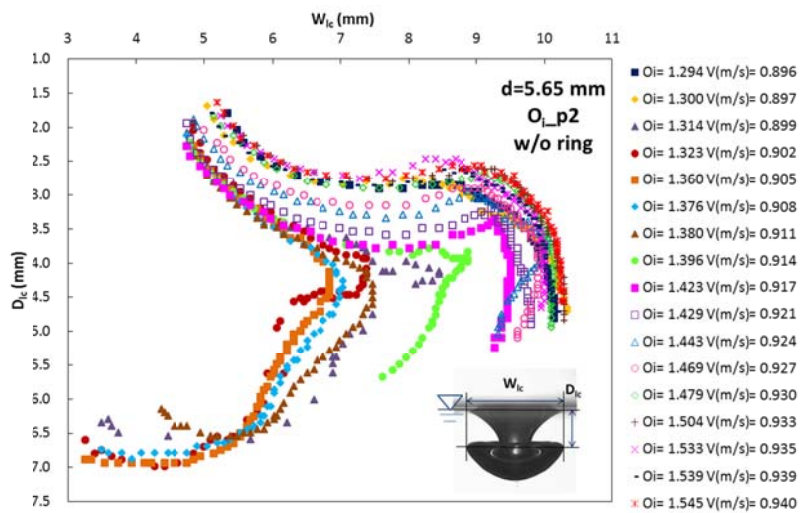


圖 4.1.1-8 O_{i_p2} 大氣泡水漥最大寬度(W_{ic})與最大寬度的深度(D_{ic})關係圖

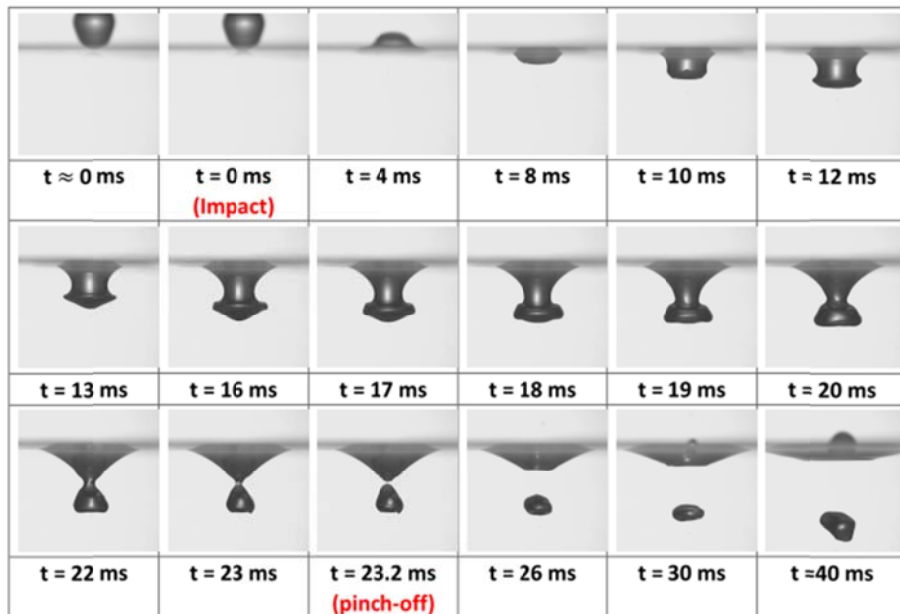


圖 4.1.1-9 $V = 0.908$ m/s, O_{i_p2} 之大氣泡時序圖

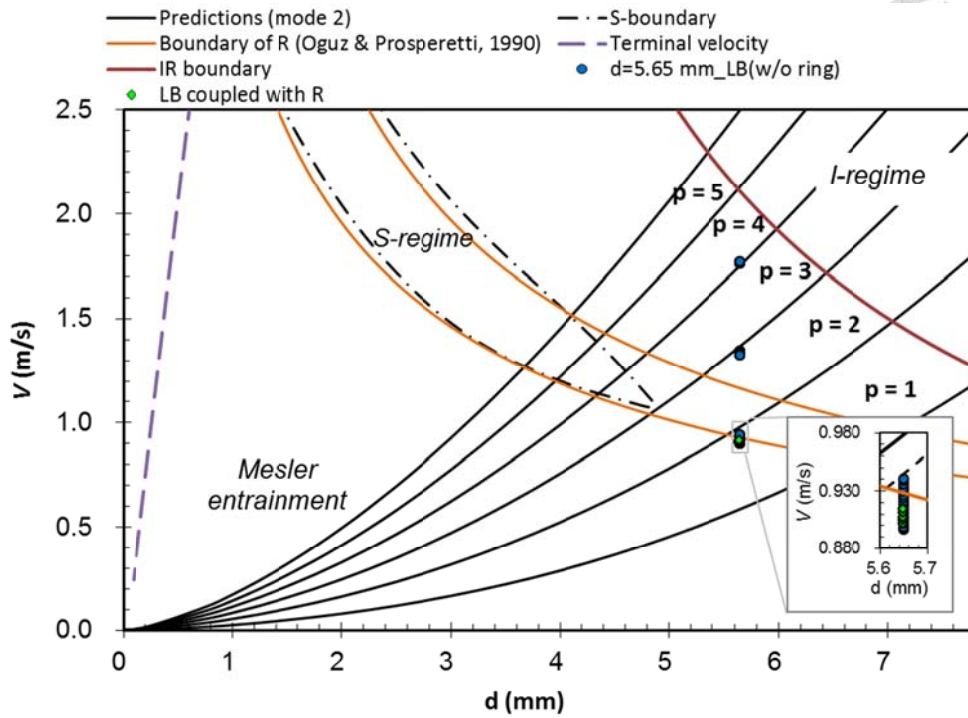


圖 4.1.1-10 將 $d = 5.65$ mm 所形成的大氣泡畫於 V - d 圖上

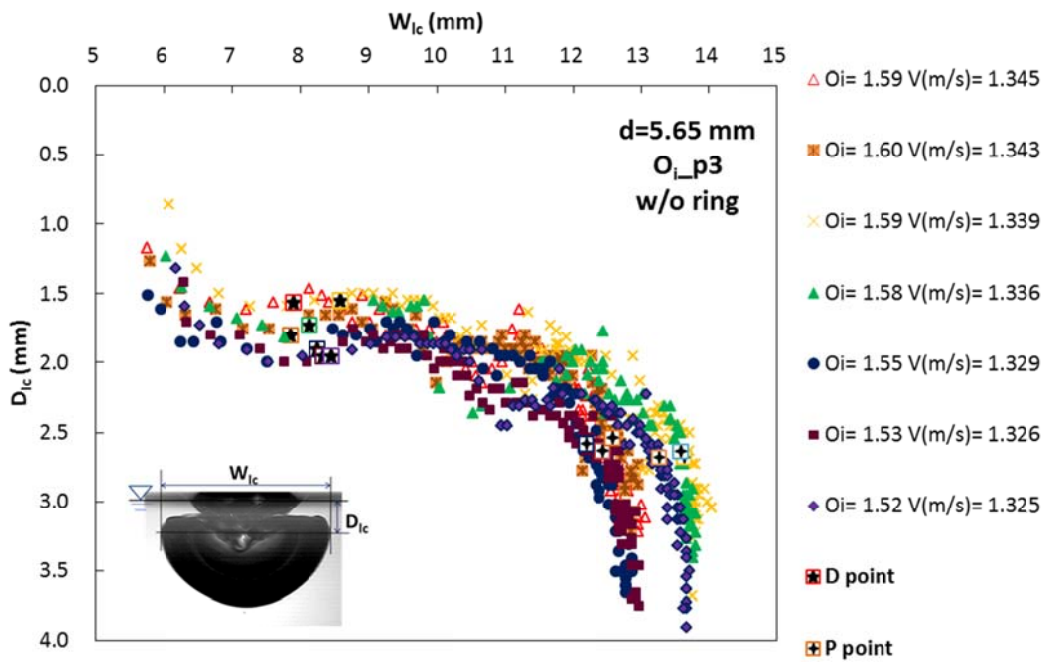


圖 4.1.1-11 $O_{i,p3}$ 大氣泡水漥最大寬度(W_{lc})與最大寬度的深度(D_{lc})關係圖

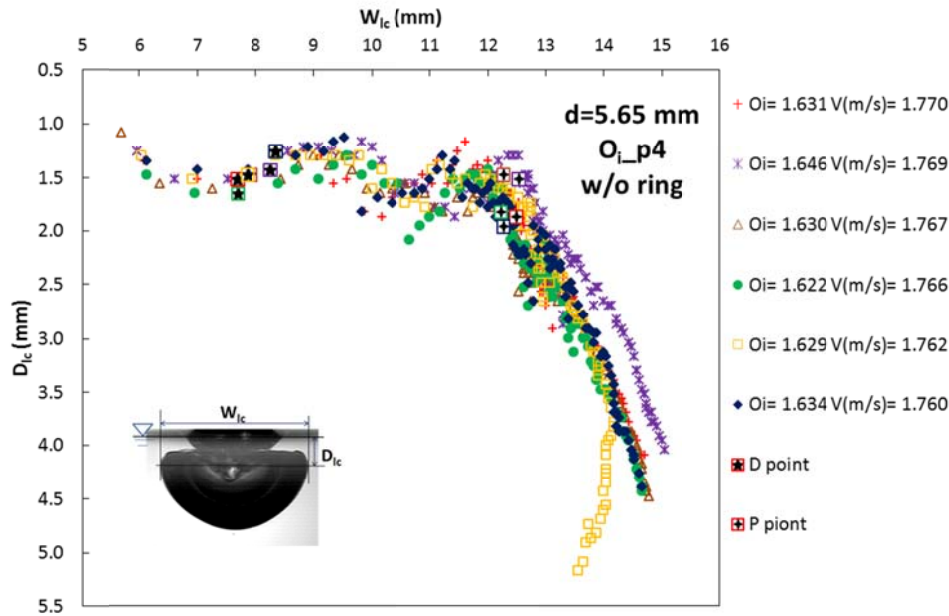


圖 4.1.1-12 O_{i_p4} 大氣泡水漥最大寬度(W_{lc})與最大寬度的深度(D_{lc})關係圖

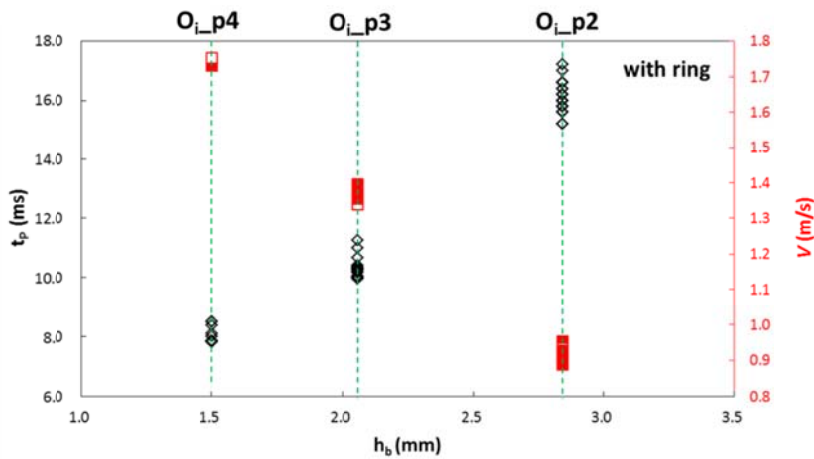


圖 4.1.2-1 不同 O_i 週期下限制環下緣深度與大氣泡斷裂時間和發生速度關係圖

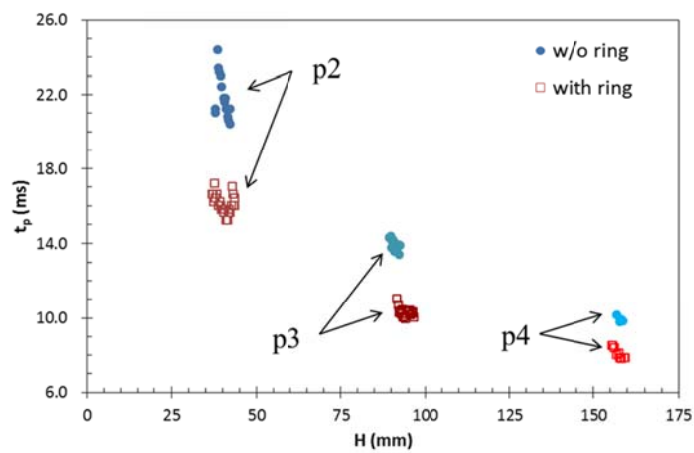
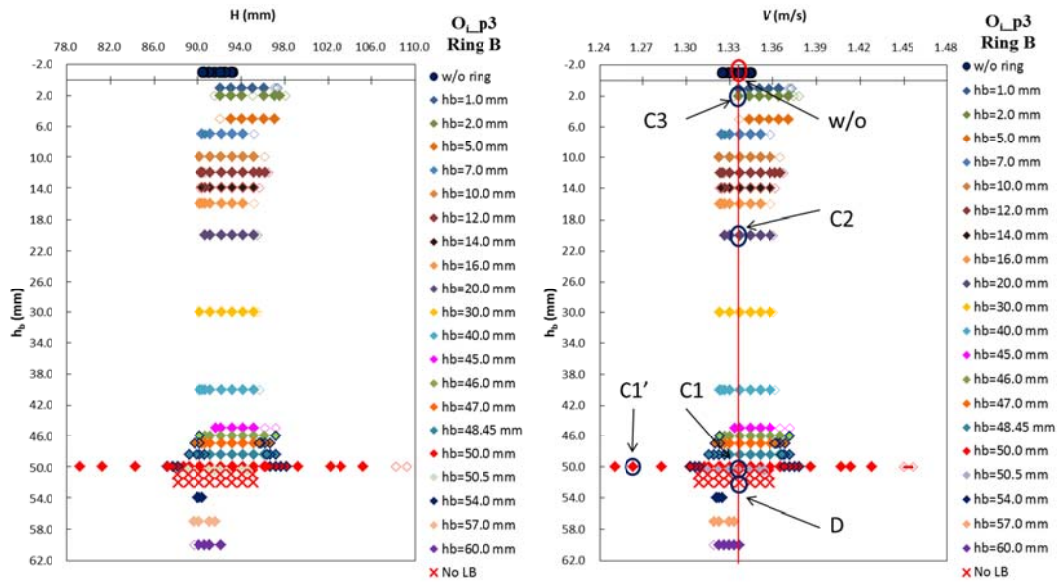
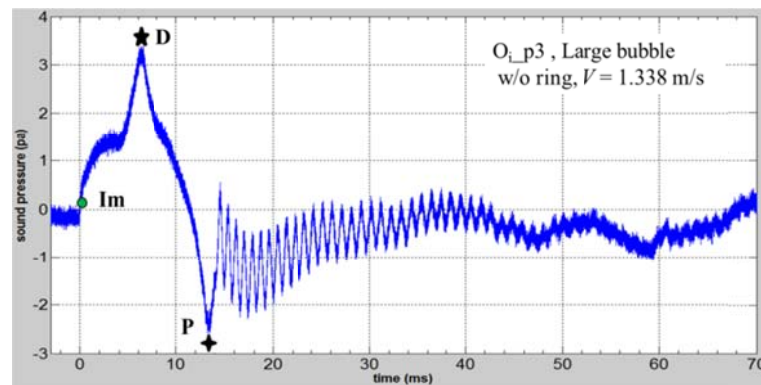
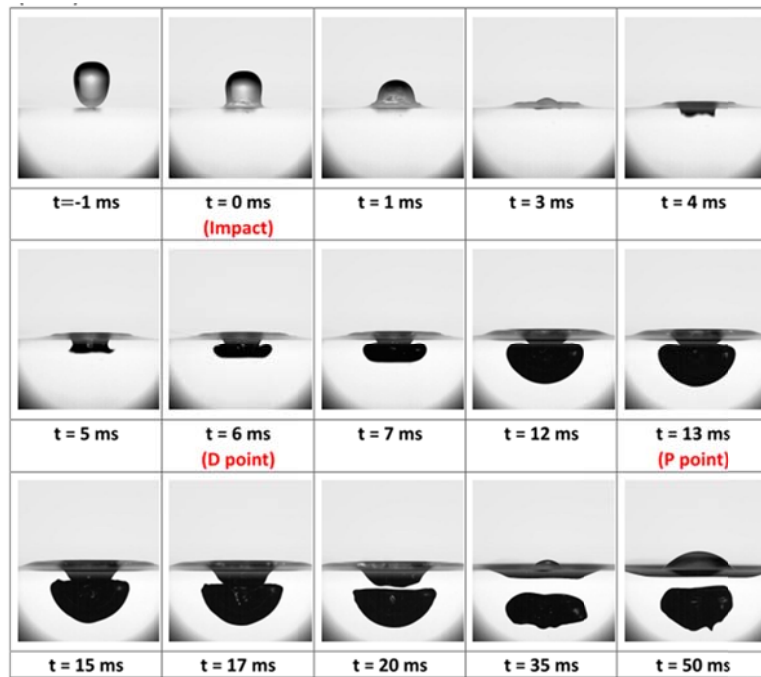


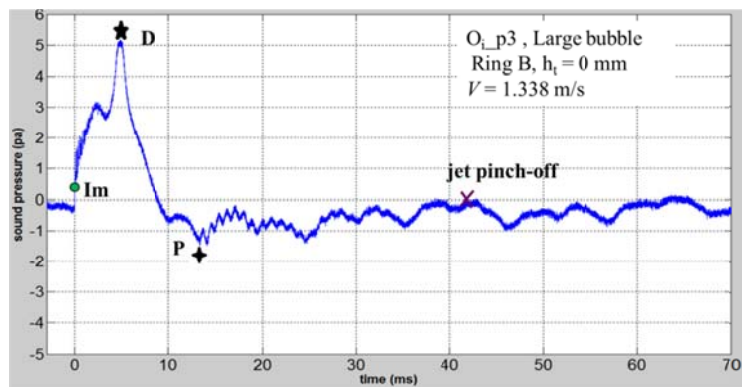
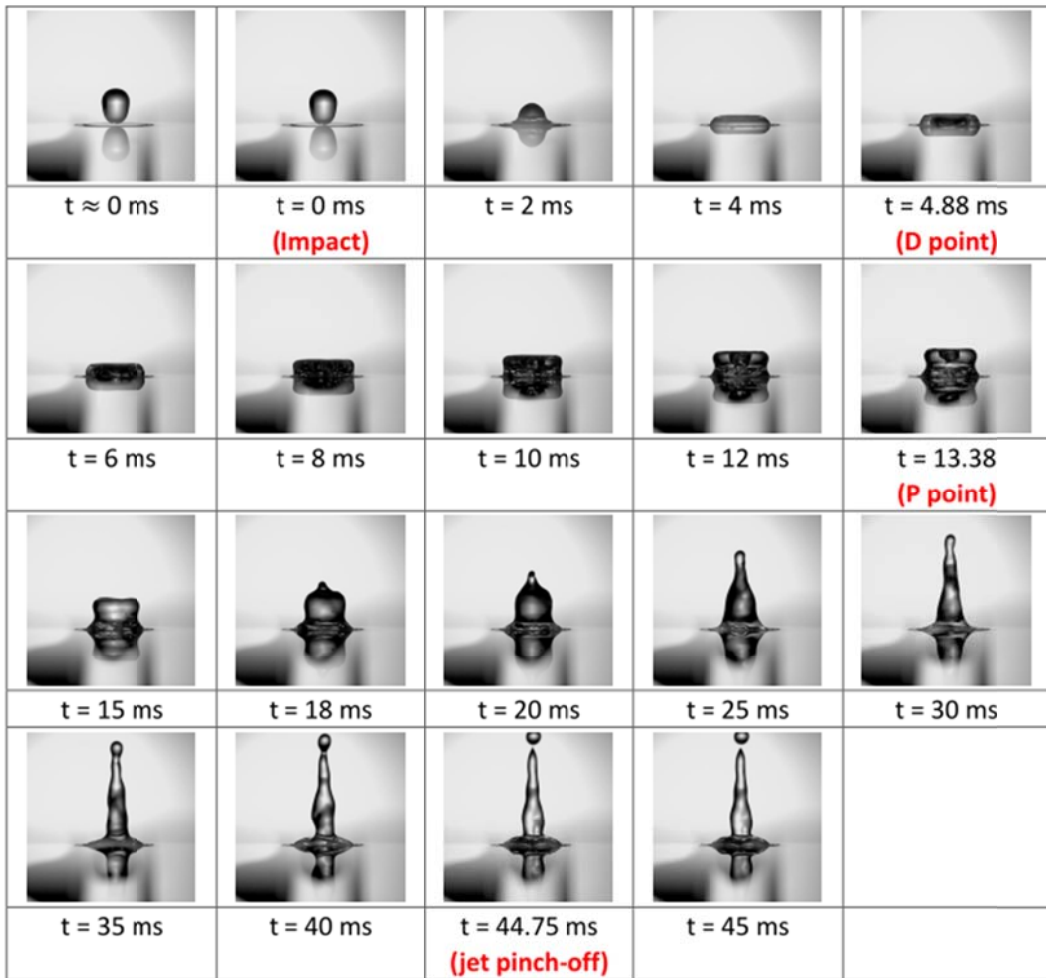
圖 4.1.2-2 液滴形狀參數 O_i 第二至第四週期有無限制環大氣泡斷裂時間比較圖



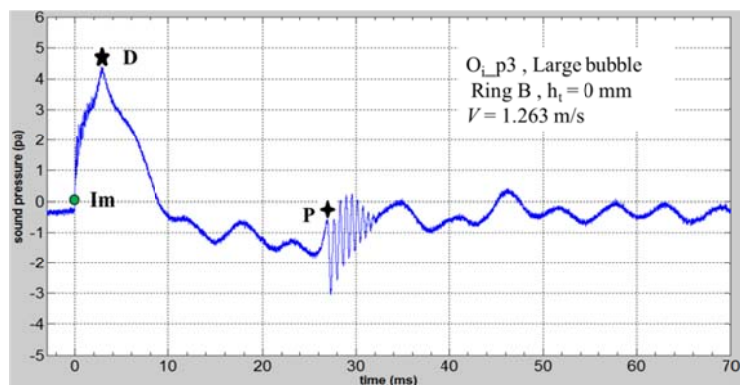
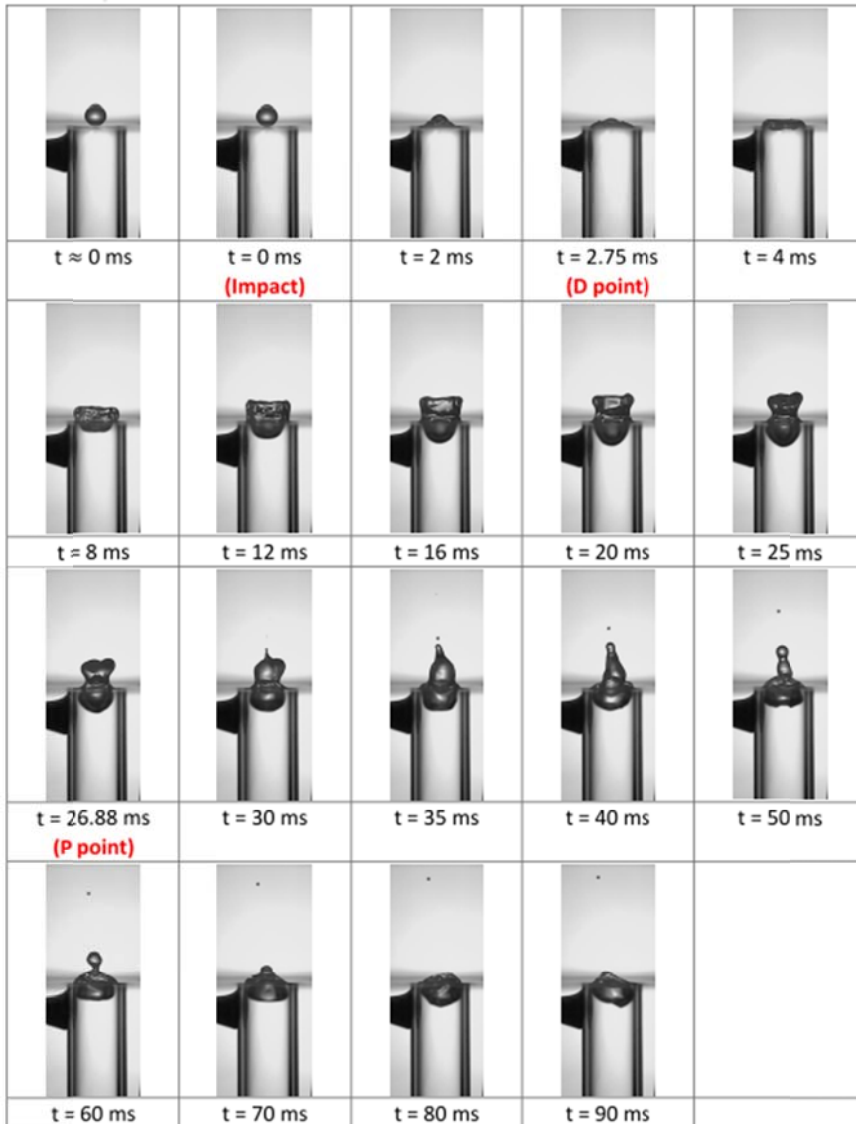
(a) w/o ring, $V = 1.338$ m/s (水面上與水面下合併)



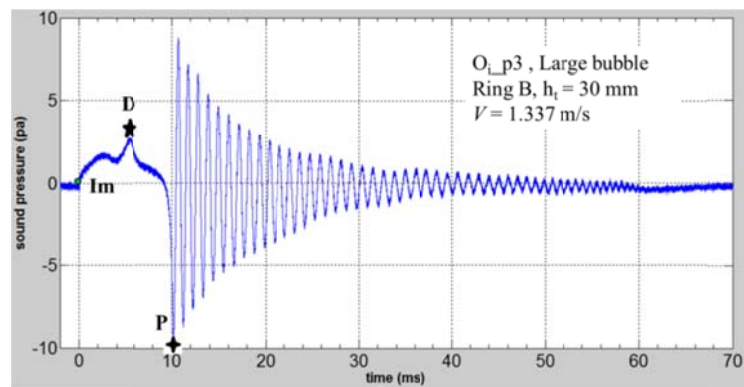
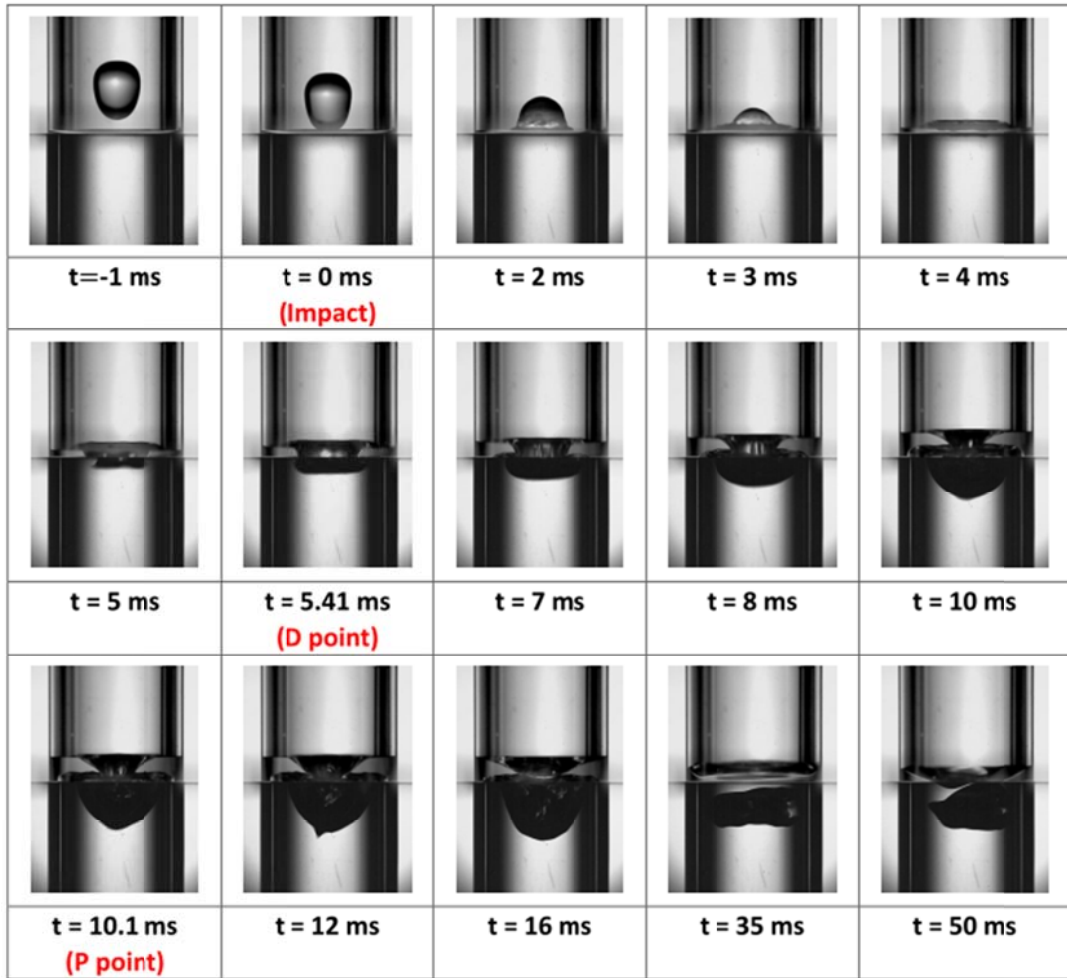
(b) C1. Ring B, $h_b = 50$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.337$ m/s (水面上)



