

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

最佳團隊合作獎

040107

環狀泡泡產生機制之探討

學校名稱：國立高雄師範大學附屬高級中學