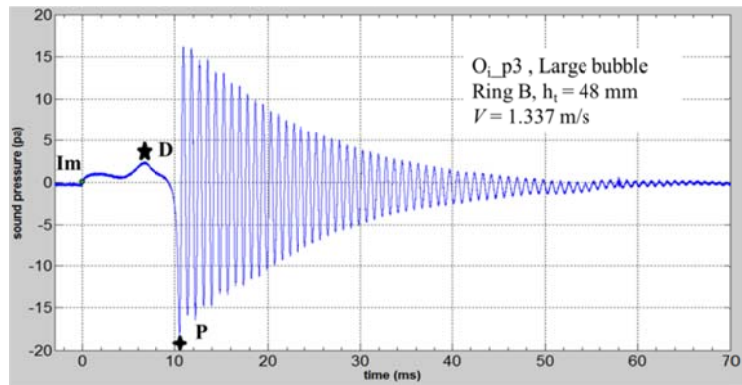
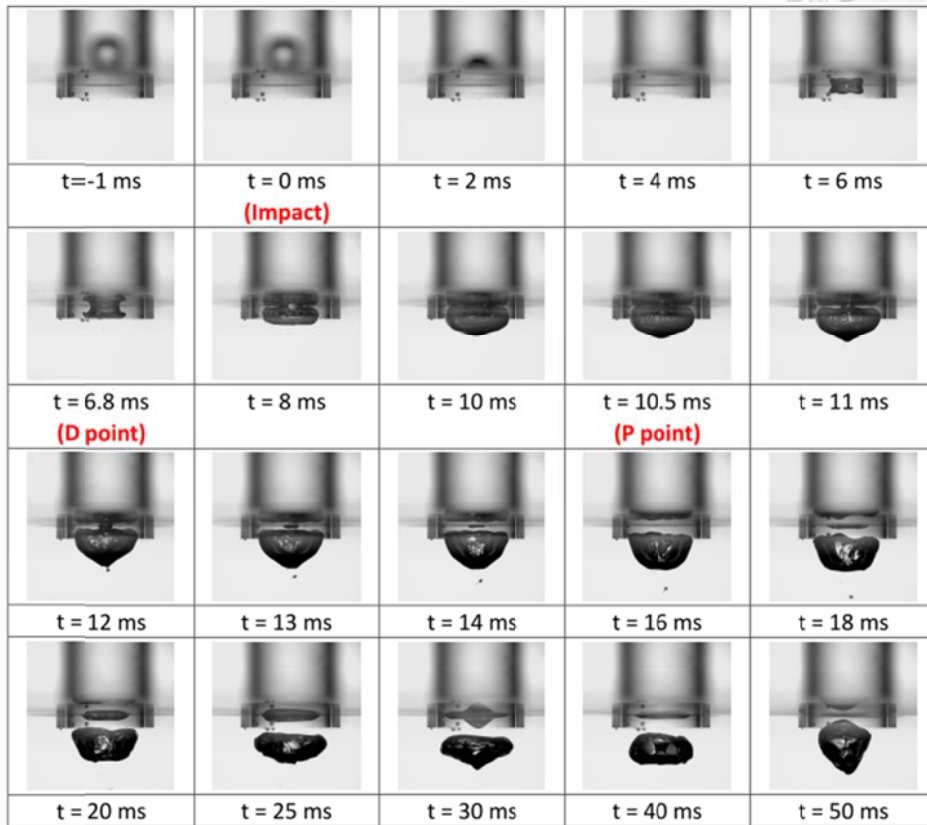
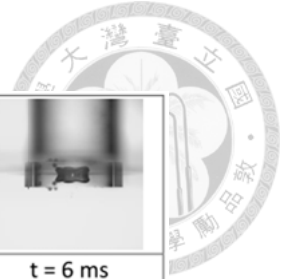
(c) C1'. Ring B, $h_b = 50$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.263$ m/s



(d) C2. Ring B, $h_b = 20$ mm, $h_t = 30$ mm, $V = 1.337$ m/s (水面上與水面下合併)



(e) C3. Ring B, $h_b = 2 \text{ mm}$, $h_t = 48 \text{ mm}$, $V = 1.337 \text{ m/s}$ (水面下)



(f) D. Ring B, $h_b = 52 \text{ mm}$, $h_t = -2 \text{ mm}$, $V = 1.337 \text{ m/s}$ (水面下)

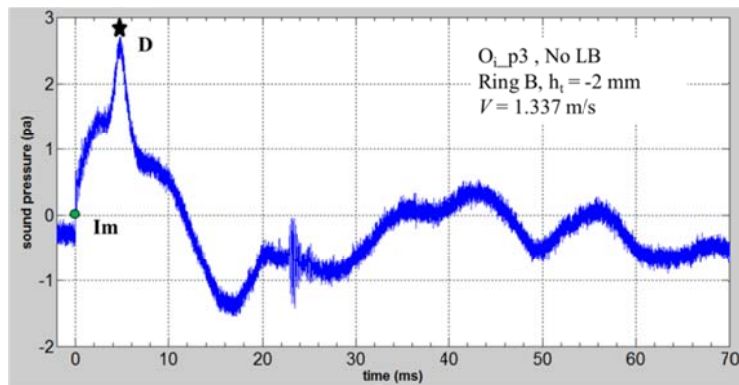
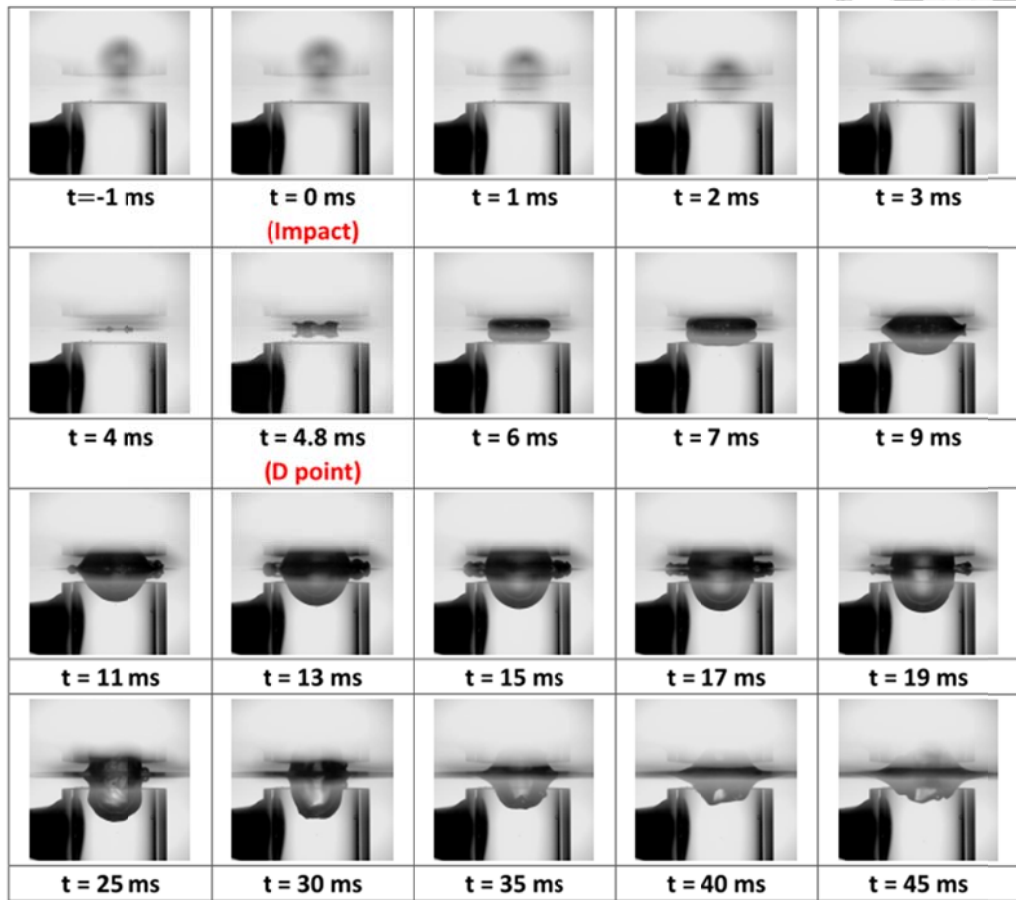
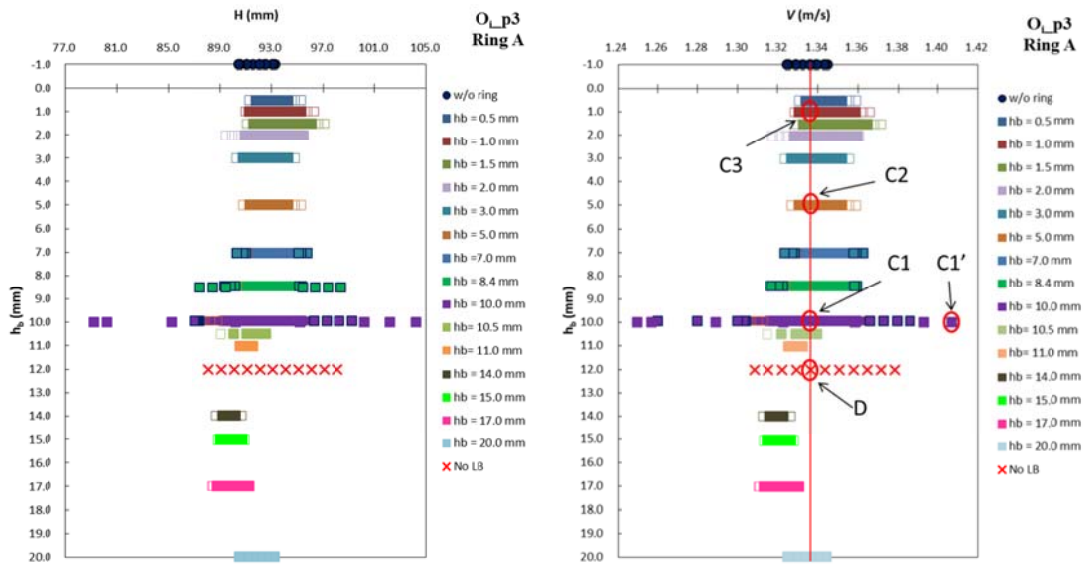
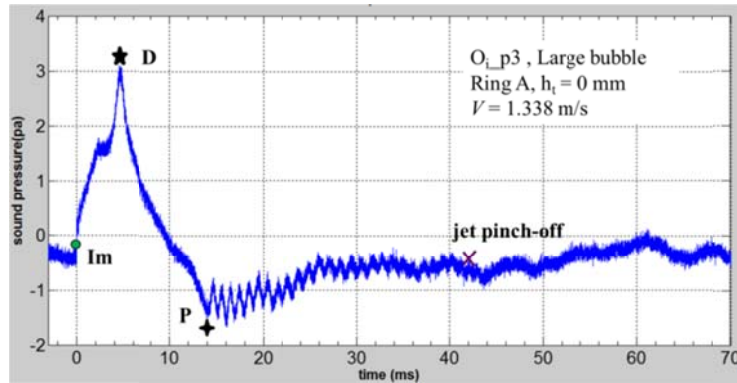
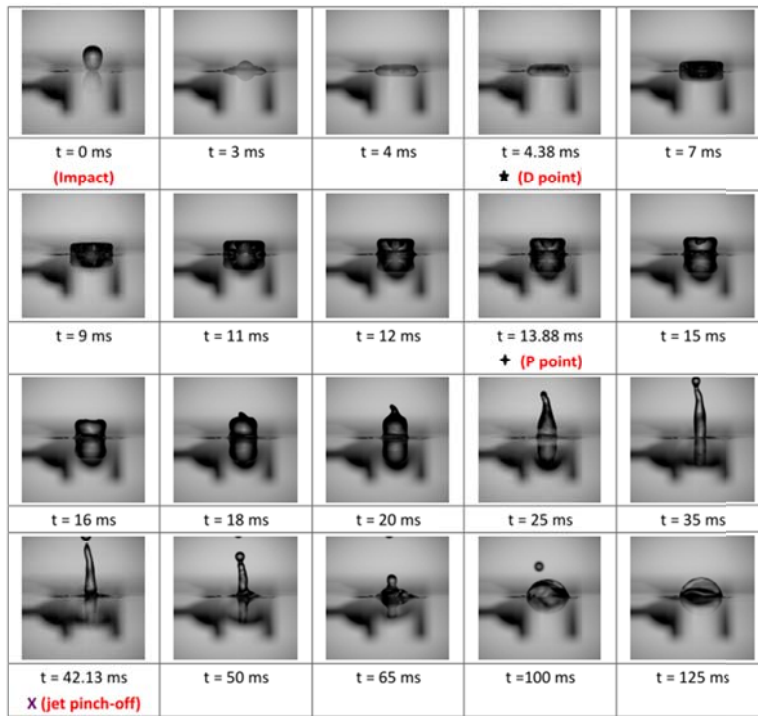


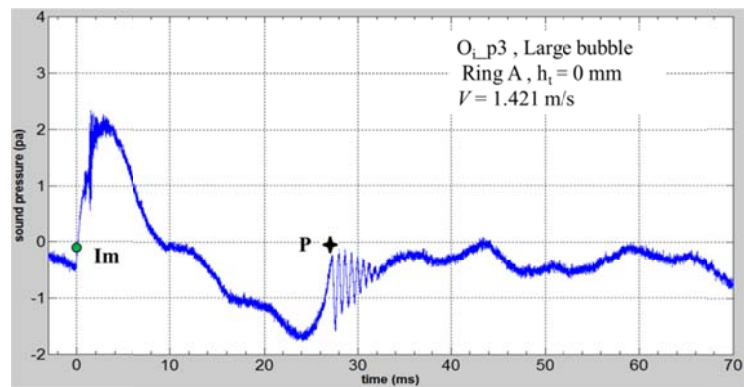
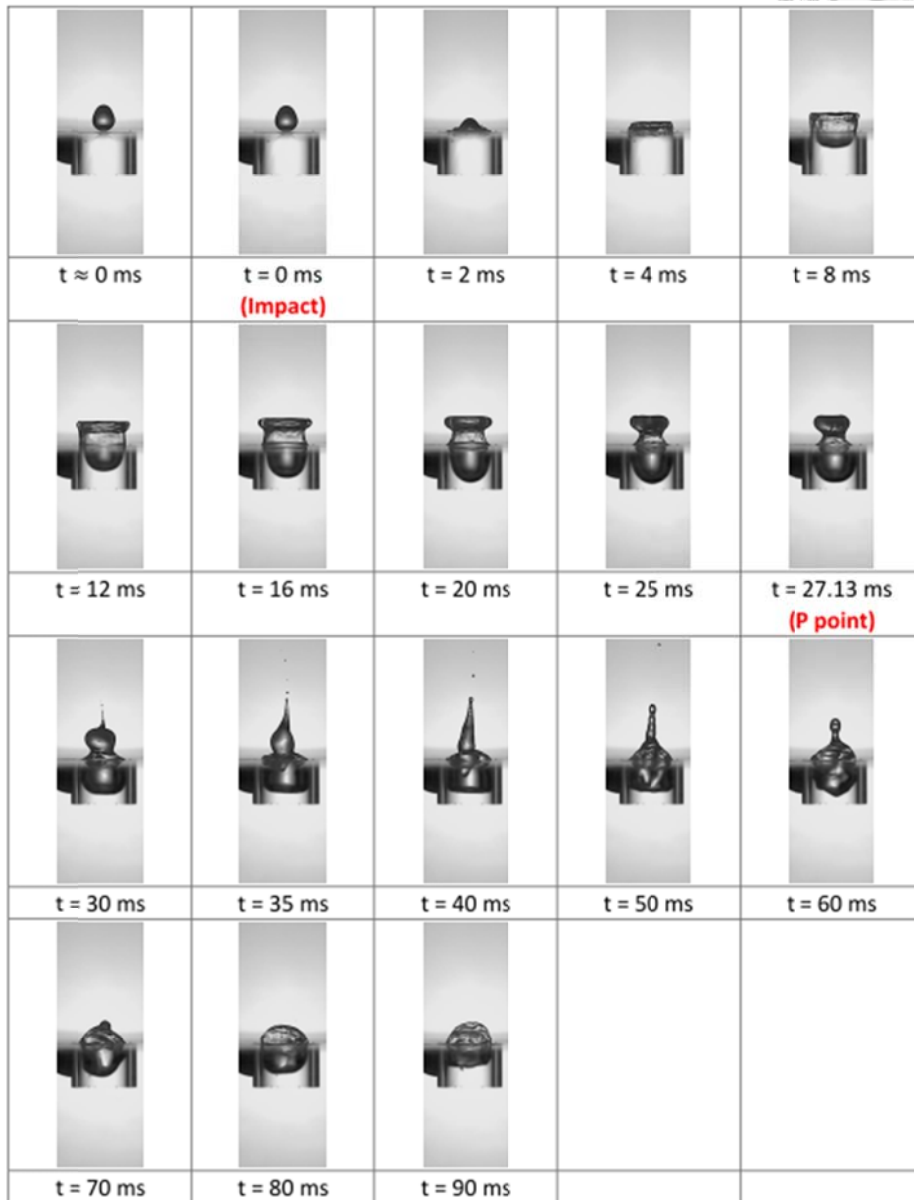
圖 4.2.1-1 O_i_p3 , Ring B, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖



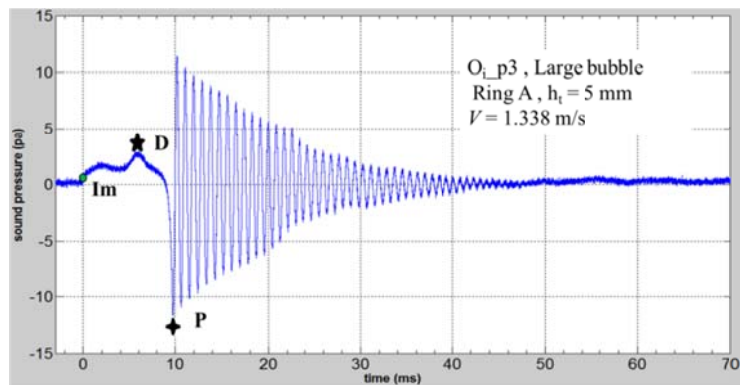
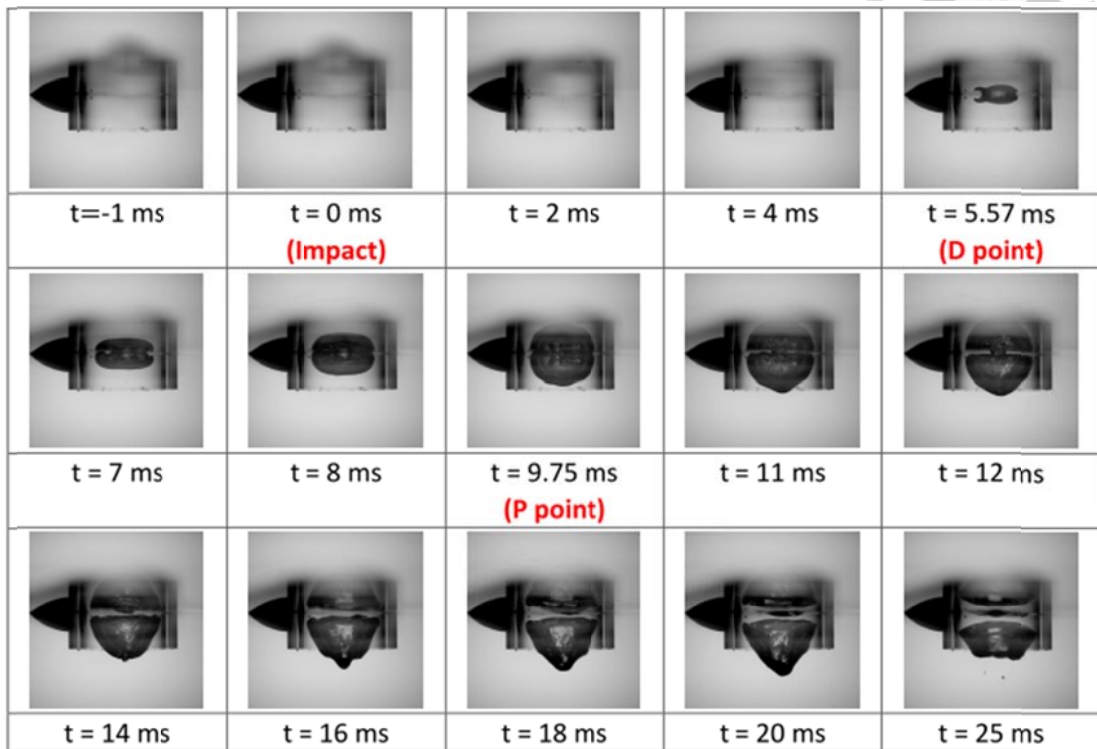
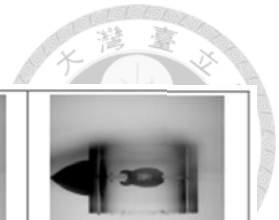
(a) C1. Ring A, $h_b = 10$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面上)



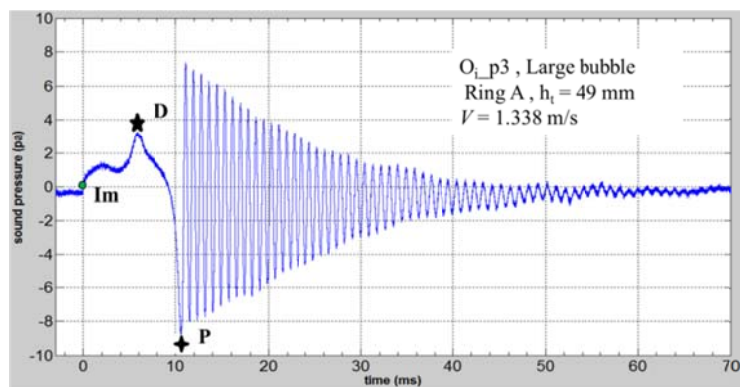
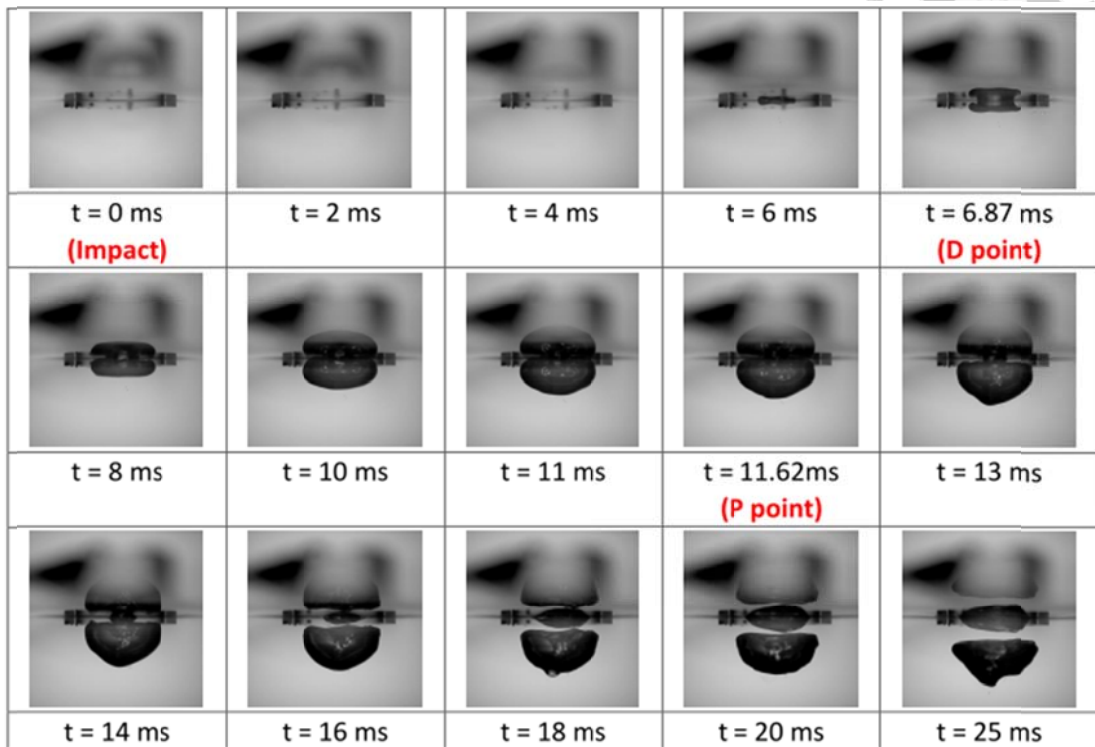
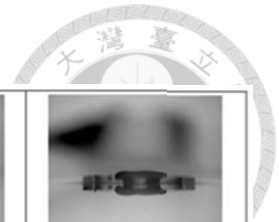
(b) C1'. Ring A, $h_b = 10 \text{ mm}$, $h_t = 0 \text{ mm}$, $V = 1.421 \text{ m/s}$ (水面上)



(c) C2. Ring A, $h_b = 5$ mm, $h_t = 5$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面下)



(d) C3. Rng A, $h_b = 1.0$ mm, $h_t = 9.0$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面下)



(e) D. Rng A, $h_b = 12 \text{ mm}$, $h_t = -2.0 \text{ mm}$, $V = 1.338 \text{ m/s}$ (水面下)

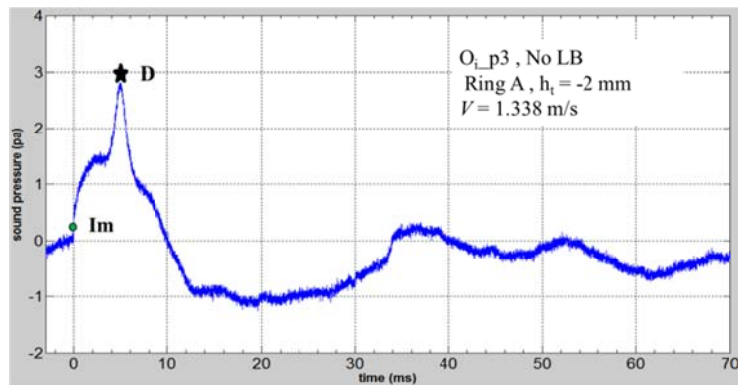
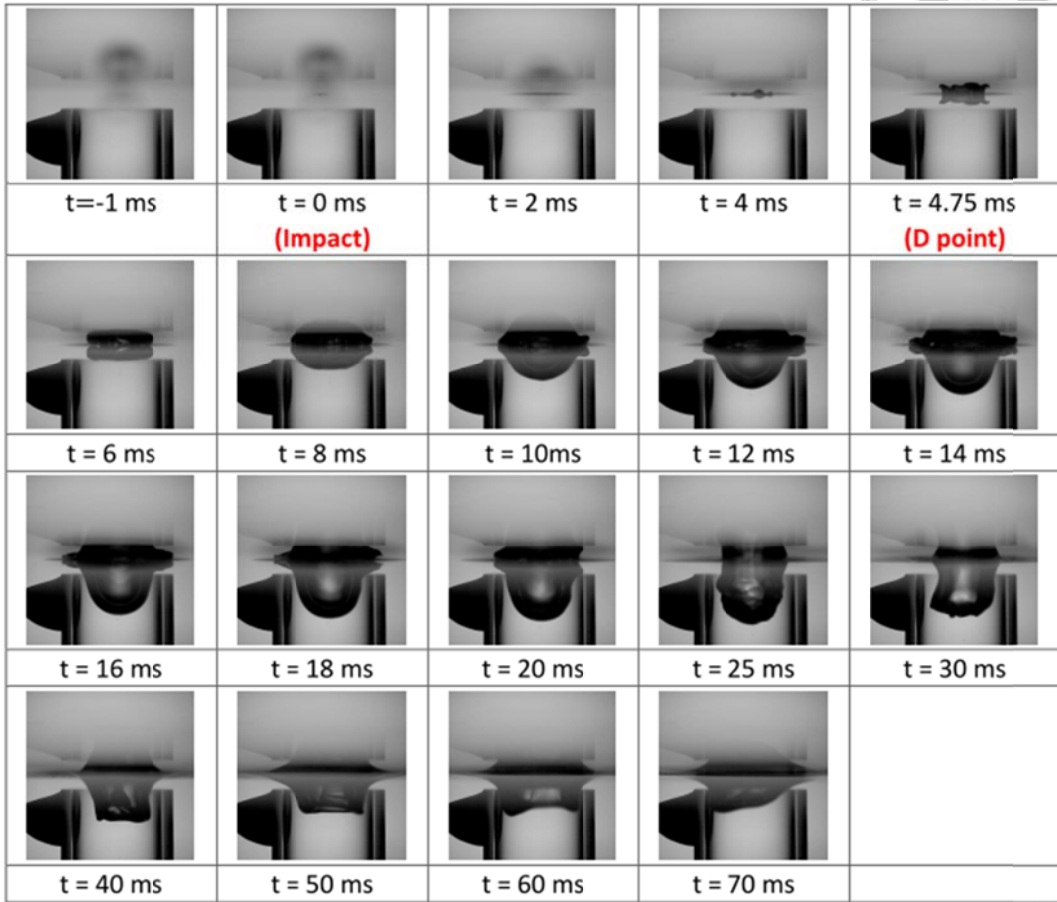
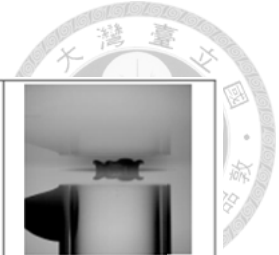
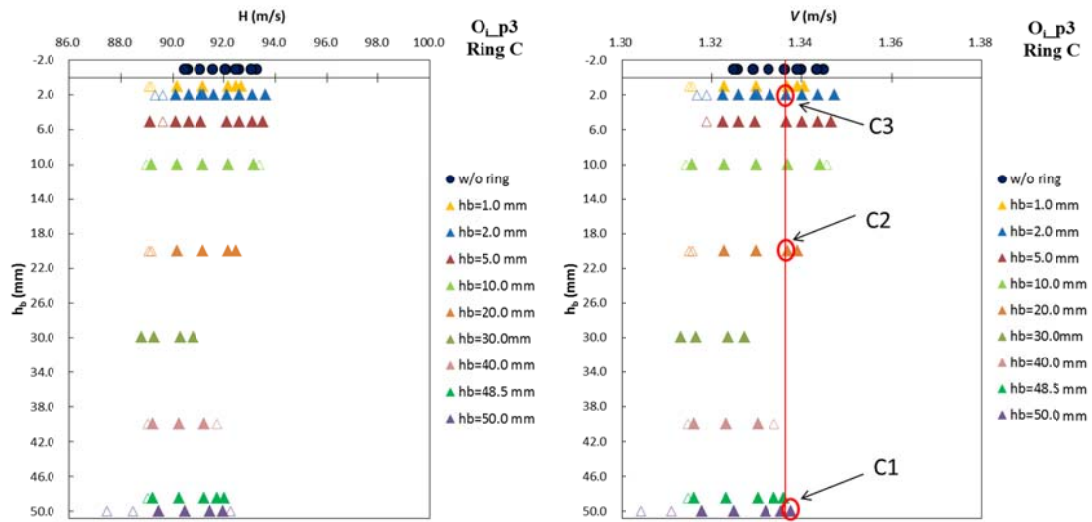
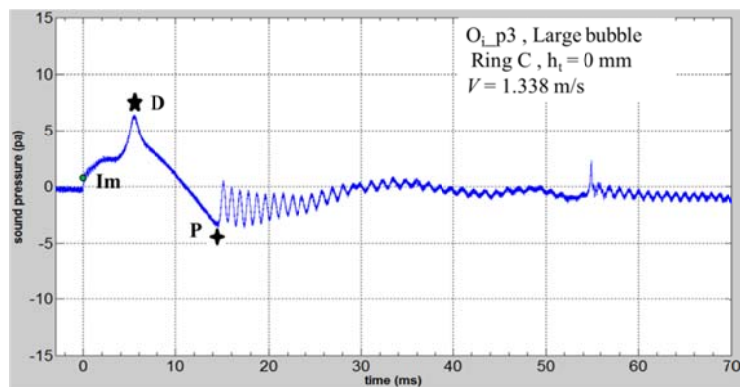
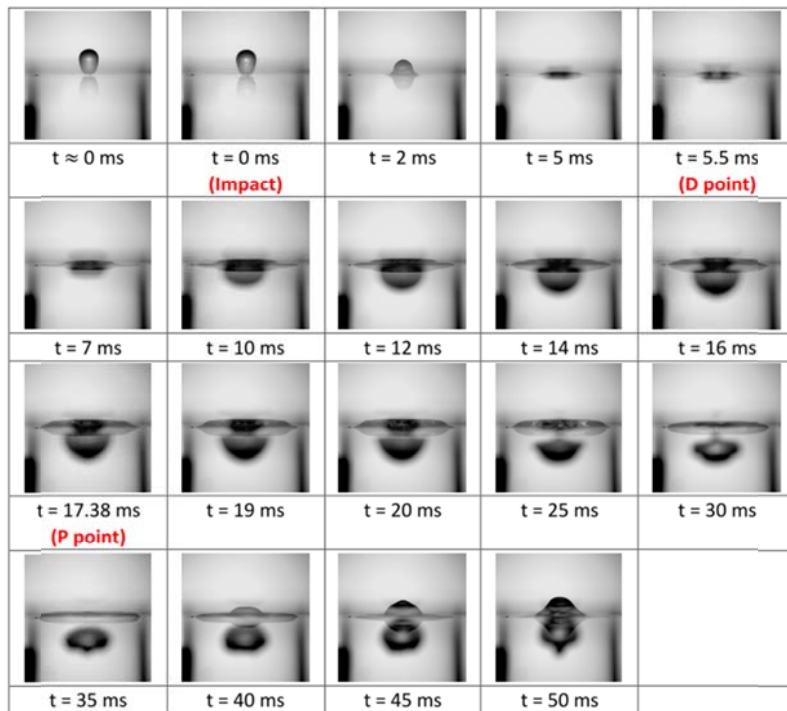


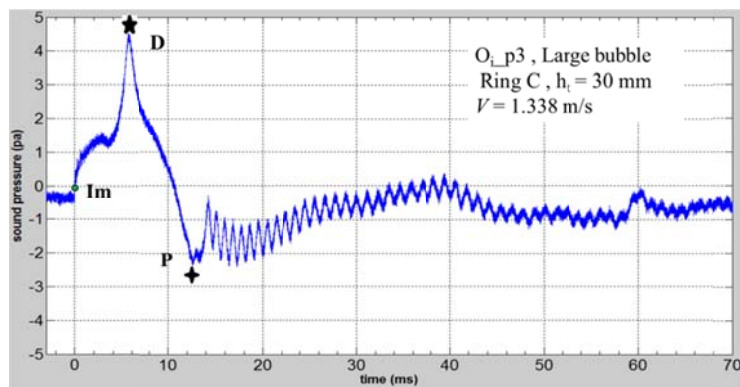
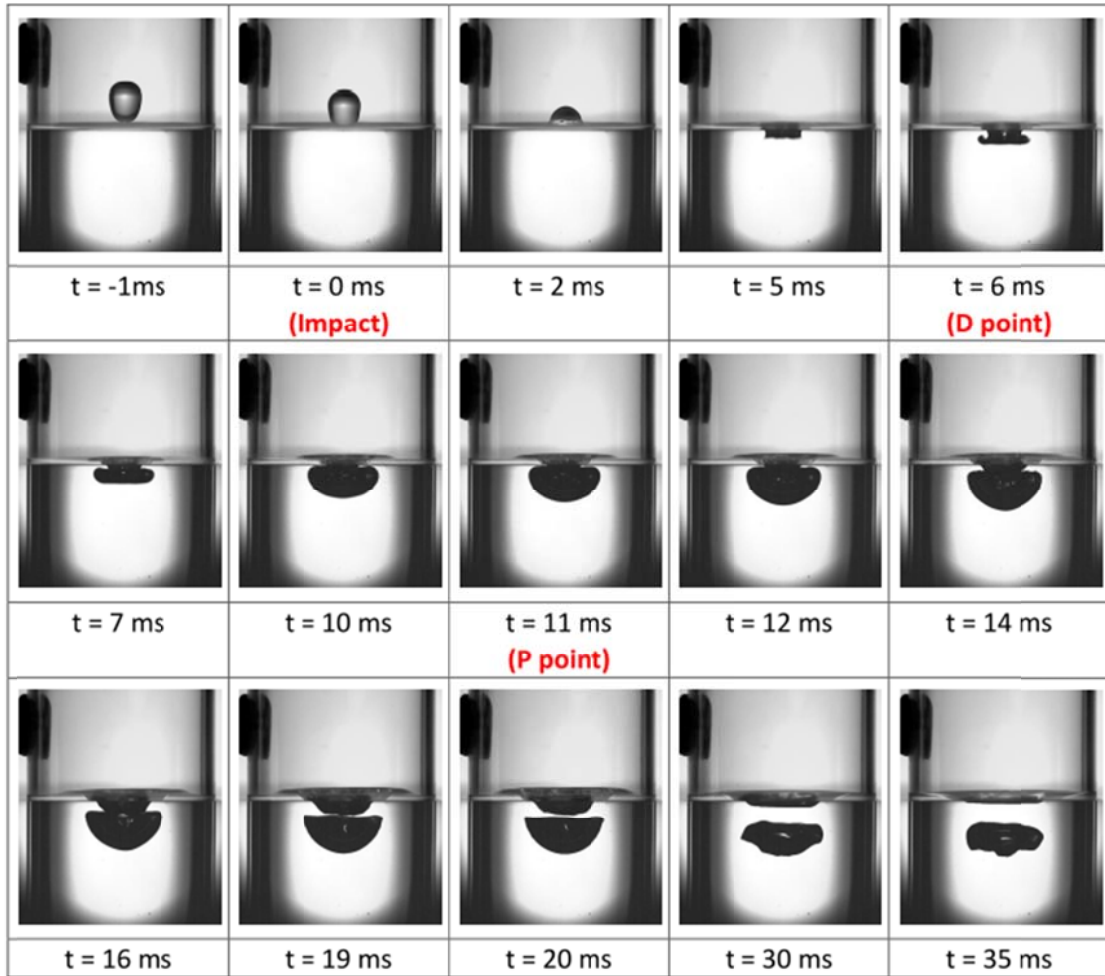
圖 4.2.1-2 Ring A，於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖



(a) C1. Ring C, $h_b = 50$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面上)



(b) C2. Ring C, $h_b = 20$ mm, $h_t = 30$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面上與水面下合併)



(C) C3. Ring C, $h_b = 2$ mm, $h_t = 48$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面上)

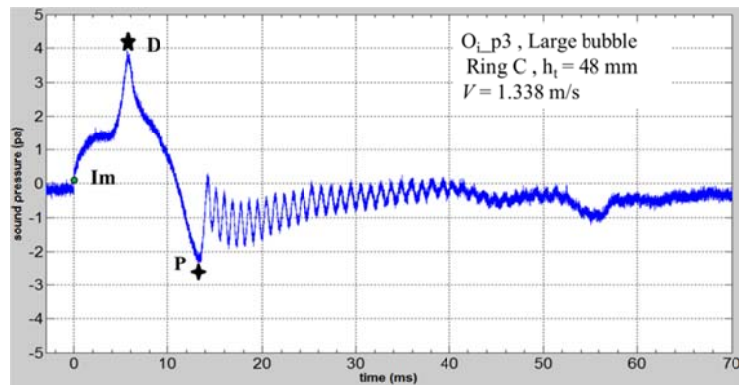
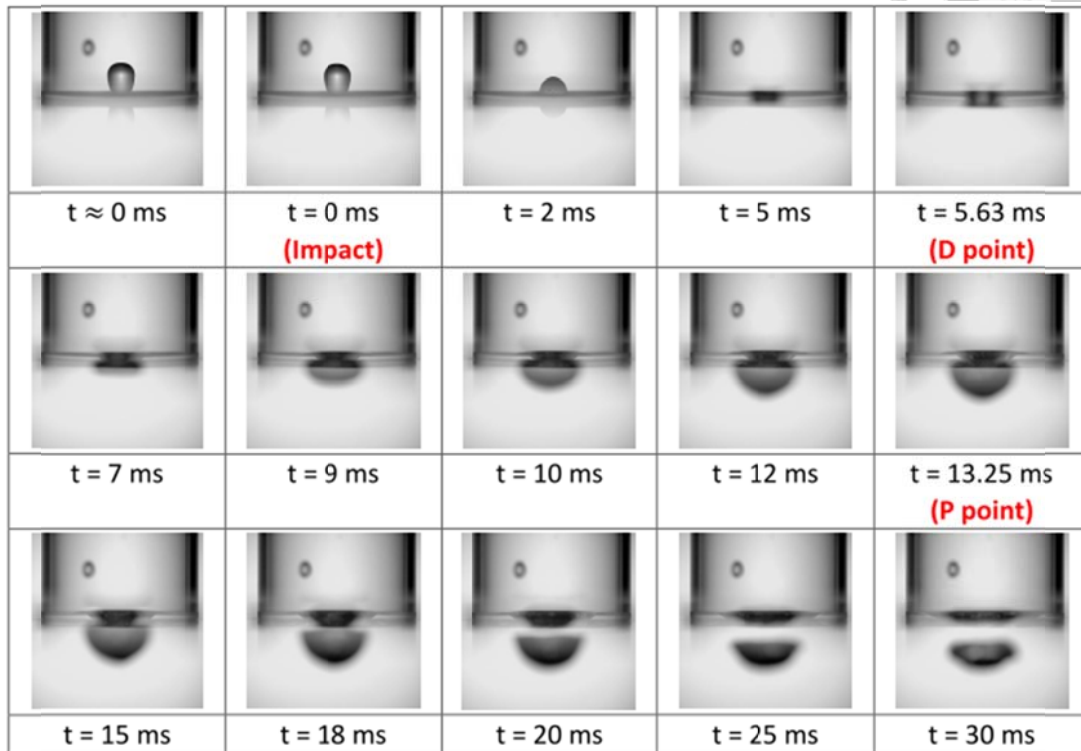
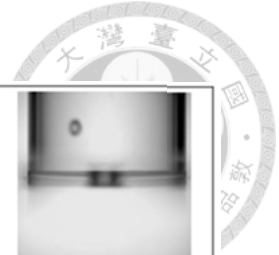
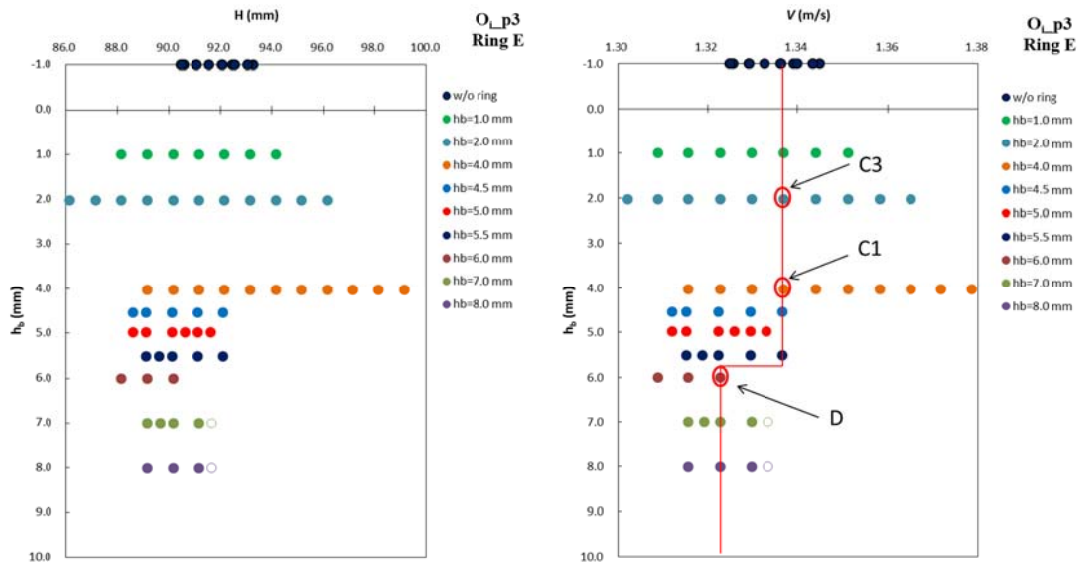
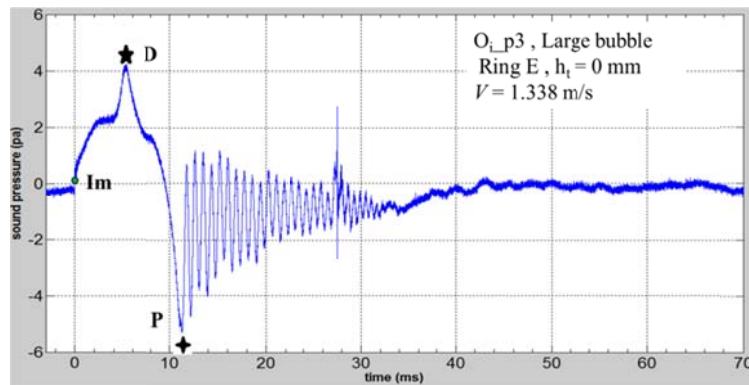
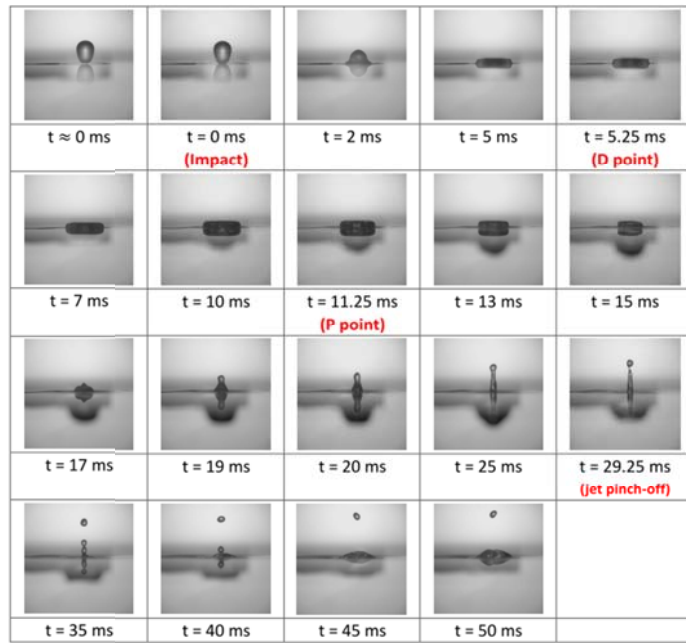


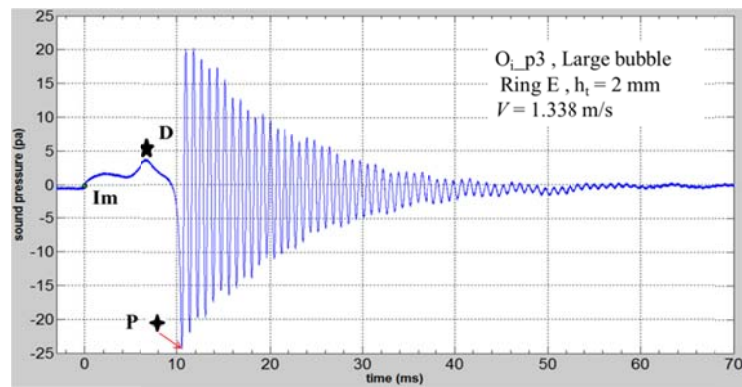
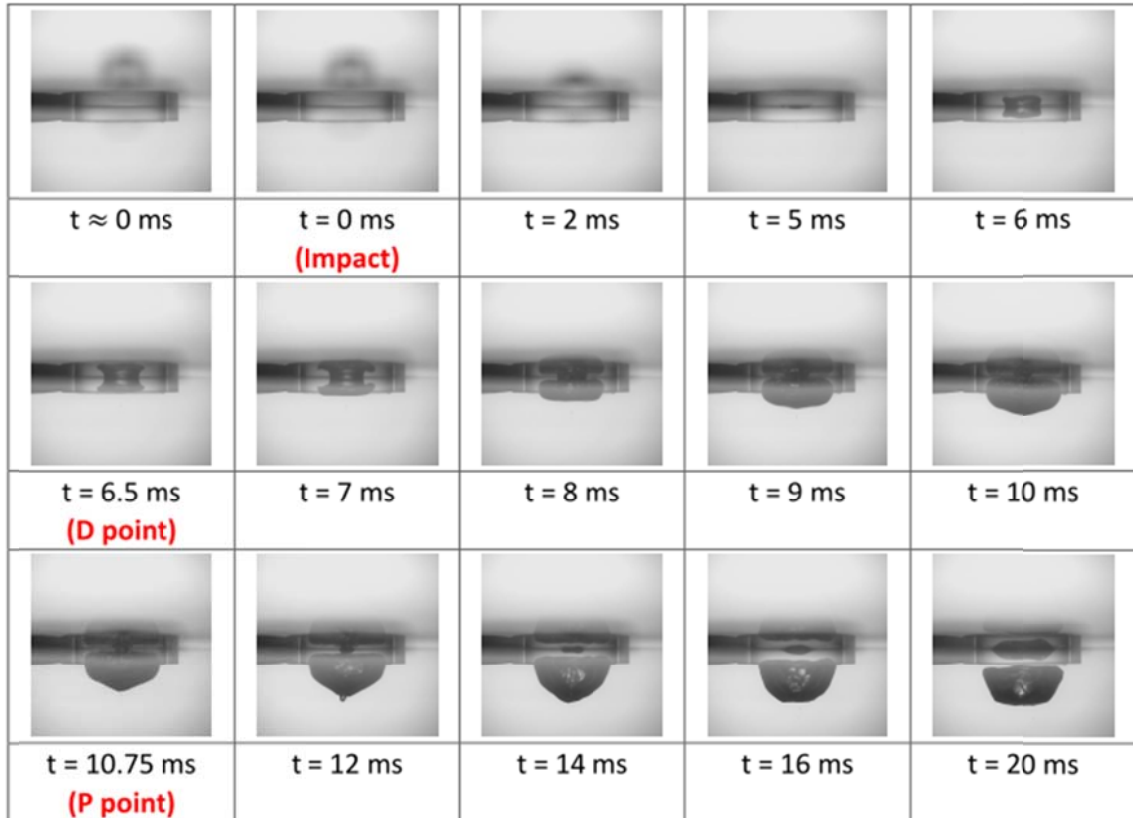
圖 4.2.1-3 Ring C，於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖



(a) C1. Ring E, $h_b = 4$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.338$ m/s(水面上)



(b) C3. Ring E, $h_b = 2 \text{ mm}$, $h_t = 2 \text{ mm}$, $V = 1.338 \text{ m/s}$ (水面下)



(c) D. Ring E, $h_b = 6 \text{ mm}$, $h_t = -2 \text{ mm}$, $V = 1.323 \text{ m/s}$ (水面下)

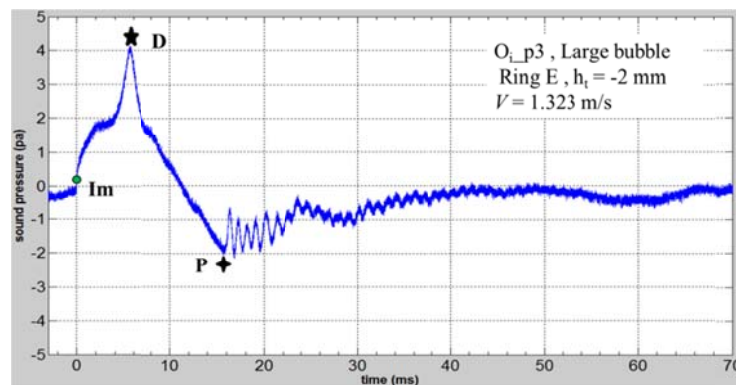
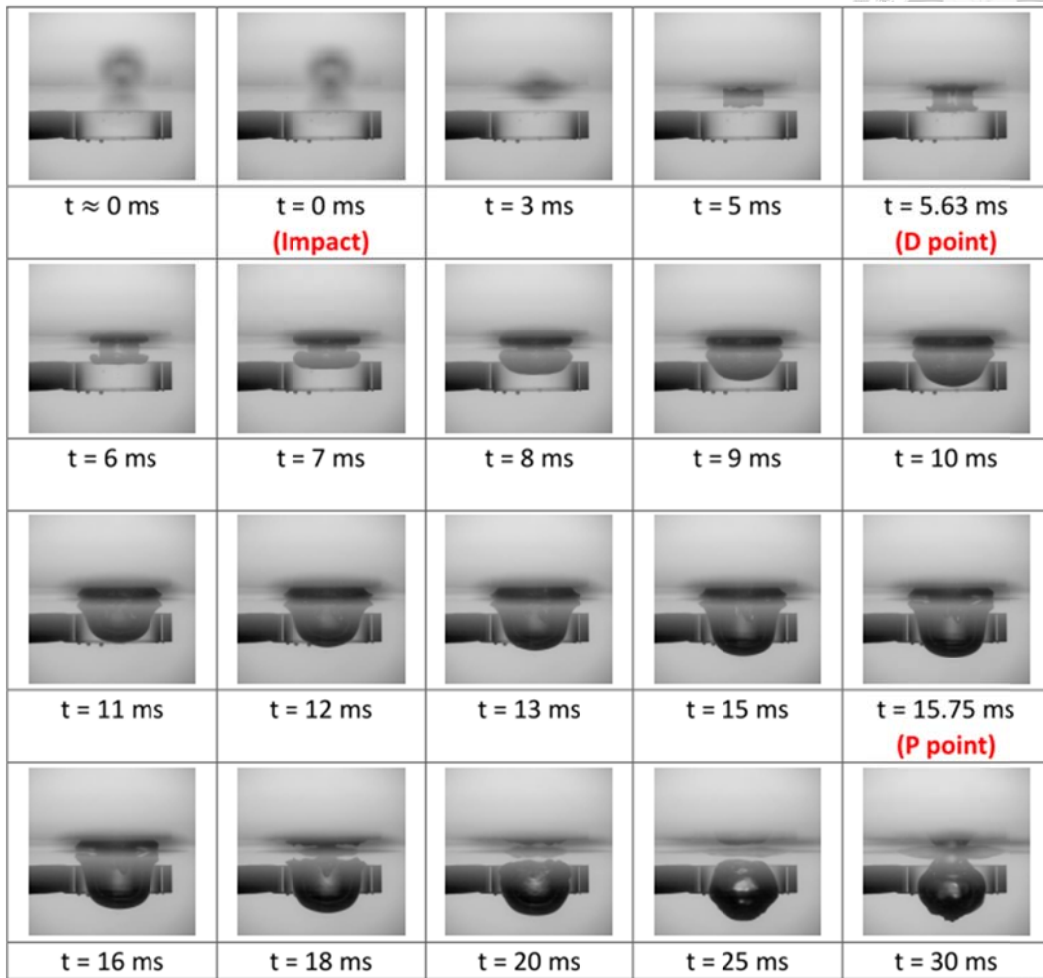
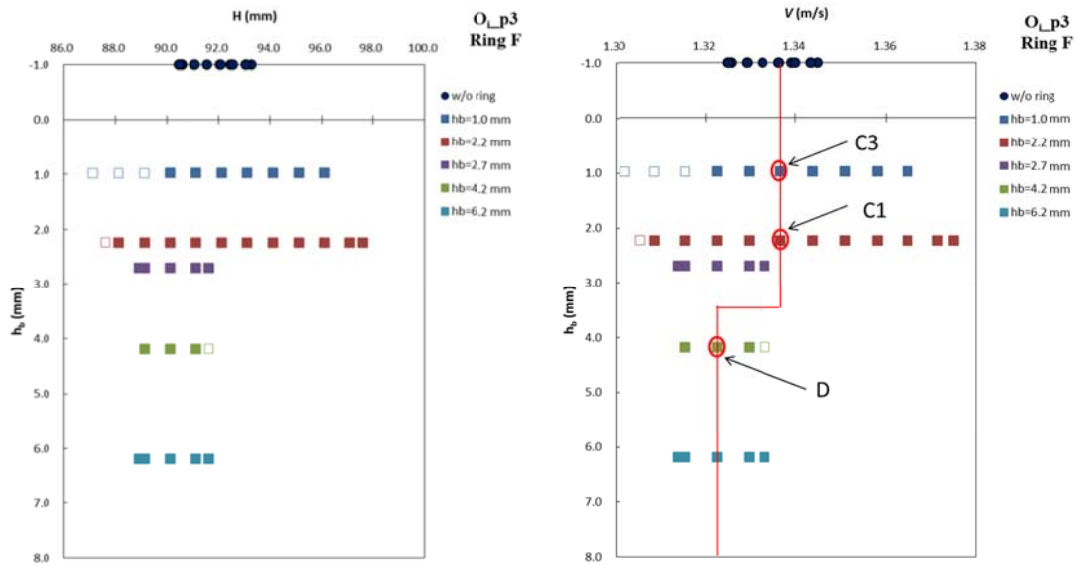
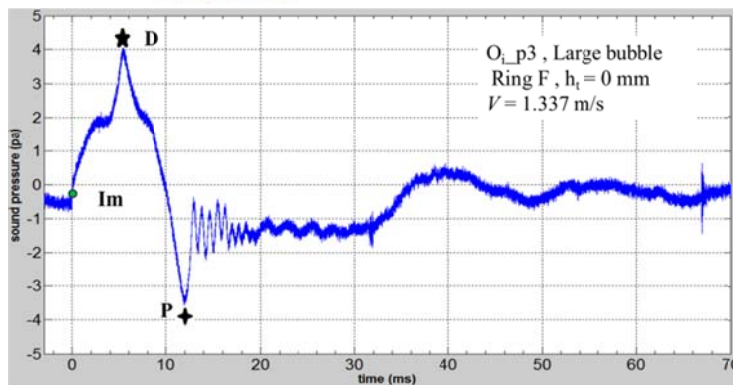
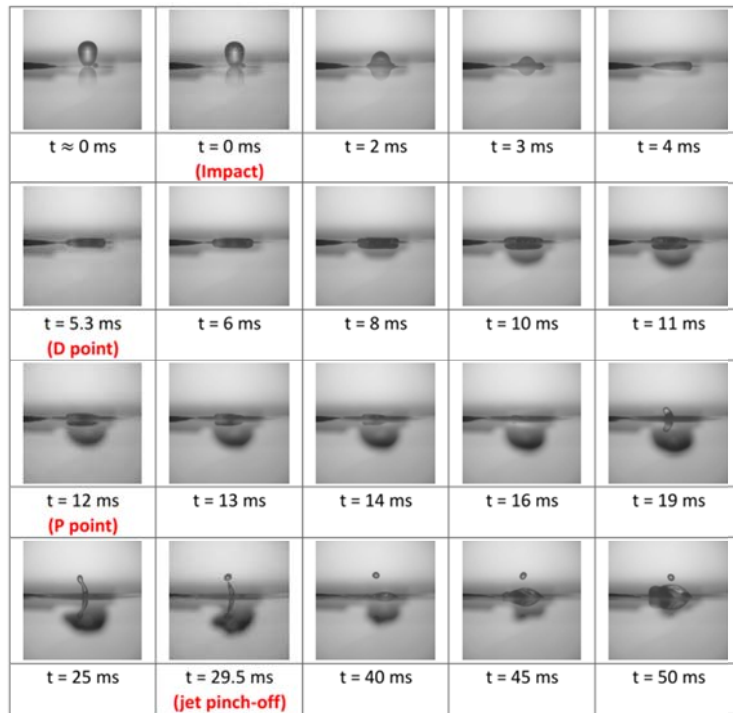


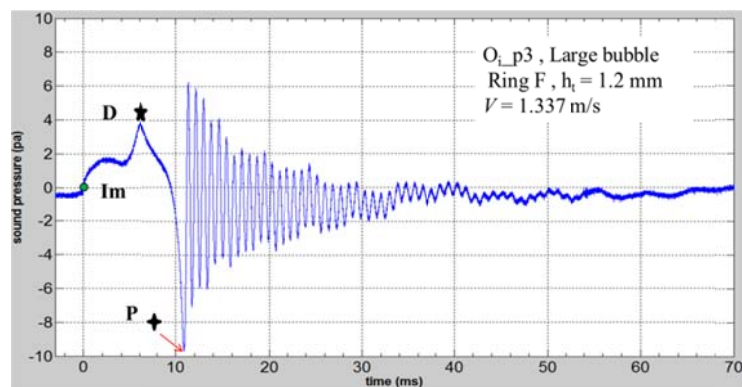
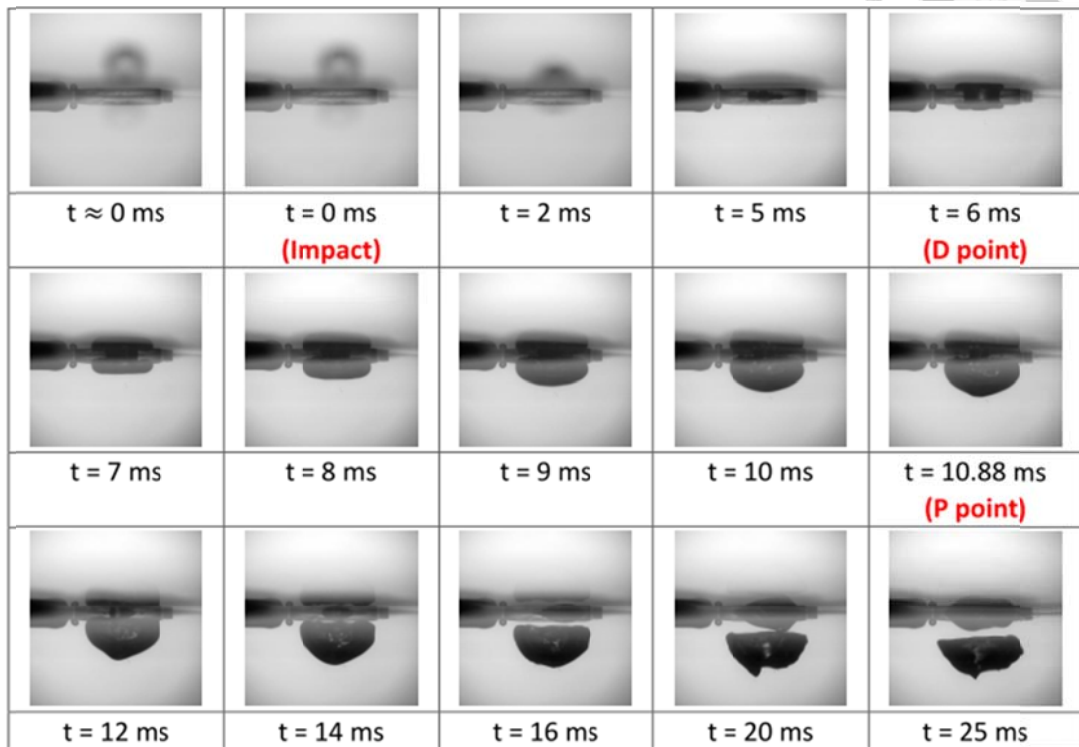
圖 4.2.1-4 Ring E，於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖



(a) C1. Ring F, $h_b = 2.2$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.337$ m/s(水面上)



(b) C3. Ring F, $h_b = 1$ mm, $h_t = 1.2$ mm, $V = 1.337$ m/s(水面下)



(c) D. Ring F, $h_b = 4.2$ mm, $h_t = -2$ mm, $V = 1.323$ m/s(水面下)

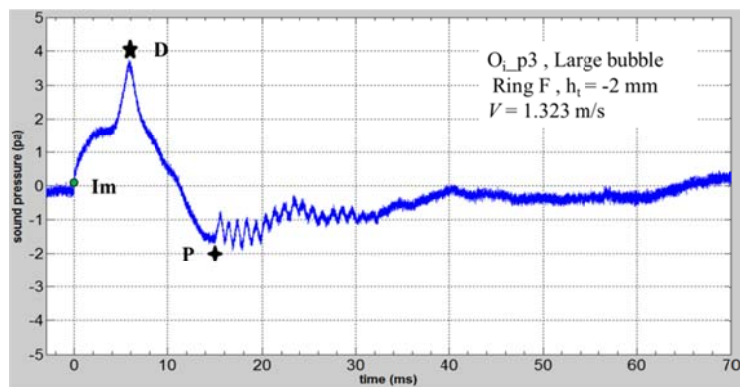
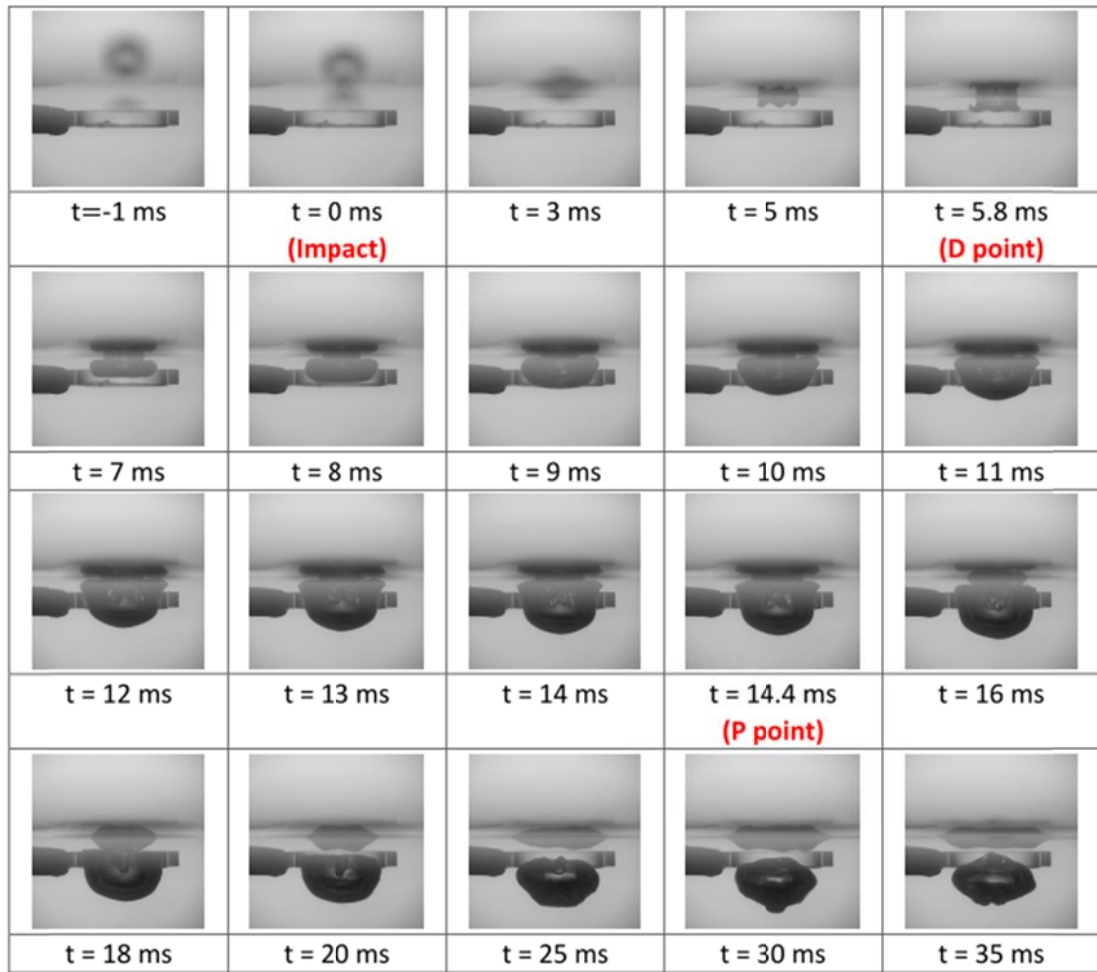
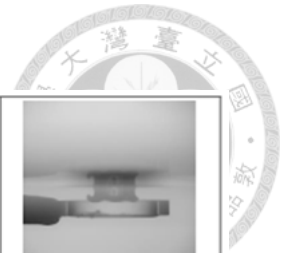


圖 4.2.1-5 Ring F，於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖

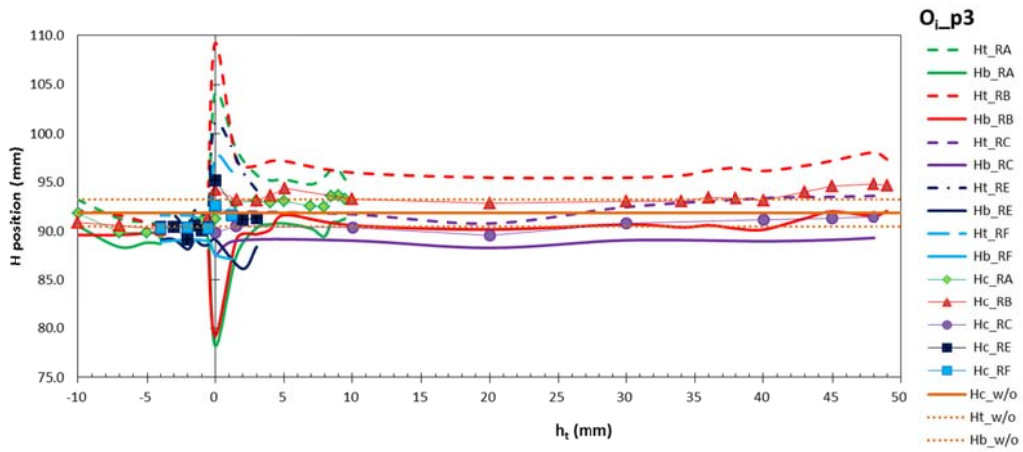


圖 4.2.1-6 統整不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成大氣泡高度上下邊界

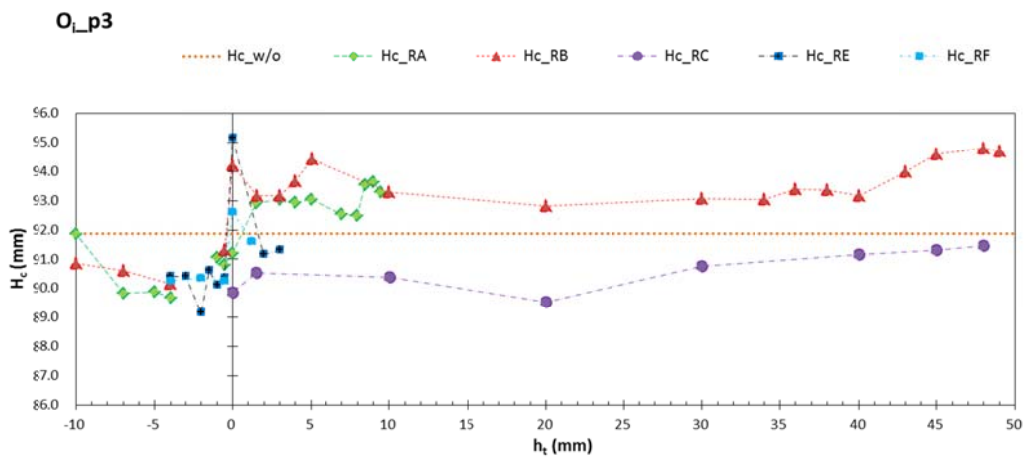


圖 4.2.1-7 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成大氣泡寬幅中心(H_c)位置關係圖

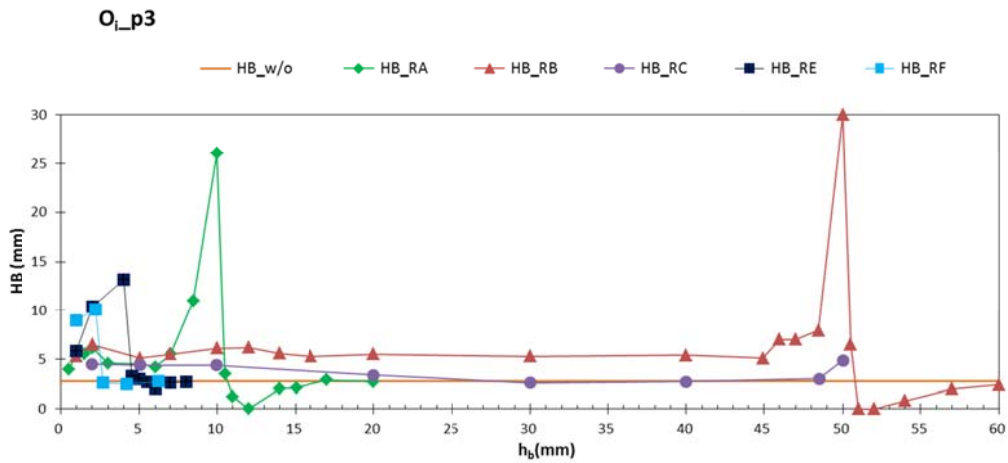


圖 4.2.1-8 不同限制環下緣深度(h_b)與其可造成大氣泡寬幅(HB)關係圖

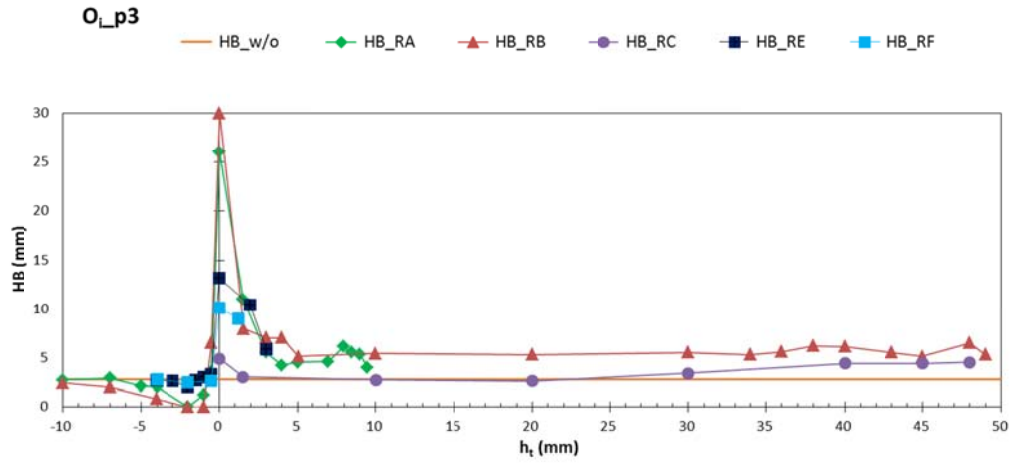


圖 4.2.1-9 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成 O_{i_p3} 大氣泡寬幅(HB)關係圖

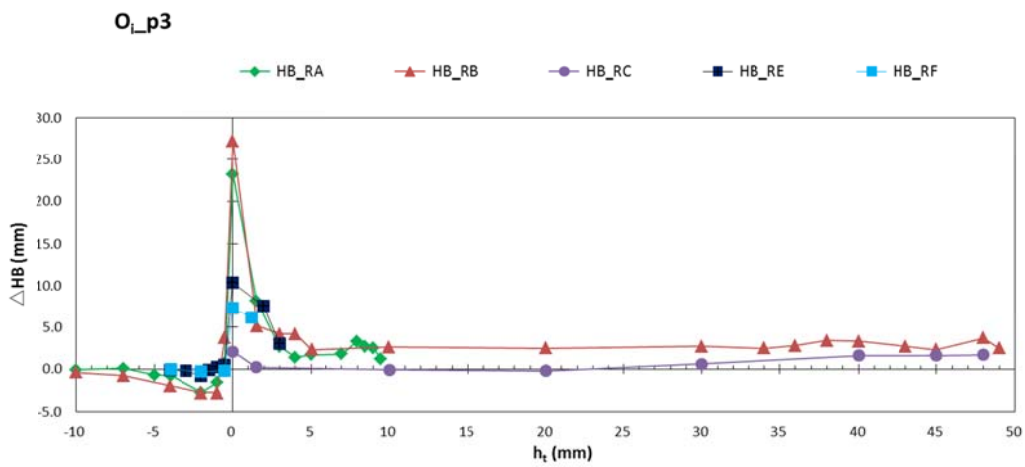


圖 4.2.1-10 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成大氣泡寬幅增益(ΔHB)關係圖

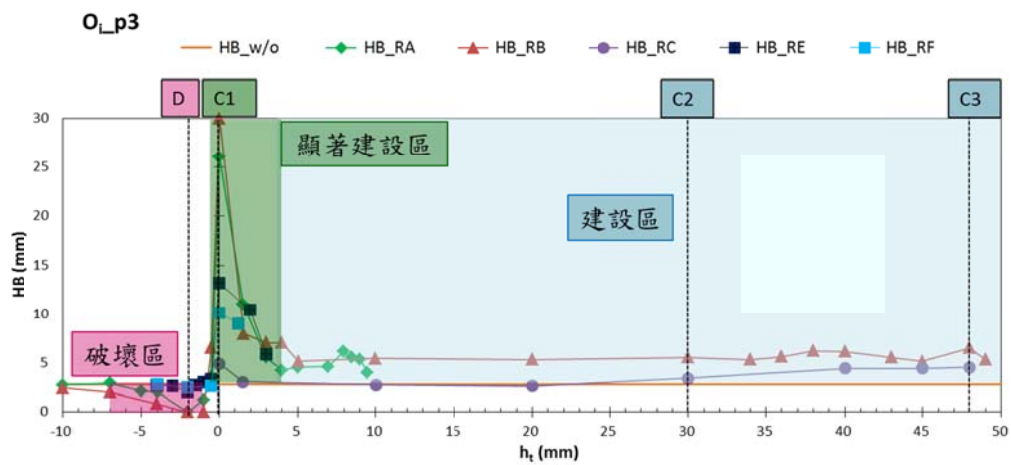


圖 4.2.1-11 限制環上緣深度(h_t)劃分三大區塊：建設區、顯著建設區和破壞區

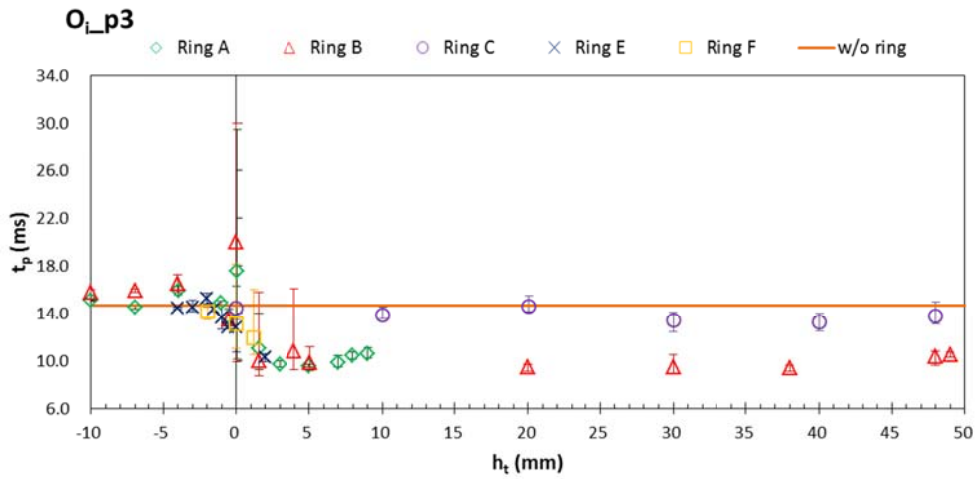
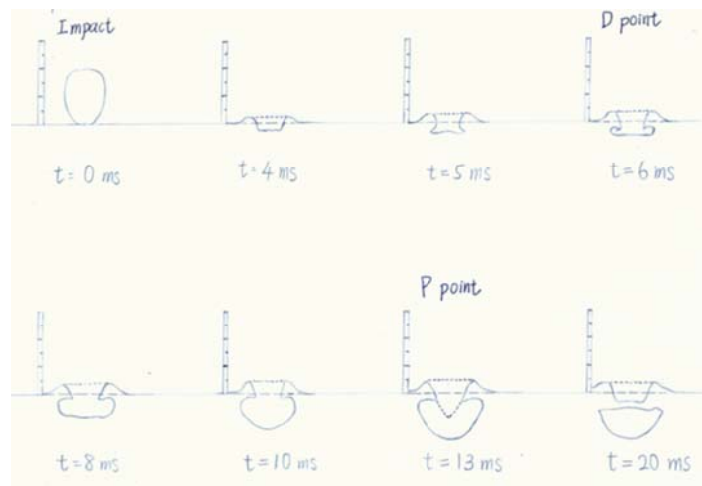
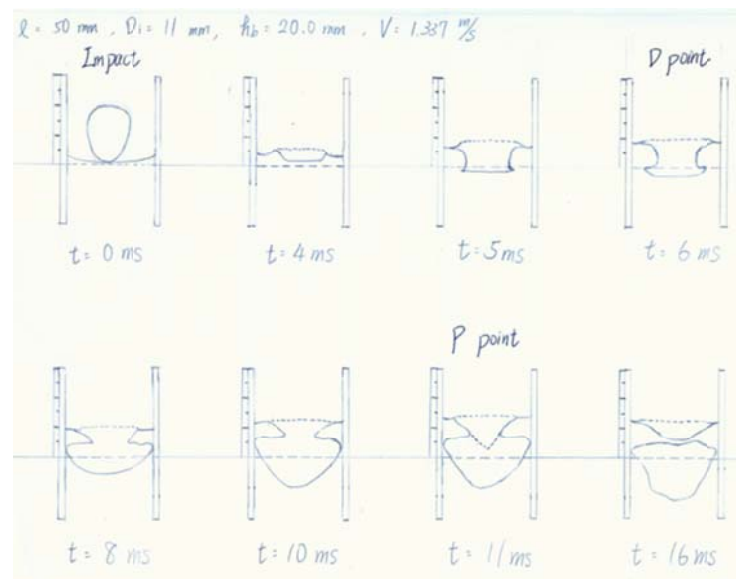


圖 4.2.1-12 不同限制環上緣深度(h_t)與大氣泡的斷裂時間關係圖



(a) 無限制環 $V=1.337$ m/s 下



(b) 有限制環 RB($h_t = 30$ mm), $V=1.337$ m/s

圖 4.2.2-1 以大氣泡形成過程手繪時序圖，來表示其形成過程液面抬升狀況

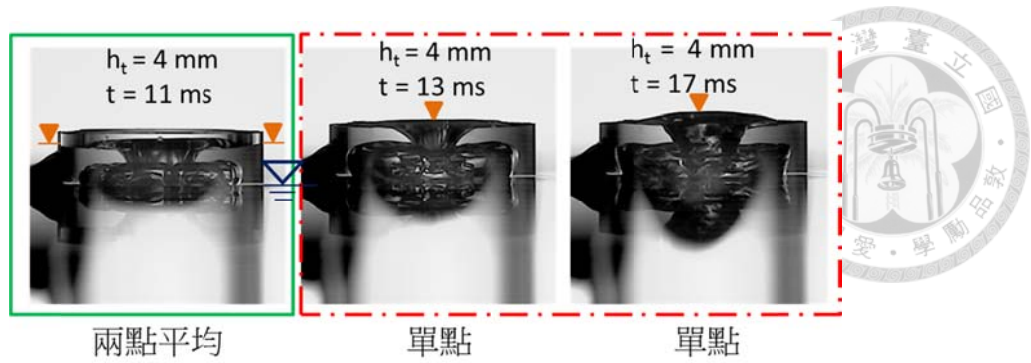


圖 4.2.2-2 抬升高度(h_r)兩種不同的計算方式示意圖

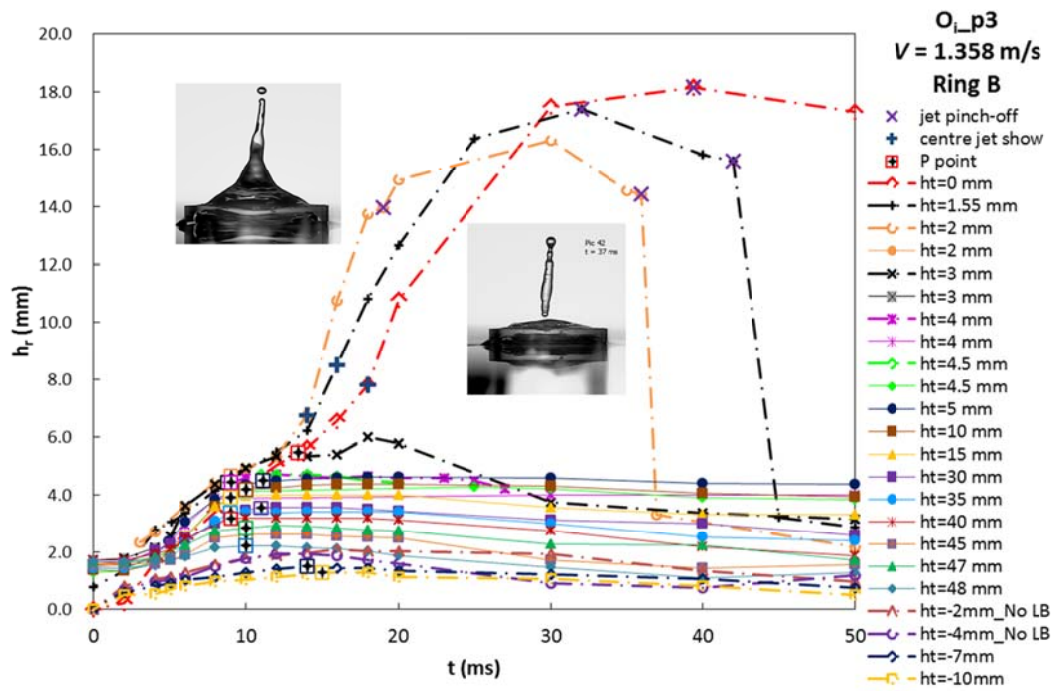


圖 4.2.2-3 同一速度下，不同上緣深度所形成的液面抬升(h_r)高度與時間關係圖

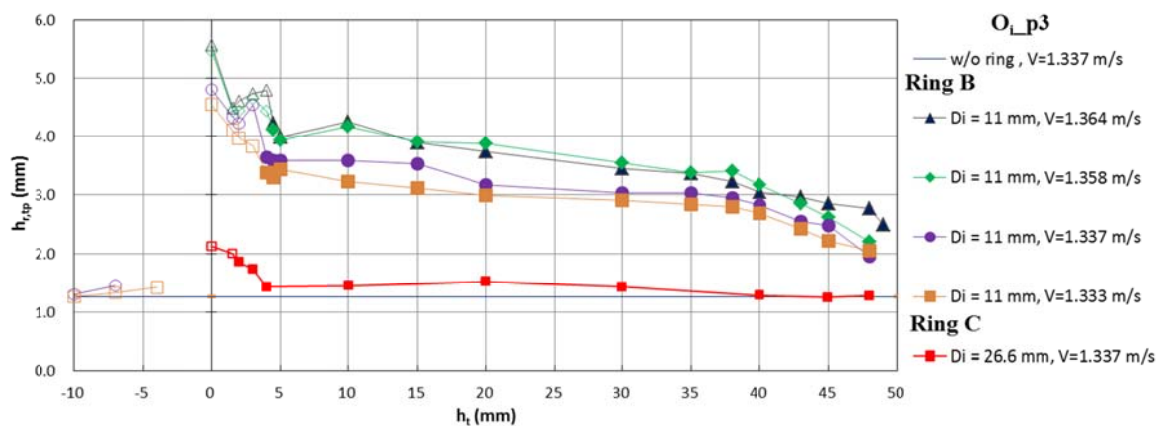


圖 4.2.2-4 不同的上緣深度(h_t)於大氣泡斷裂時間點(t_p)，液面抬升高度(h_r)關係

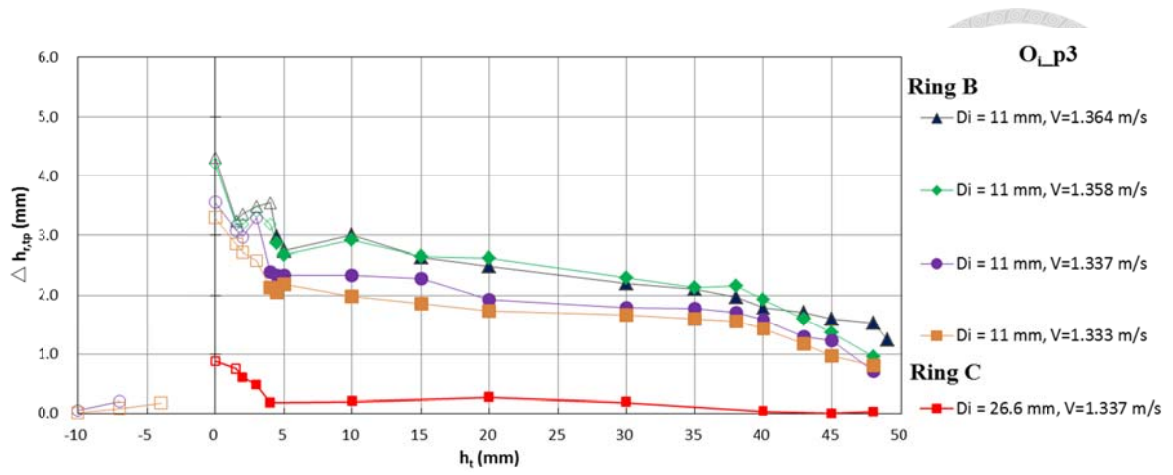


圖 4.2.2-5 不同的上緣深度(h_t)於 P 點液面抬升高度增益($\Delta h_{r,tp}$)

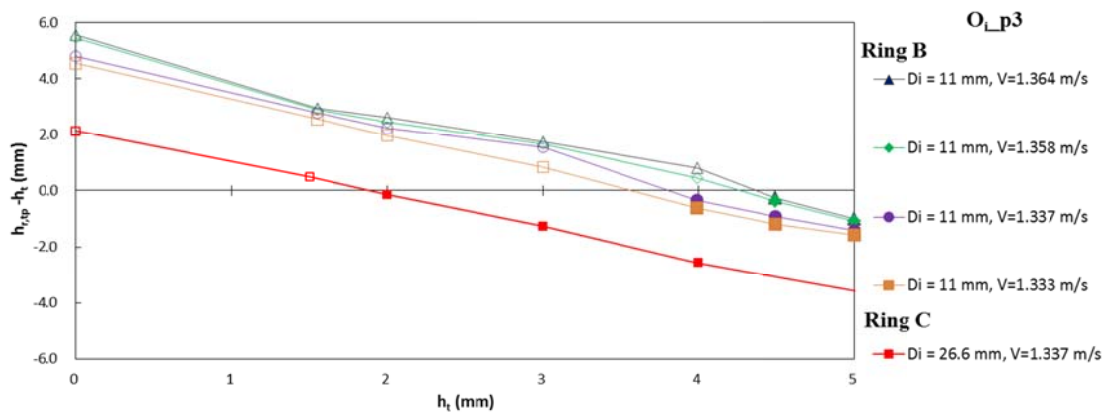
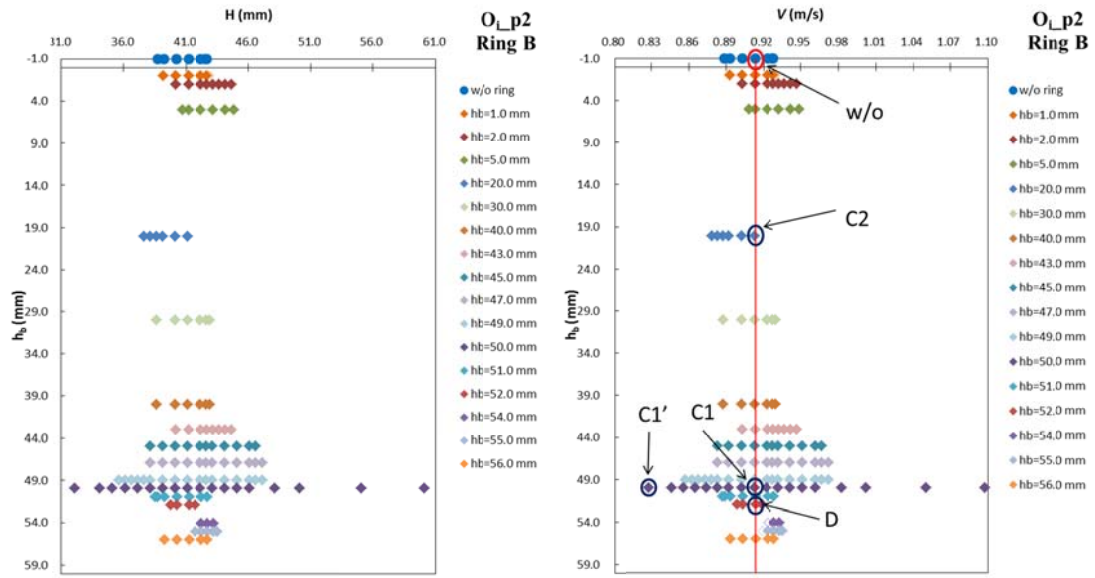
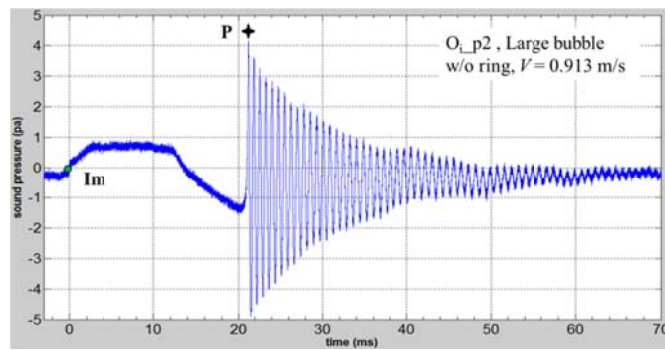
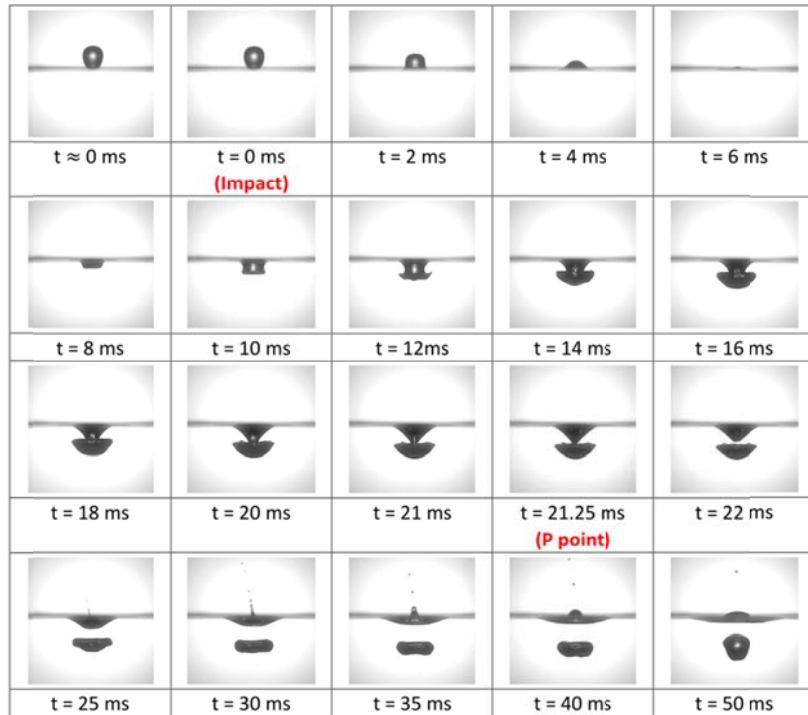


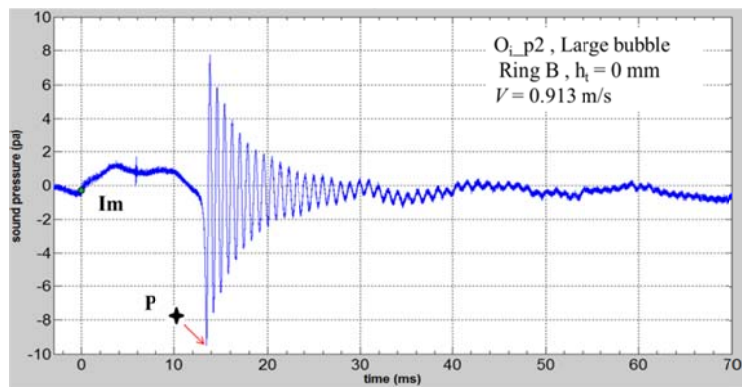
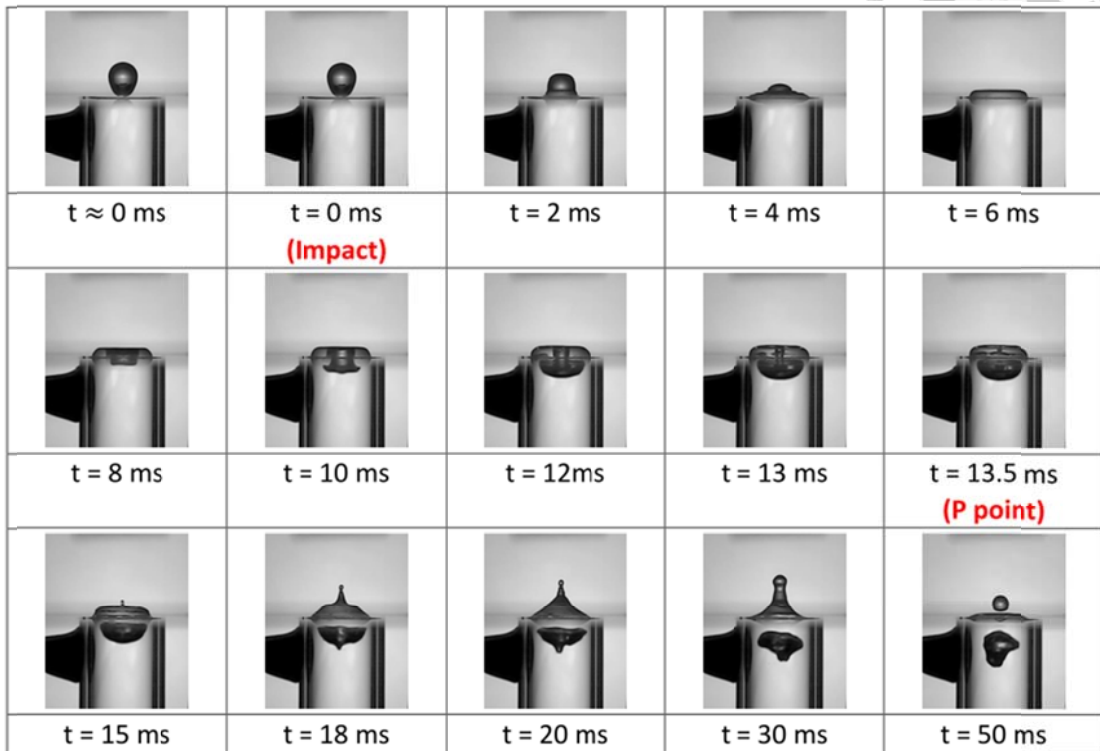
圖 4.2.2-6 顯著建設區與建設區的劃分與抬升高度之關係



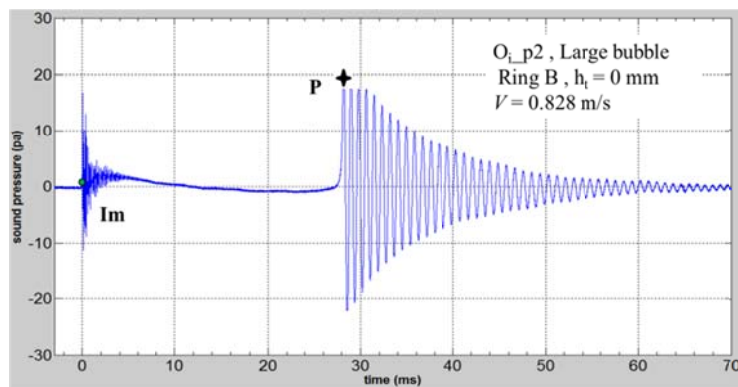
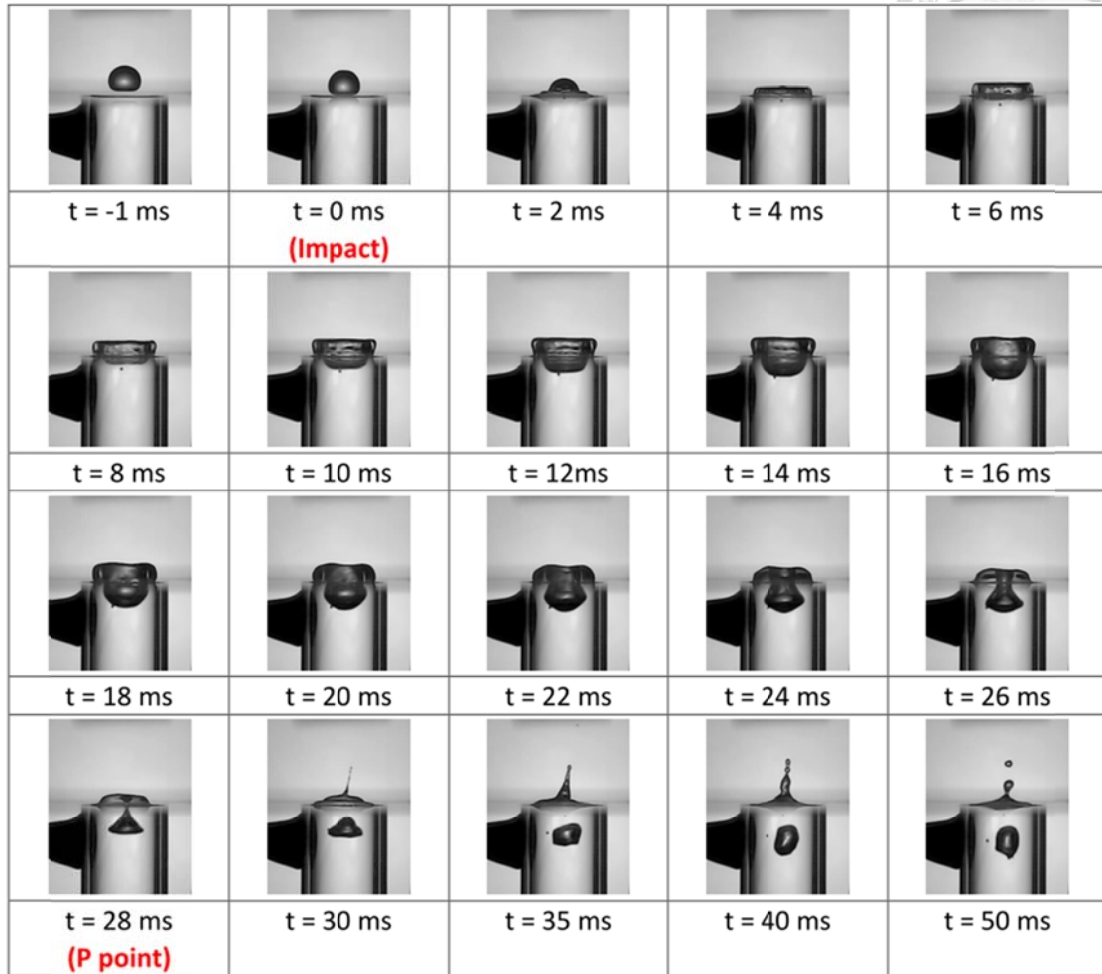
(a) w/o ring, $V = 0.913$ m/s



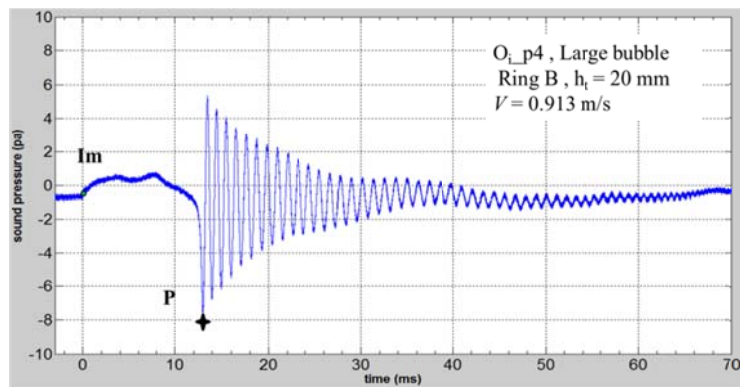
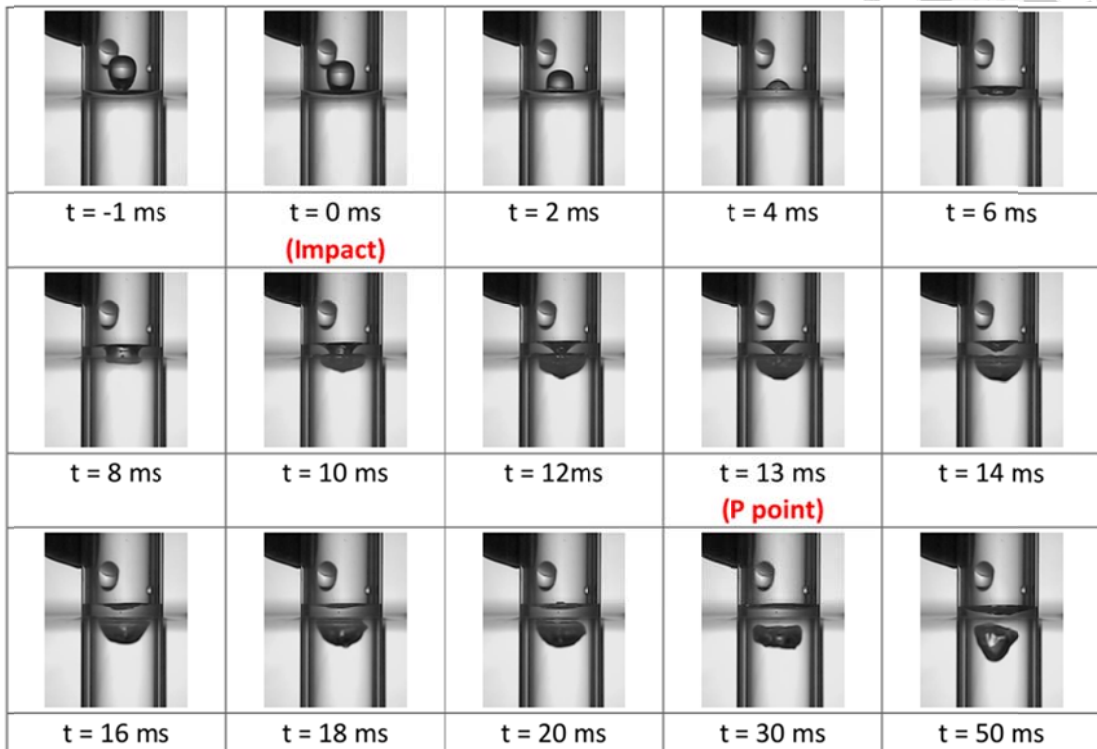
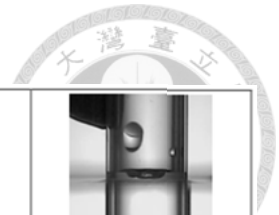
(b) C1. Ring B, $h_b = 50$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 0.913$ m/s



(c) C1'. Ring B, $h_b = 50$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 0.828$ m/s



(d) C2. Ring B, $h_b = 30$ mm, $h_t = 20$ mm, $V = 0.913$ m/s



(e) D. Ring B, $h_b = 52 \text{ mm}$, $h_t = -2 \text{ mm}$, $V = 0.913 \text{ m/s}$ (水面下)

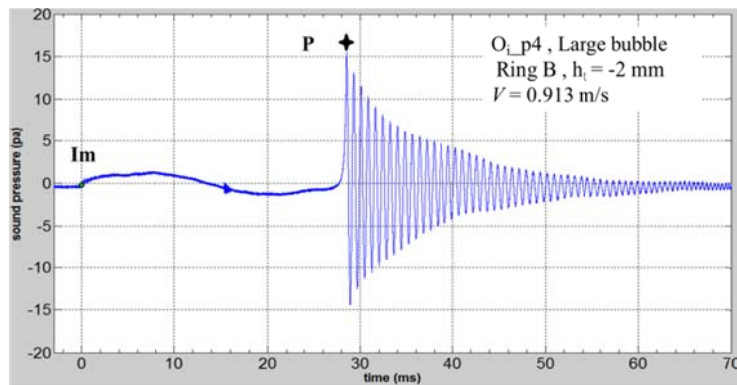
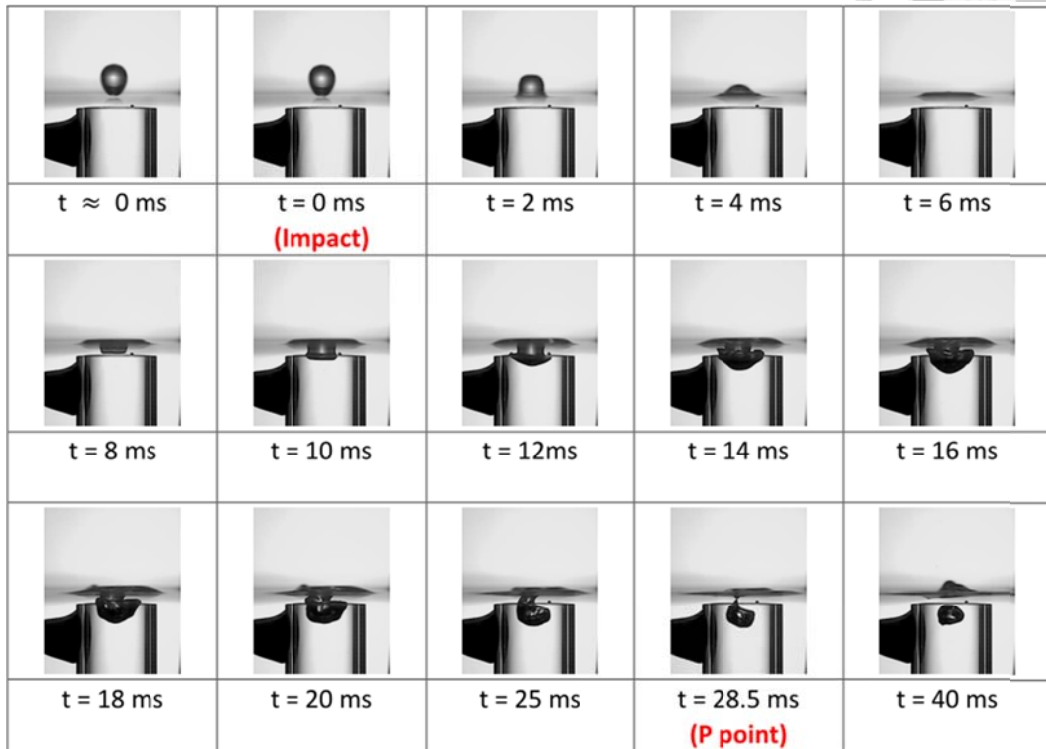
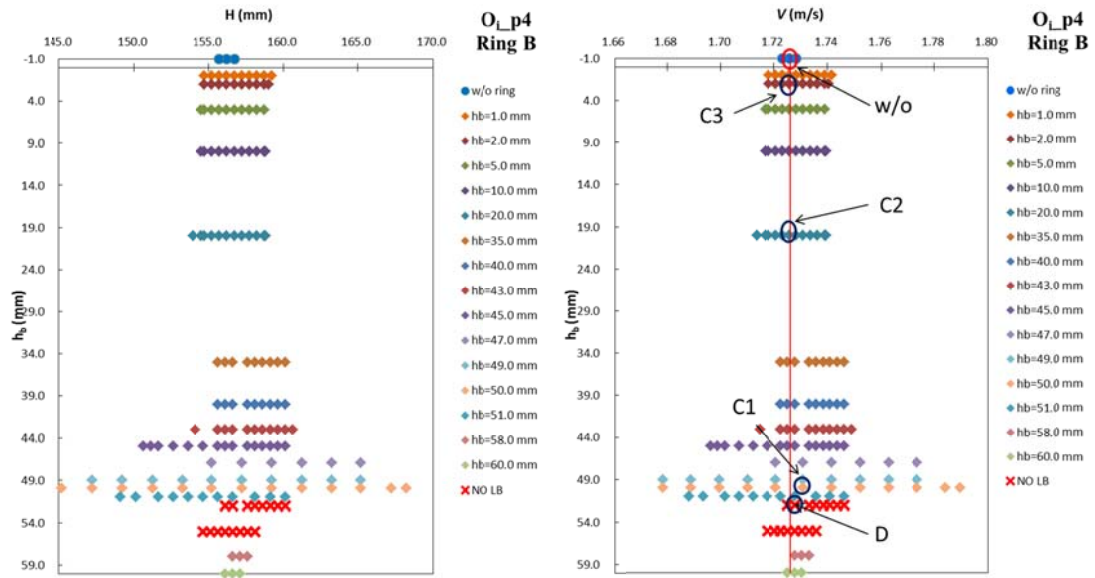
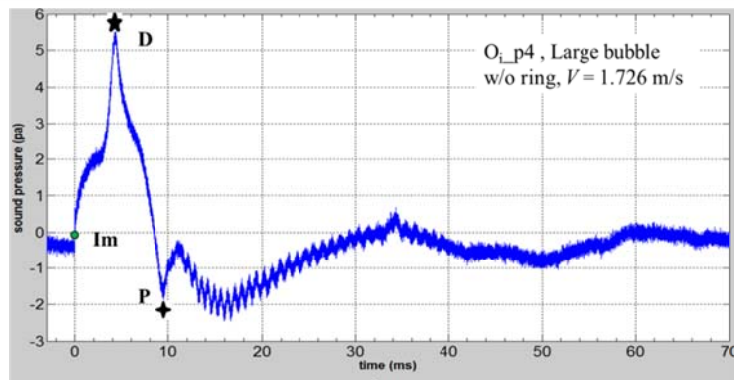
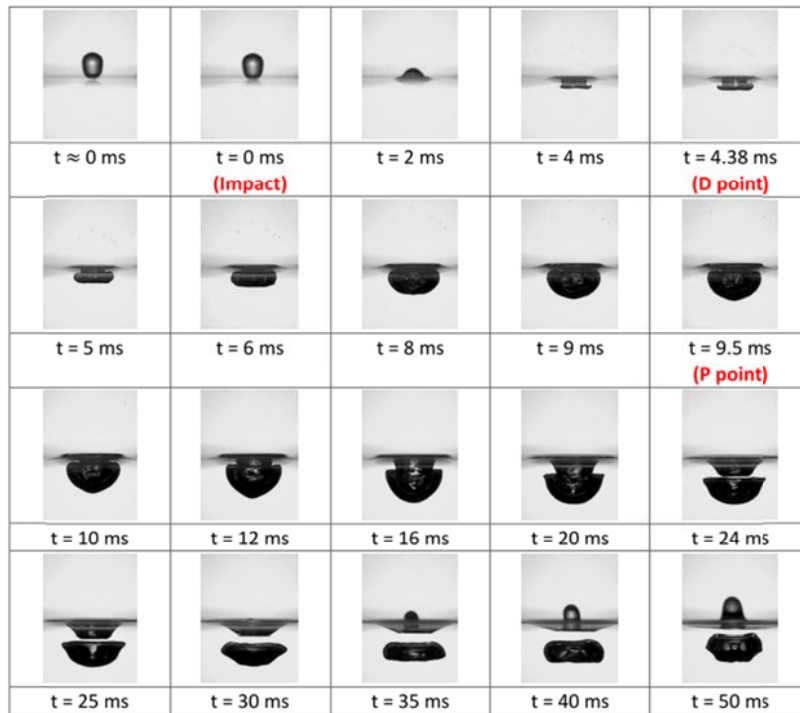


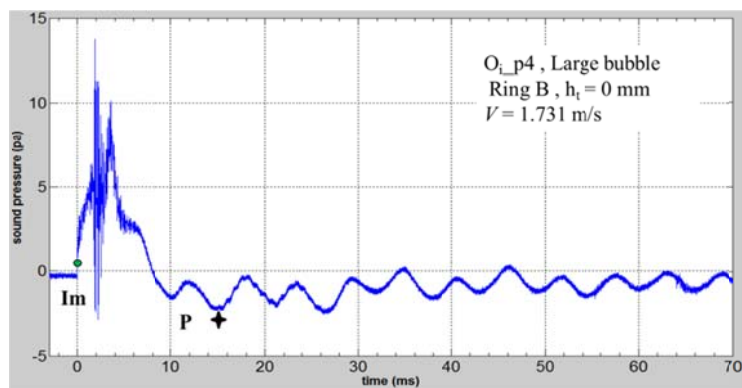
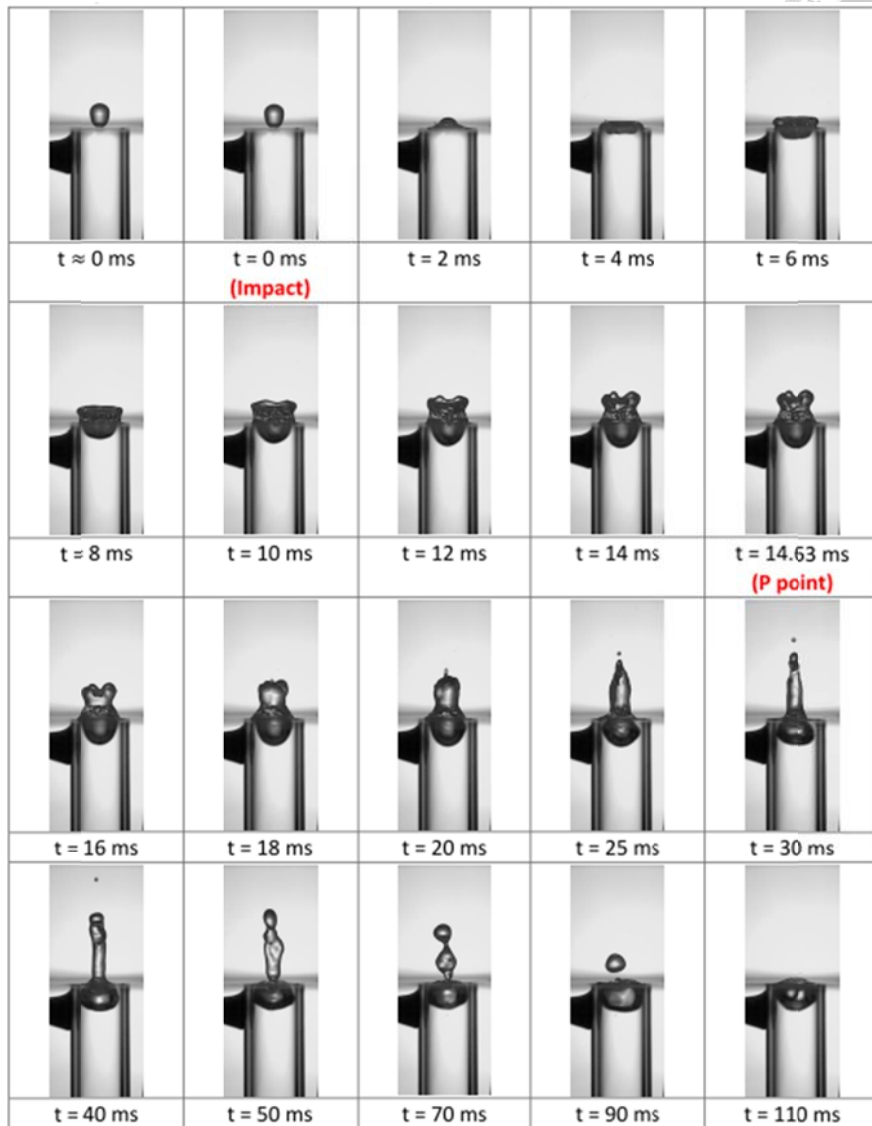
圖 4.2.3-1 O_i_{p2} , Ring B，於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖



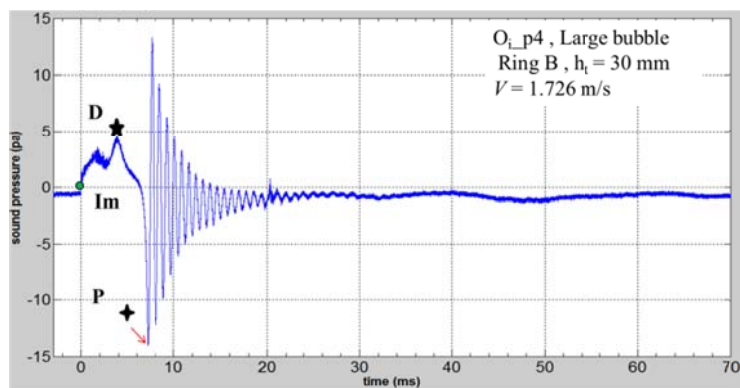
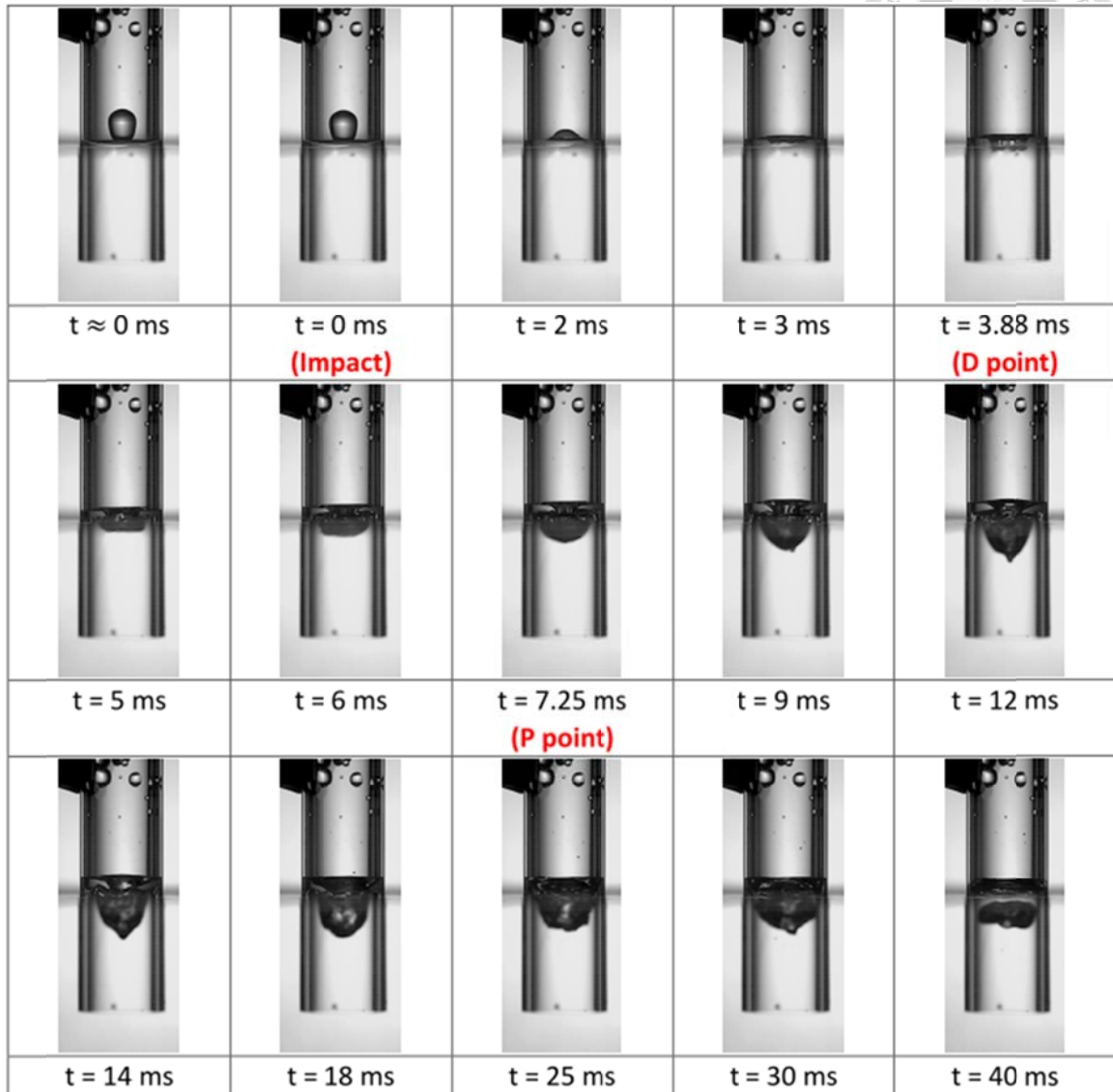
(a) w/o ring, $V = 1.726$ m/s



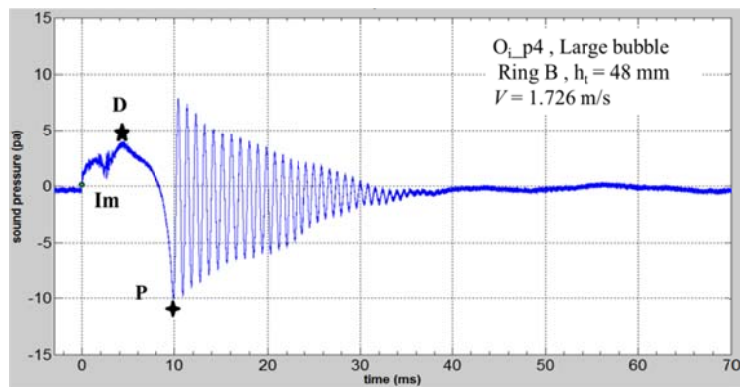
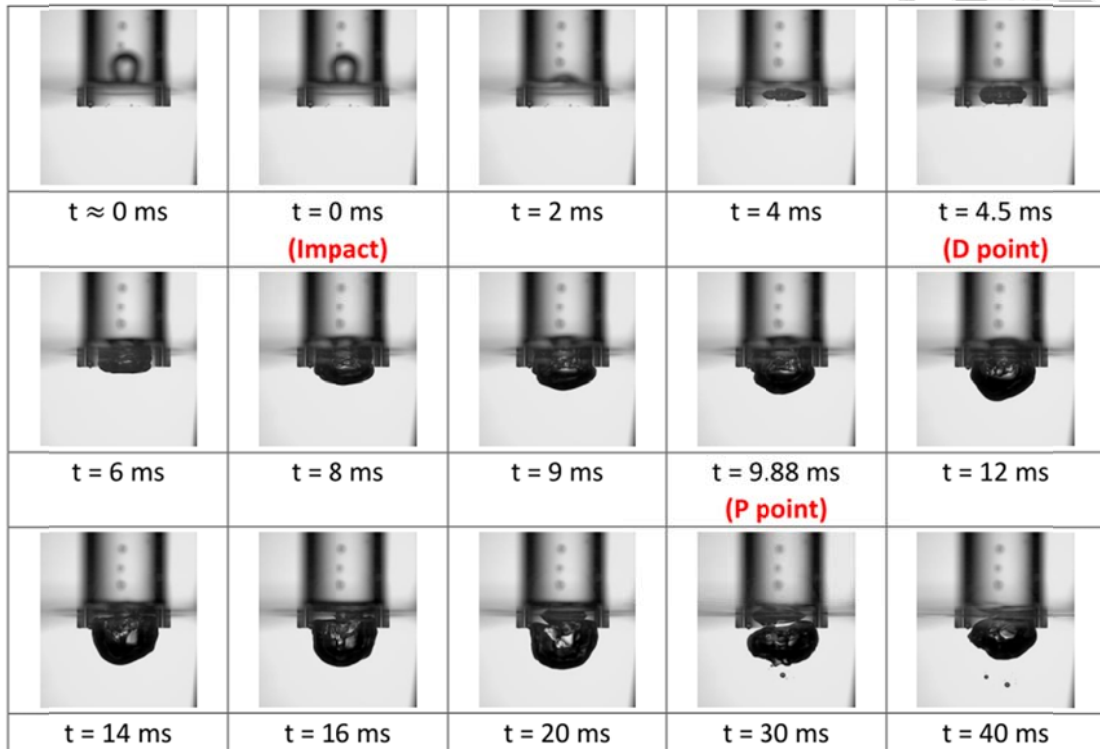
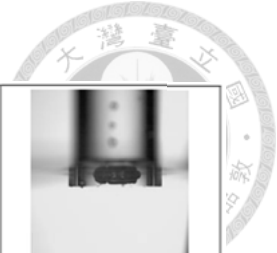
(b) C1. Ring B, $h_b = 50$ mm, $h_t = 0$ mm, $V = 1.731$ m/s



(c) C2. Ring B, $h_b = 20$ mm, $h_t = 30$ mm, $V = 1.726$ m/s



(d) C3. Ring B, $h_b = 2$ mm, $h_t = 48$ mm, $V = 1.726$ m/s(水面下)



(e) D. Ring B, $h_b = 52 \text{ mm}$, $h_t = -2 \text{ mm}$, $V = 1.726 \text{ m/s}$

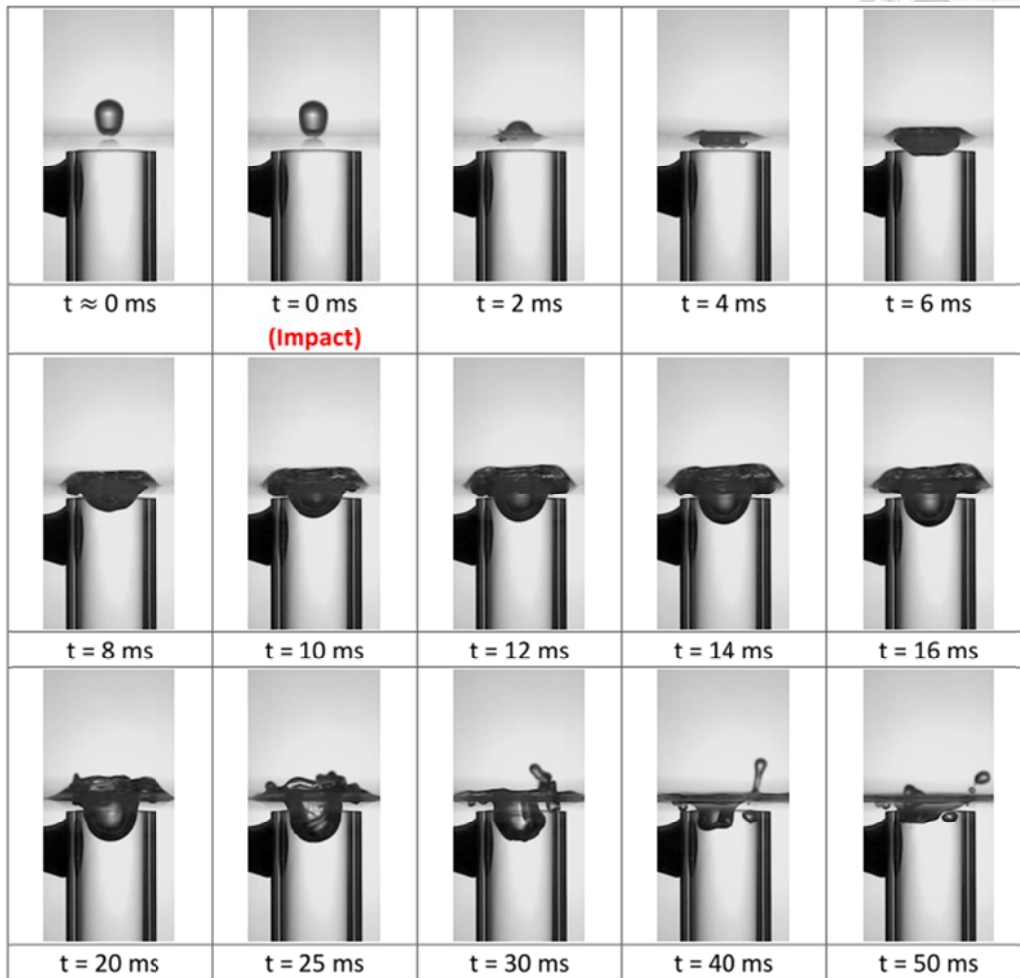


圖 4.2.3-2 Oi_p4, Ring B, 於不同下緣深度發生大氣泡高度/速度關係圖與其對應的大氣泡時序圖及聲壓圖

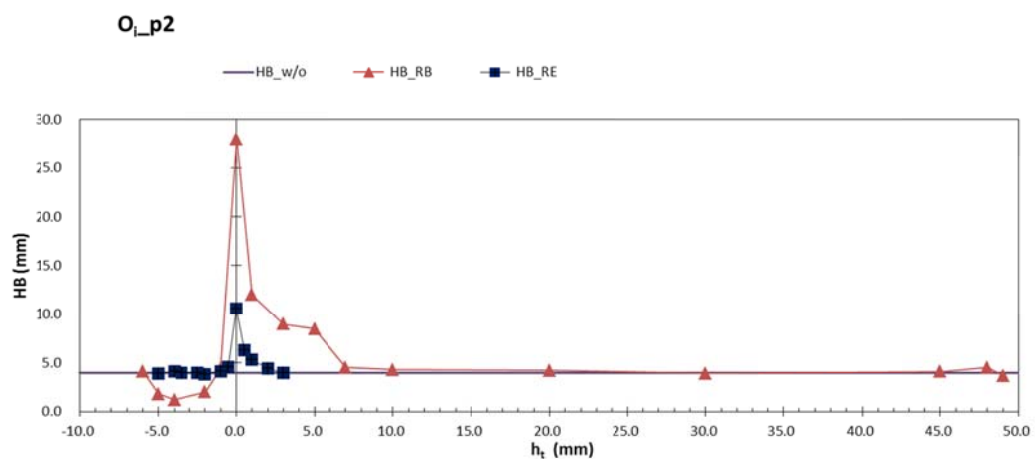


圖 4.2.3-3 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成 Oi_p2 大氣泡寬幅(HB)關係圖

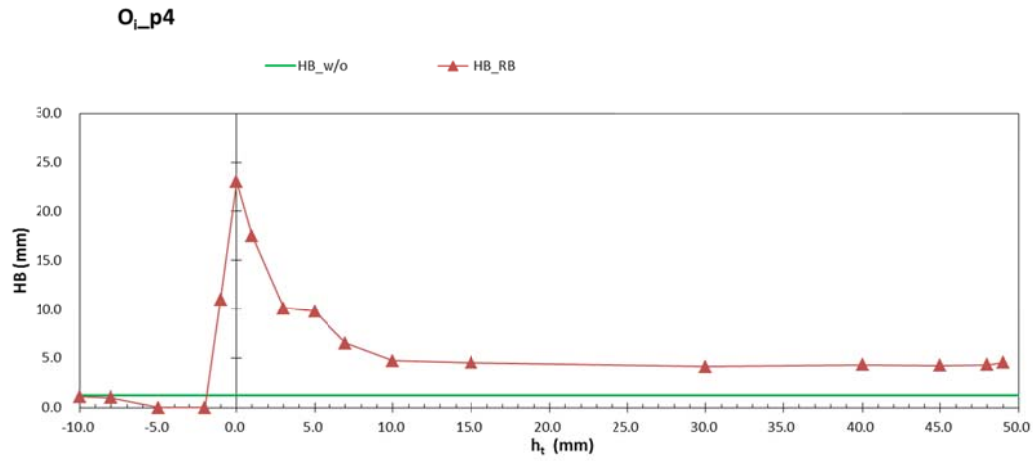


圖 4.2.3-4 不同限制環上緣深度(h_t)與其可造成 O_i _p4 大氣泡寬幅(HB)關係圖

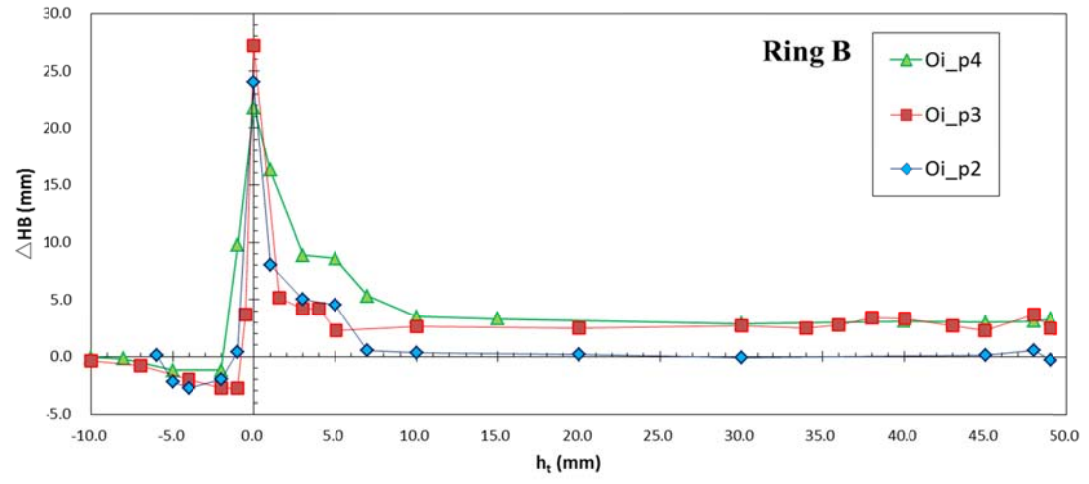
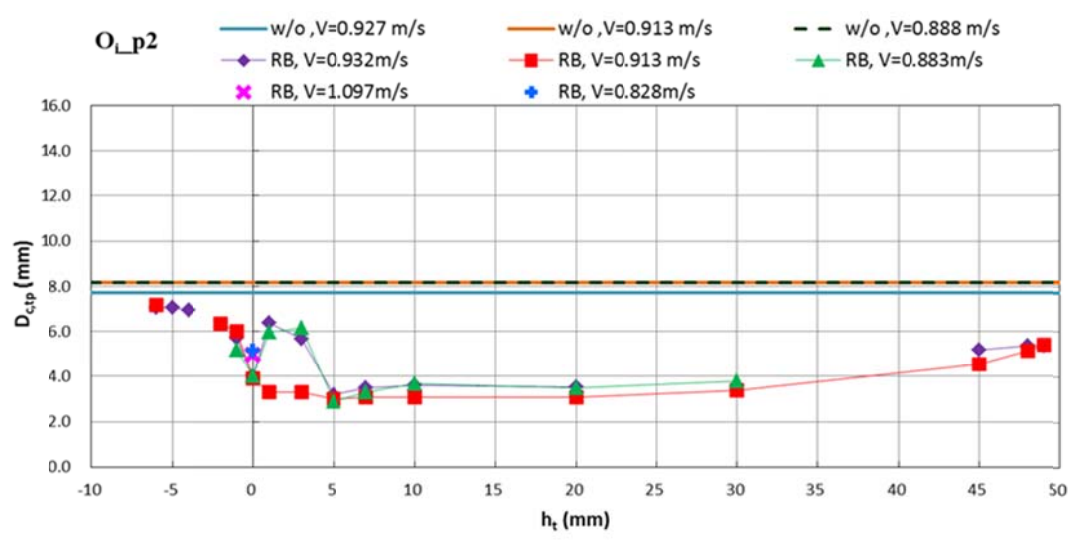
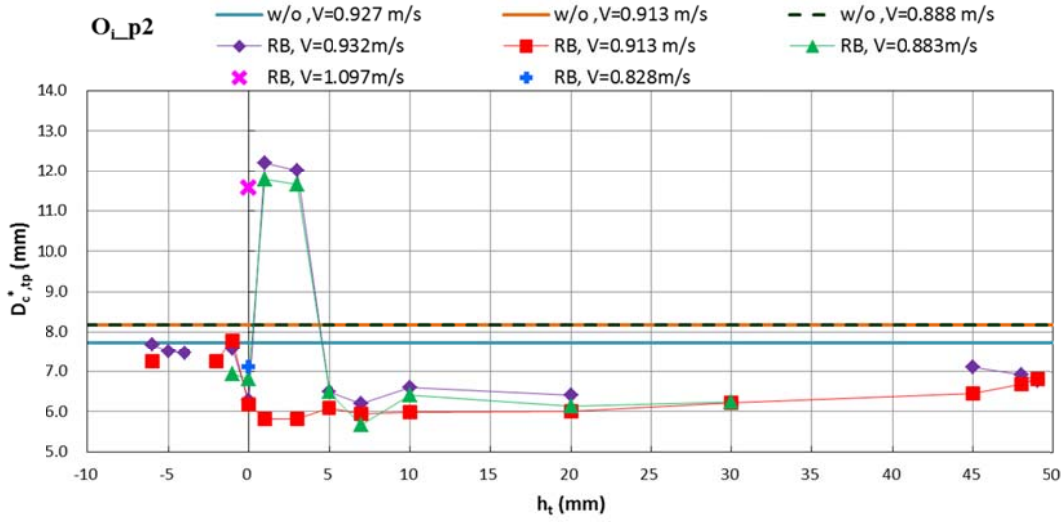


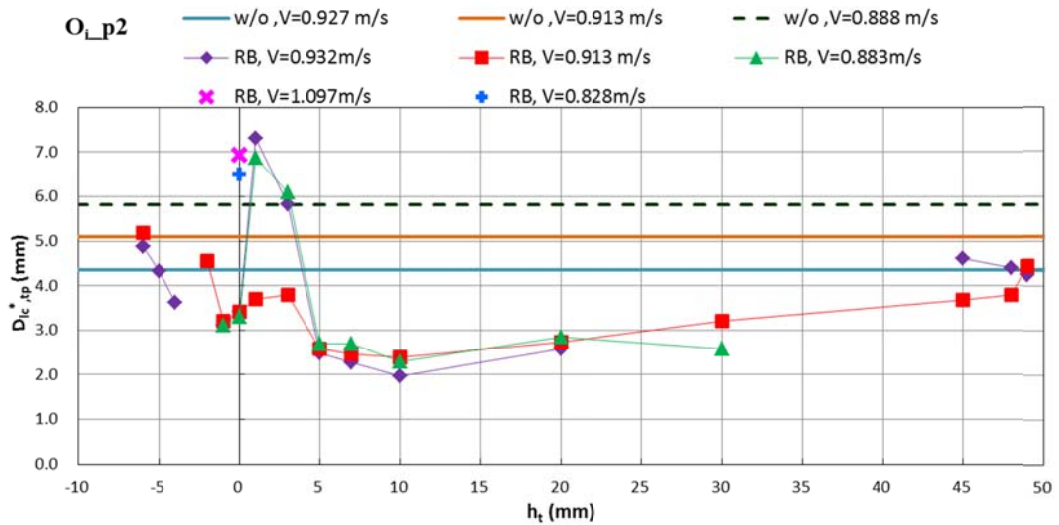
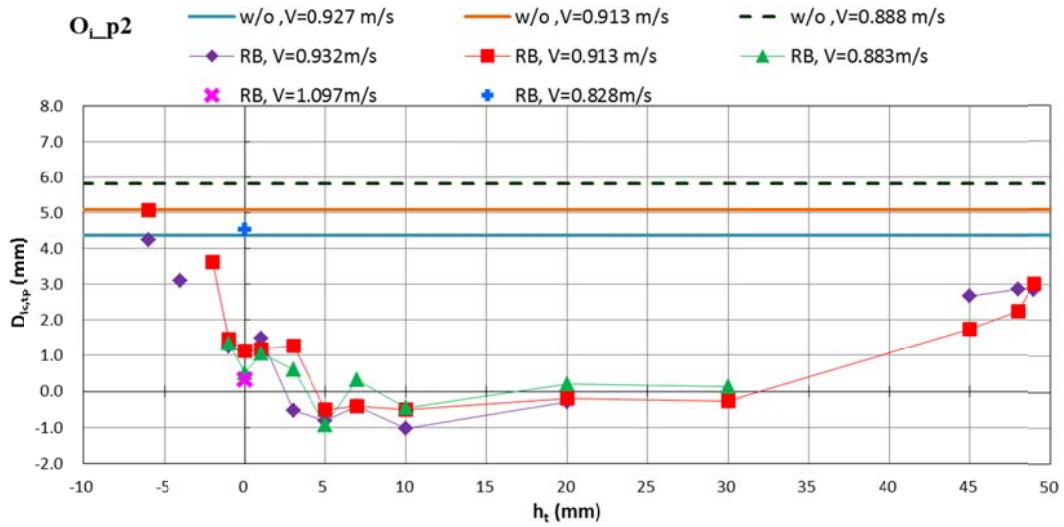
圖 4.2.3-5 不同 O_i _period 所造成大氣泡寬幅增益(ΔHB)關係圖

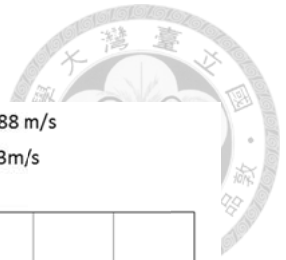
(a)





(b)





(C)

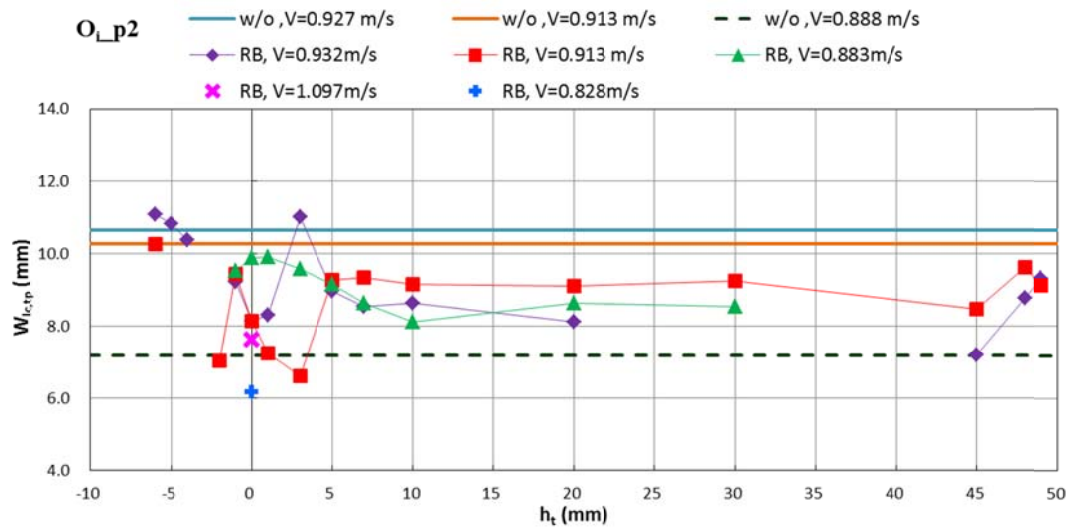
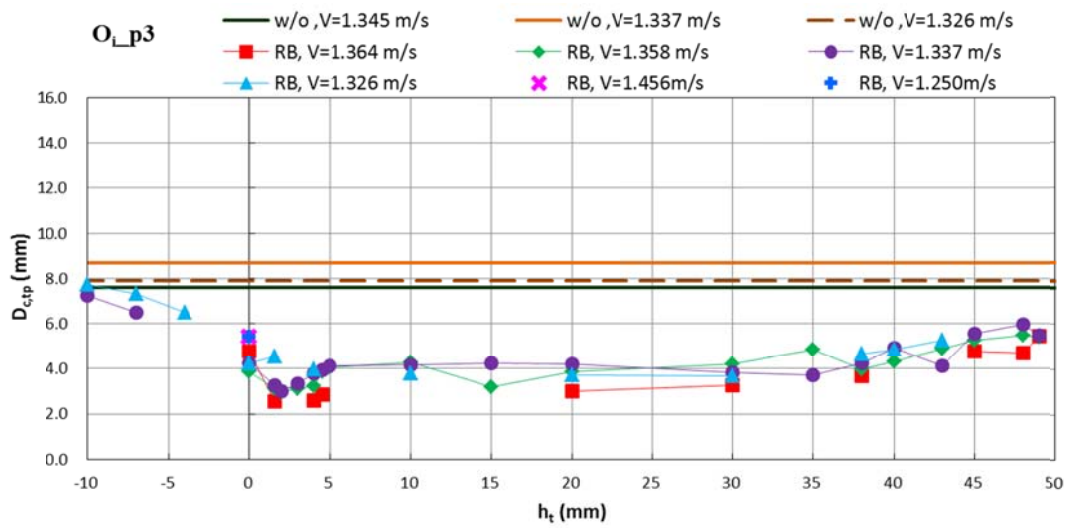
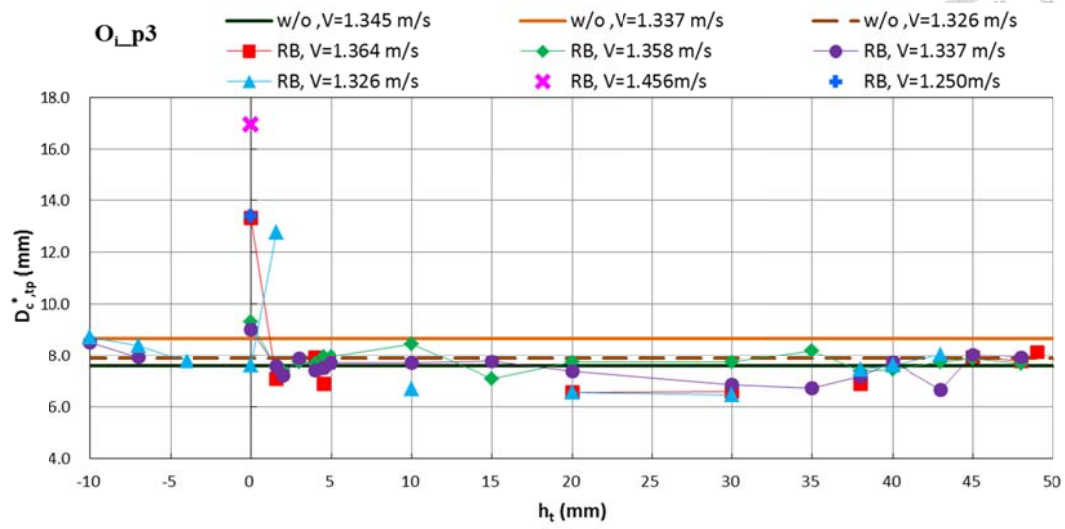


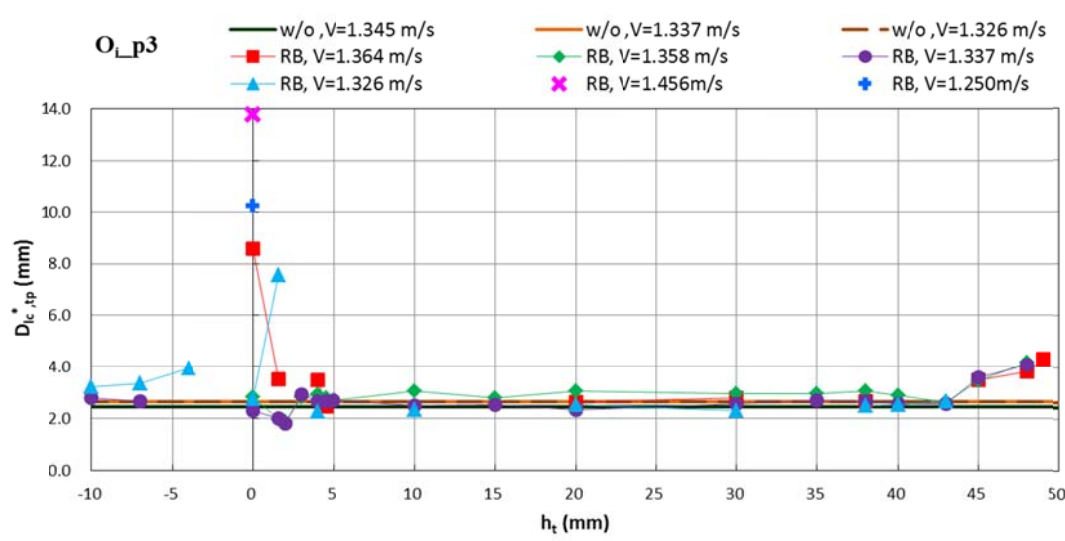
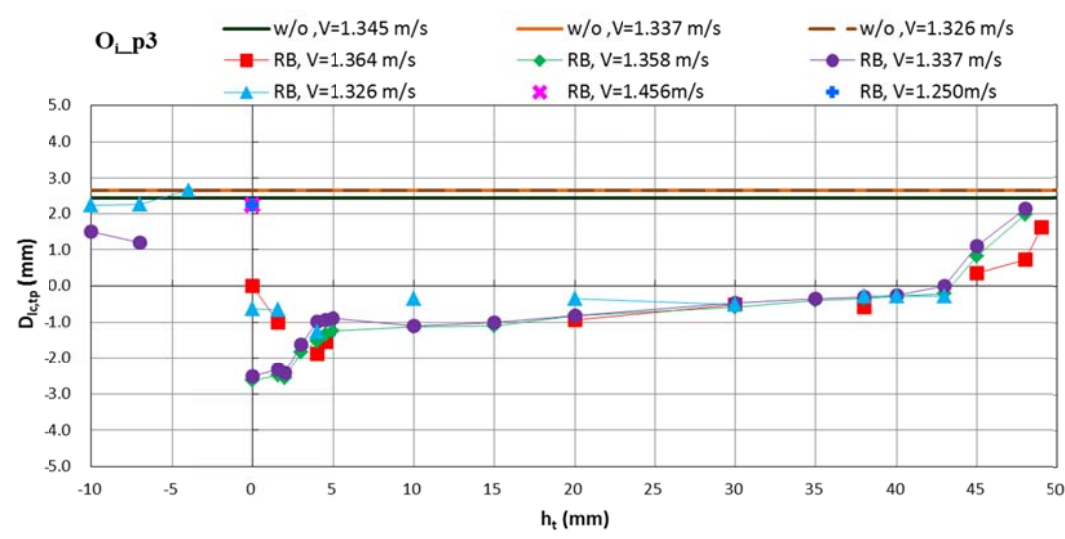
圖 4.3.1-1 於 O_{i_p3} 不同上緣深度下，所造成於斷裂時間的水窪外型比較圖

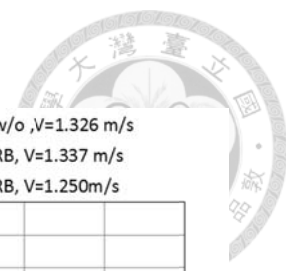
(a)



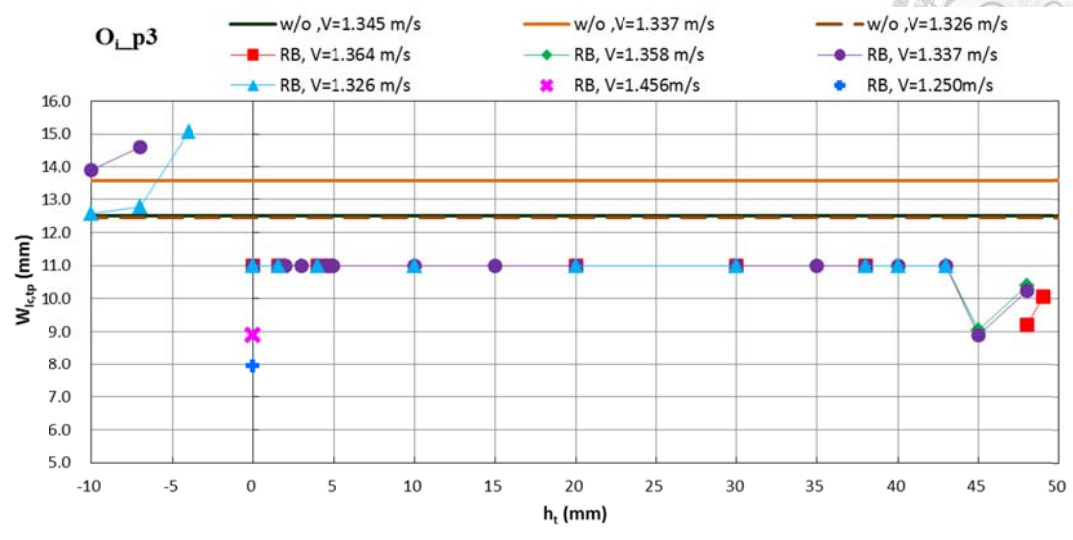


(b)





(C)



(e) Ring B 於 tp 時間點代表圖

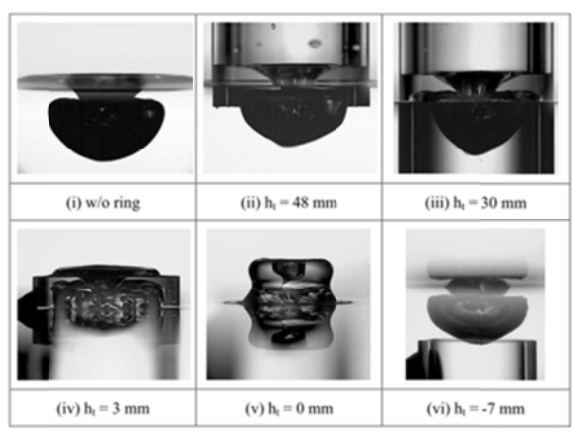
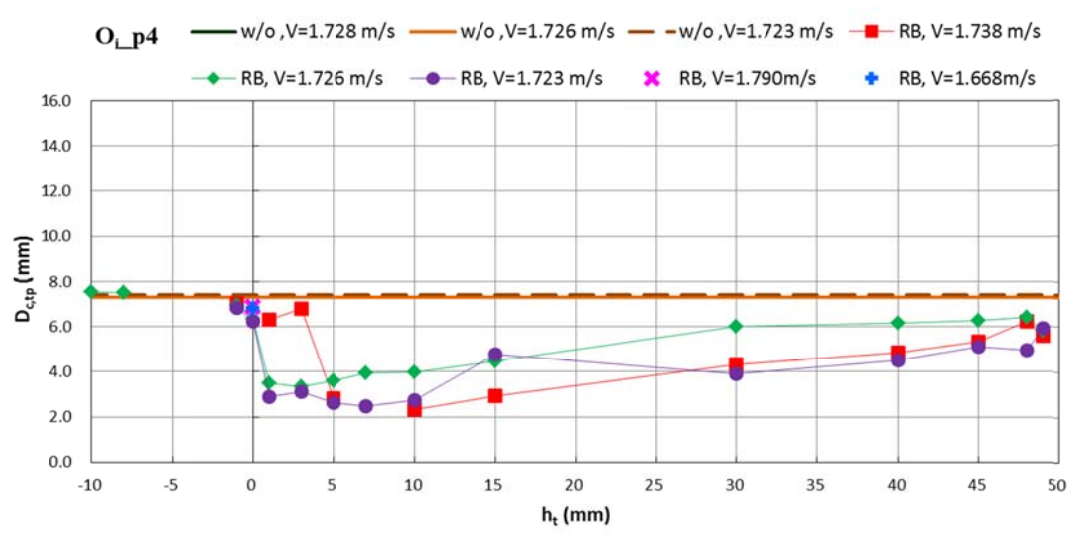
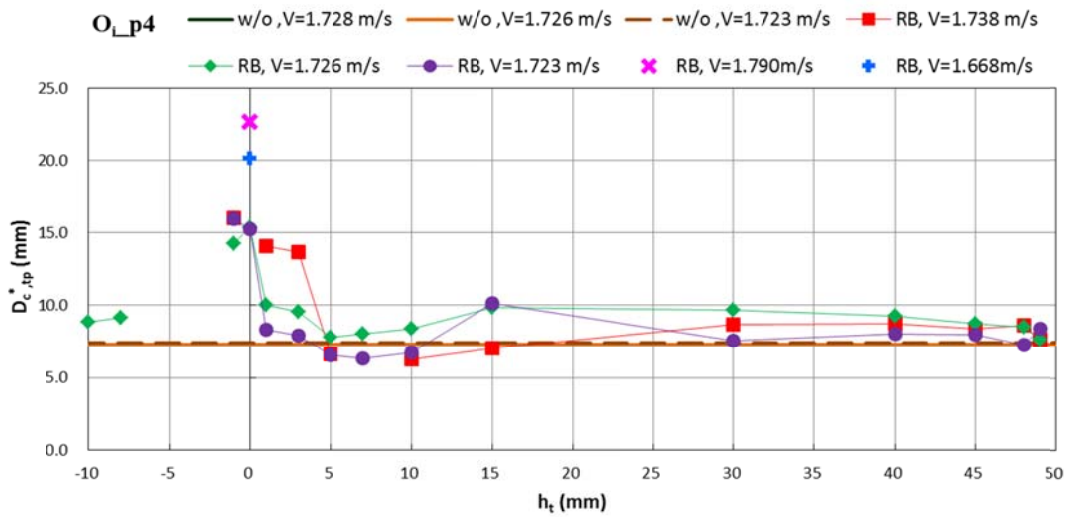


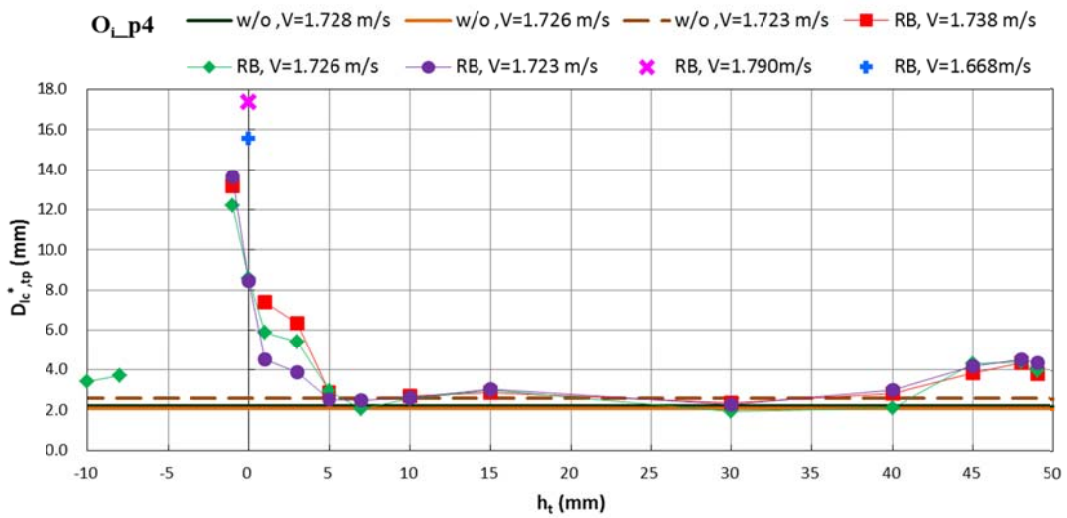
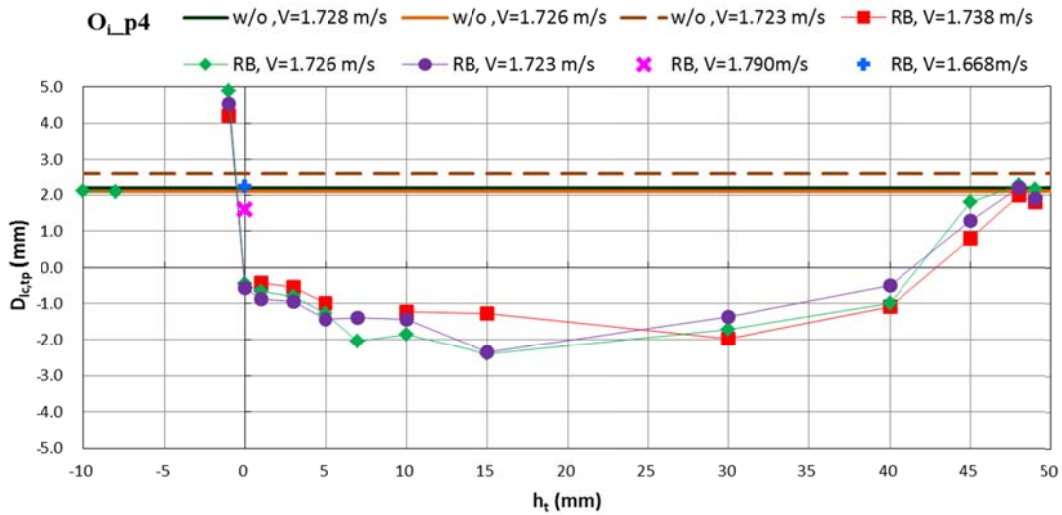
圖 4.3.1-2 於 O_i_p3 不同上緣深度下，所造成於斷裂時間的水塞外型比較圖

(a)





(b)



(c)

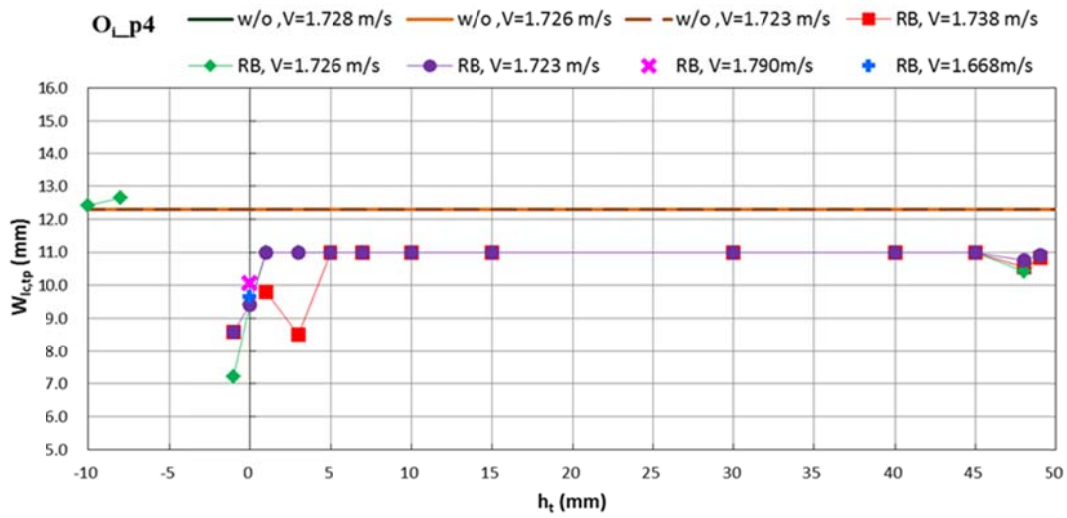
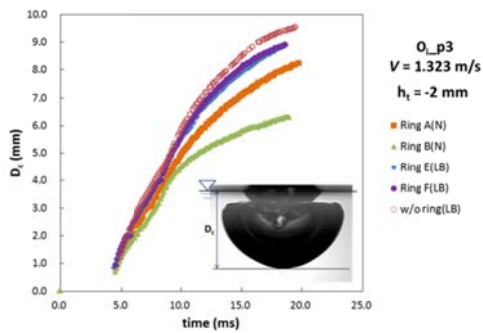


圖 4.3.1-3 於 O_i_{p4} 不同上緣深度下，所造成於斷裂時間的水窪外型比較圖

(a)



(b)

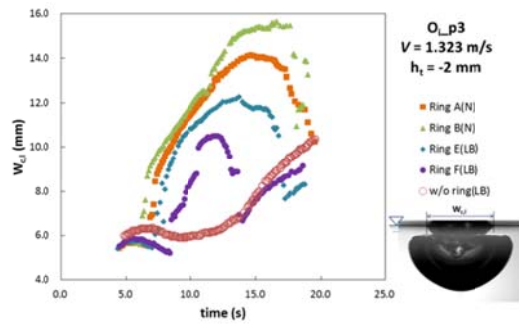


圖 4.3.2-1 $V = 1.323 \text{ m/s}$ 下，比較有限制環置於 $h_t = -2 \text{ mm}$ 與無限制環水窪發展

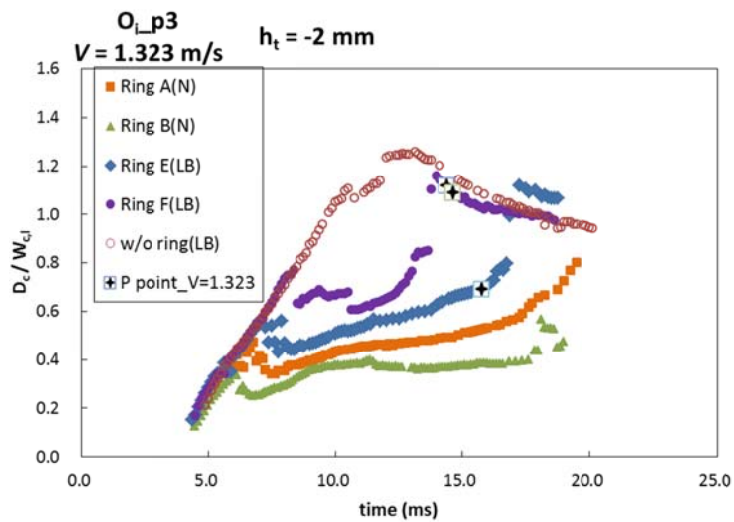


圖 4.3.2-2 利用無因次參數 $D_c / W_{c,i}$ 來顯現不同限制環所產生的破壞程度圖

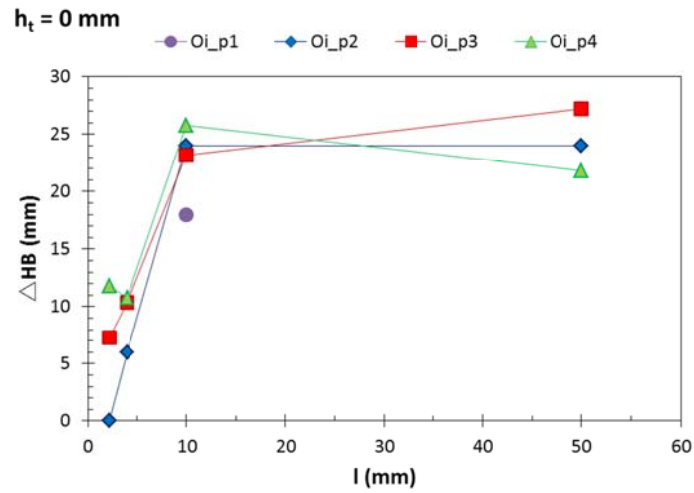


圖 4.3.3-1 不同限制環環長於 $h_t = 0$ mm，所造成大氣泡寬幅增益

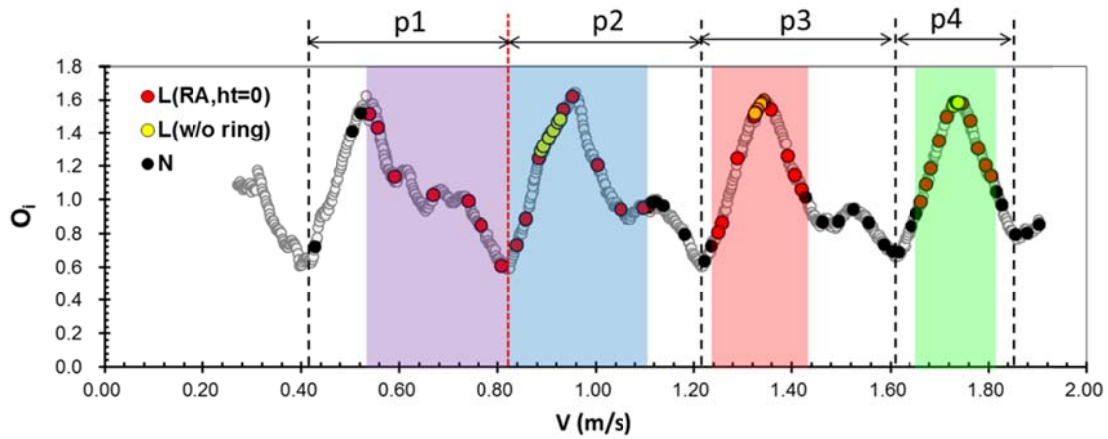


圖 4.3.3-2 由液滴形狀參數 O_i 來看 RA 於 $h_t = 0$ 所形成的大氣泡於振盪曲線分佈

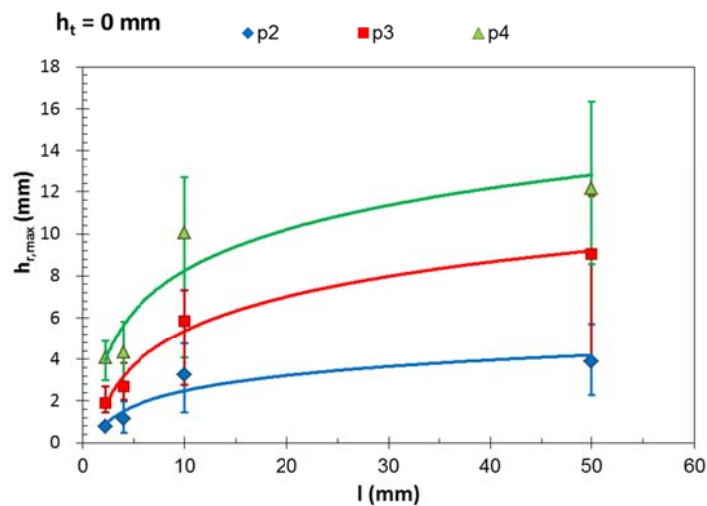


圖 4.3.3-3 不同限制環環長於 $h_t = 0$ mm，所造成液面最大抬升高度

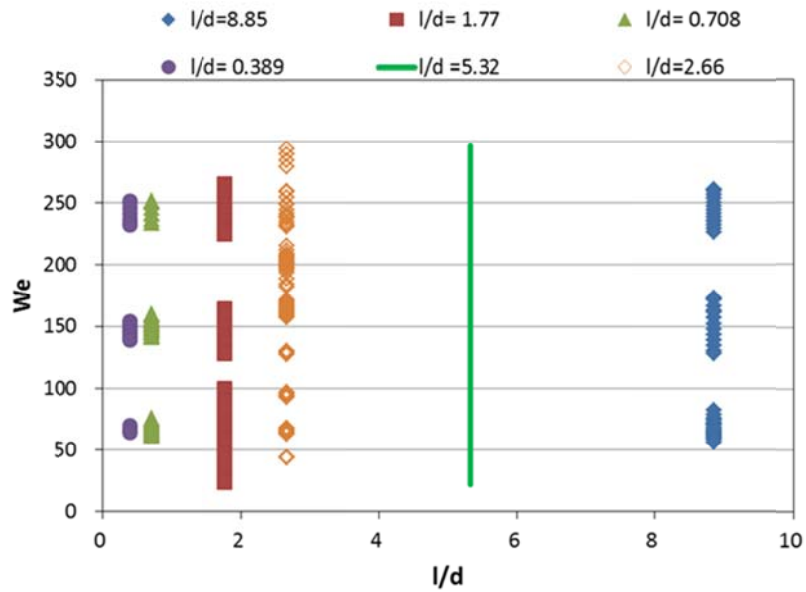
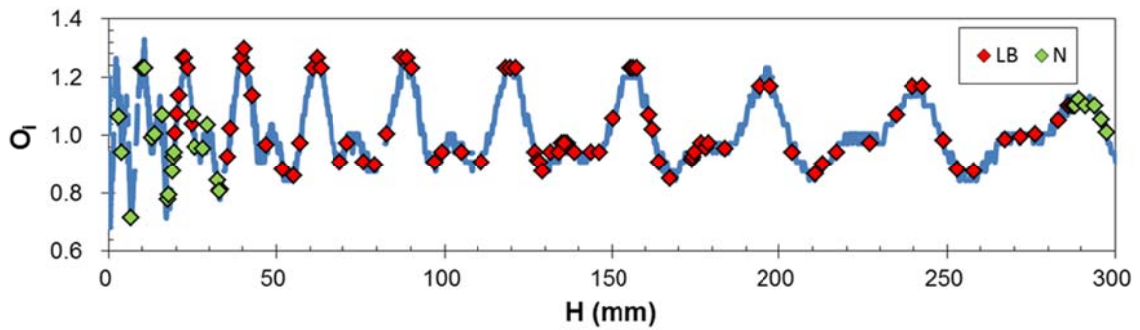
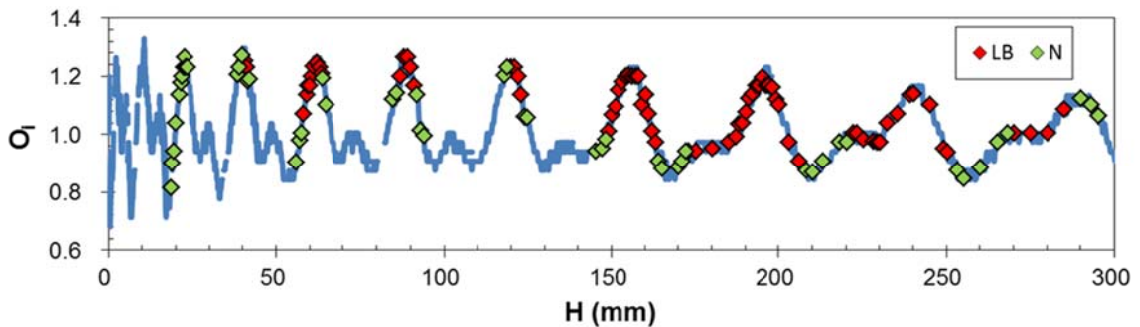


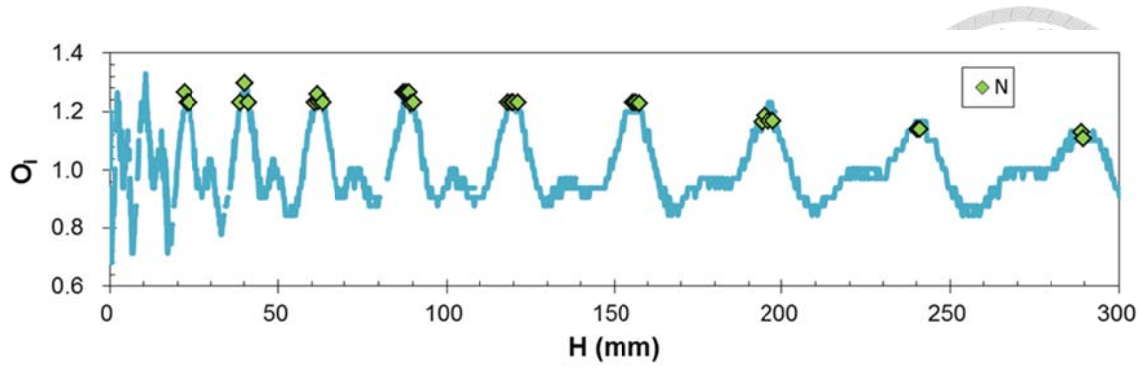
圖 4.3.3-4 限制環位置置於上緣深度為零處，將不同無因次限制環環長做比較
 (實心點為 $D_i^* = 1.95$ 、實線為 $D_i^* = 2.09$ 、空心點為 $D_i^* = 2.93$ 之結果)



(a) $D_i^* = 2.09$ 時，所產生大氣泡分佈於形狀參數 O_i 振盪曲線上



(b) $D_i^* = 2.93$ 時，所產生大氣泡分佈於形狀參數 O_i 振盪曲線上



(c) $D_i^* = 7.07$ 時，所做未產生大氣泡實驗點分佈於形狀參數 O_i 振盪曲線上
圖 4.3.4-1 不同的 D_i^* 下所產生大氣泡實驗點分佈於形狀參數 O_i 振盪曲線上

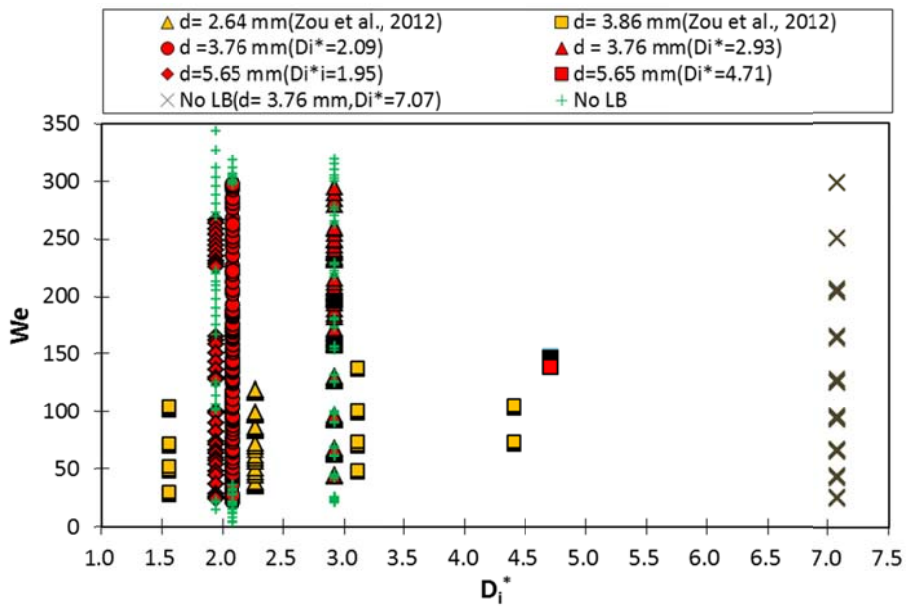


圖 4.3.4-2 將限制環位置置於上緣深度為零處，所產生大氣泡之範圍與 Zou et al.(2012) [19]比較

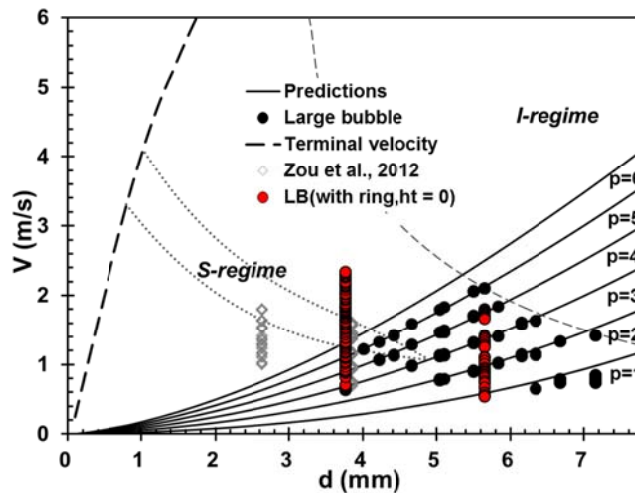


圖 4.3.4-3 將限制環位置置於上緣深度為零處，所形成大氣泡分佈於型態地圖

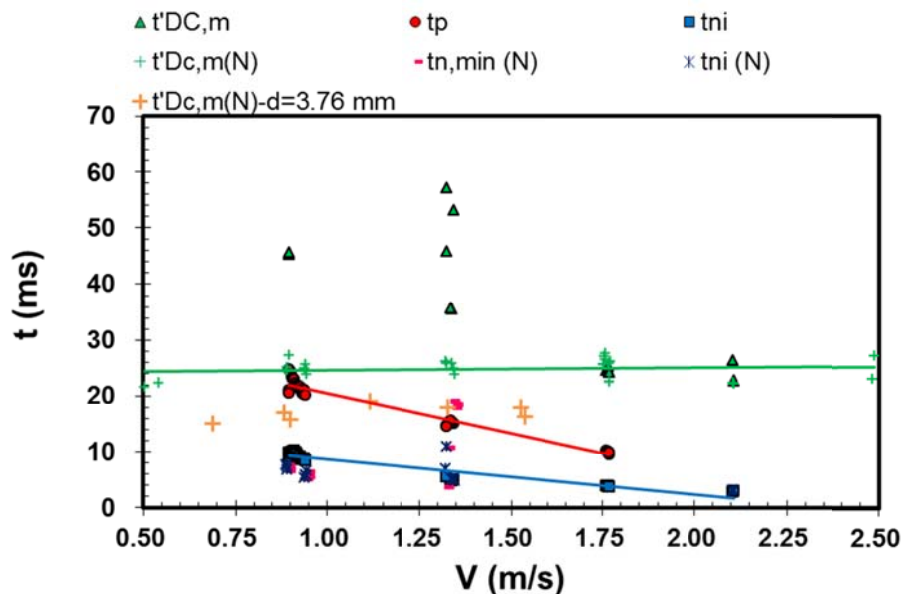


圖 4.3.5-1 沒有限制環下有/無大氣泡之回縮時間比較

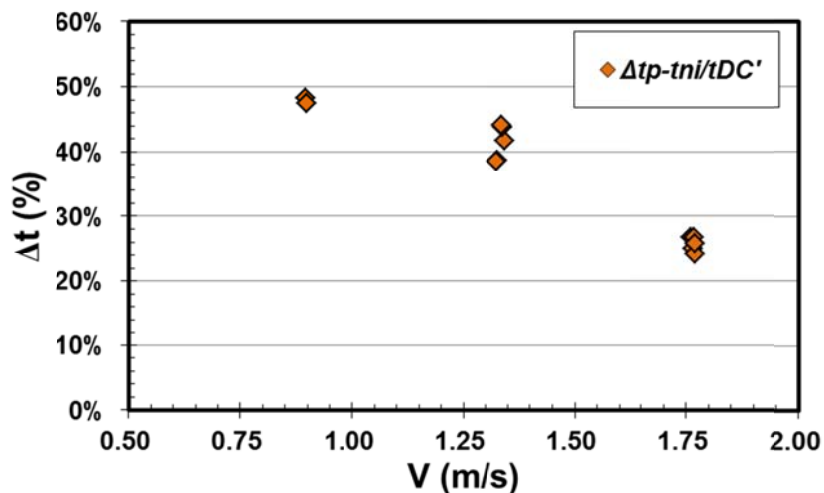


圖 4.3.5-2 大氣泡水窪發展頸縮時間與水窪向下發展時間之比例

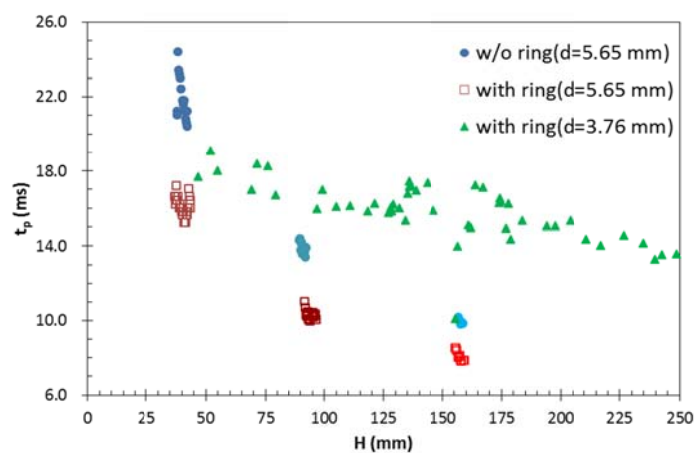


圖 4.3.5-3 液滴粒徑不同所造成斷裂時間之比較



表

表 2.3.2-1 各種不同幾何尺寸限制環參數表

	簡寫	D _i (mm)	D _o (mm)	l (mm)
Ring A	RA	11	15	10
Ring B	RB	11	15	50
Ring C	RC	26.6	30.6	50
Ring E	RE	11	15	4
Ring F	RF	11	15	2.2
Ring G	RG	7.84	9.88	20

表 2.5.1-1 水下麥克風中心至撞擊點距離(S)測試

S	with ring (hb= 40 mm)	w/o ring	
撞擊點距mic (cm)	聲壓判定撞擊時間 (ms)	聲壓判定撞擊時間 (ms)	delay (ms)
10.7	無法判定	無法判定	
8.7	無法判定	無法判定	
7.2	不易判定	無法判定	
6.2	○	不易判定	
5.2	○	○	0.22
4.2	○	○	0.20
3.2		○	0.20
2.2		開始出現不重覆現象	0.22
1.2		水漕已出現變形情況	
0.2		無法產生	

表 2.5.3-1 聲壓訊號延遲時間分析

HSC	45 mm	238mm	Δt (ms)
frame rate	delay time (ms)	delay time (ms)	$\Delta t = t_{delay,235mm} - t_{delay,45mm}$
8000	0.205	0.215	0.010
20,000	0.200	0.201	0.001
100,000	0.230	0.235	0.005

表 3.2.1-1 液滴粒徑 5.65mm 限制環相對初始頸部深度(D_{ni})對應關係

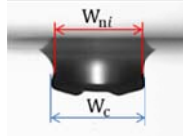
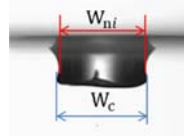



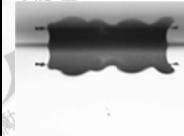


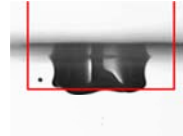

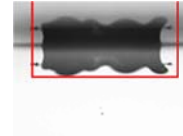
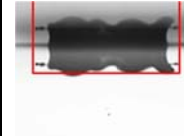
V(m/s)	0.90	0.94	1.34	1.35	1.76	1.77
實驗圖形						
W_c/W_{ni}	1.05	1.05	1.04	1.03	1.02	1.09
初始頸部深度 (mm)	2.77	2.43	2.14	1.70	1.35	1.52
	平均:2.75 mm		平均:1.92 mm		平均:1.41 mm	
限制環下緣深度示意圖						
限制環下緣深度 (h_b)	2.83 mm		2.02 mm		1.5 mm	
	比初始頸部深度多 0.08mm		比初始頸部深度多 0.10 mm		比初始頸部深度多 0.09 mm	

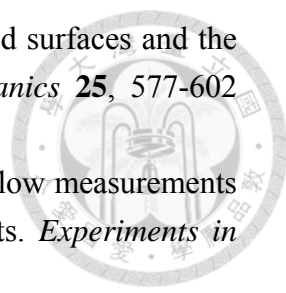
表 3.2.2-1 綜合三次以上之限制環下緣深度於初始頸部深度實驗結果

O_i 第__週期	O_i_p2		O_i_p3		O_i_p4 (一次實驗)	
	w/o ring	with ring	w/o ring	with ring	w/o ring	with ring
平均大氣泡產生區域寬幅 $HB_{avg.}$ (mm)	4.32	4.75	2.32	5.57	1.86	4.22
大氣泡產生區域寬幅變化 ΔHB (mm)	0.42		3.25		2.36	
增加寬幅比例(%)	9.7		140		127	

參考文獻



- [1] Warthington, A.M. A Study of Splashes. *Longmans Green and Company, New York*, (1908).
- [2] Rein, M. Phenomena of liquid-drop impact on solid and liquid surfaces. *Fluid Dynamics Research* **12**, 61-93 (1993).
- [3] Cai, Y. K. Phenomena of a liquid-drop falling to a liquid surface. *Experiments in Fluids* **7**, 388-394 (1989).
- [4] Engel, O. G. Crater depth in fluid impacts. *Journal of Applied Physics* **37**, 1798-1808 (1966).
- [5] Engel, O. G. Initial pressure initial flow velocity and time dependence of crater depth in fluid impacts. *Journal of Applied Physics* **38**, 3935-3940 (1967).
- [6] Rein, M. The transitional regime between coalescing and splashing drops. *Journal of Fluid Mechanics* **306**, 145-165 (1996).
- [7] Saylor, J. R. and Gizzard N. K. The effect of surfactant monolayers on vortex rings formed from an impacting water drop. *Physics of Fluids Volume* **15**, 10 (2003).
- [8] Peck, B. & Sigurdson, L. The 3-dimensional vortex structure of an impacting water drop. *Physics of Fluids* **6**, 564-576 (1994).
- [9] Cresswell, R. W. & Morton, B. R. Drop-formed vortex rings - the generation of vorticity. *Physics of Fluids* **7**, 1363-1370 (1995).
- [10] Pumphrey, H. C. & Elmore, P. A. The entrainment of bubbles by drop impacts. *Journal of Fluid Mechanics* **220**, 539-567 (1990).
- [11] Minnaert, M. On musical air bubble and the sounds of running water. *Philosophical Magazine* **16**, 235-248 (1933).
- [12] Franz, G. Splashes as sources of sound in liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America* **31**, 1080-1096 (1959).
- [13] Pumphrey, H. C. & Walton, A. J. Experimental study of the sound emitted by water drops impacting on a water surface. *European Journal of Physics* **9**, 225 (1988).
- [14] Watanabe, Y. Analytical study of acoustic mechanism of "Suikinkutsu". *Japanese Journal of Applied Physics* **43**, 6429 (2004).
- [15] Nystuen J. A. & Medwin, H. Underwater sound produced by rainfall: Secondary splashes of aerosols. *The Journal of the Acoustical Society of America* **97**, 1606 (1995).

- 
- [16] Prosperetti A. & Oguz, H. N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain. *Annual Review of Fluid Mechanics* **25**, 577-602 (1993).
- [17] Elmore, P. A., Chahine, G. L. and Oguz, H. N. Cavity and flow measurements of reproducible bubble entrainment following drop impacts. *Experiments in Fluids* **31**, 664-673 (2001).
- [18] Wang, A. B., Kuan, C. C. and Tsai, P. H. Do we understand the bubble formation by a single drop impacting upon liquid surface? *Physics of Fluids* **25**, 101702(2013).
- [19] Zou, J., Ji, C., Yuan, B., Ren, Y., Ruan, X. and Fu, X. Large bubble entrapment during drop impacts on a restricted liquid surface. *Physics of Fluids* **24**, 057101(2012).
- [20] Kurniawan, T. 液滴撞擊深液產生彈跳與渦環之研究, 國立臺灣大學應用力學研究所碩士論文, (2011).
- [21] Bisighini, A., Cossali, G. E., Tropea, C. and Roisman, I. V. Crater evolution after the impact of a drop onto a semi-infinite liquid target. *Physical Review E* **82**, 036319, (2010).
- [22] Becker, E., Hiller, W. and Kowalewski, T. Experimental and theoretical investigation of large-amplitude oscillations of liquid droplets. *Journal of Fluid Mechanics* **231**, 189-210(1991).
- [23] Basaran, O. A. Nonlinear oscillations of viscous-liquid drops. *Journal of Fluid Mechanics* **241**, 169-198 (1992).
- [24] Watanabe, T. Numerical simulation of oscillations and rotations of a free liquid droplet using the level set method. *Computers & Fluids* **37**, 91-98 (2008).
- [25] 管振淇, 振盪參數對液滴撞擊產生氣泡行為與機制的定量研究分析, 國立臺灣大學應用力學研究所碩士論文, (2010).
- [26] Dingle N. A. and Lee, Y. Terminal fallspeeds of raindrops. *Journal of Applied Meteorology* **11**, 877-879 (1972).
- [27] Oguz, H. N. & Prosperetti, A. Bubble entrainment by the impact of drops on liquid surfaces. *Journal of Fluid Mechanics* **219**, 143-179 (1990).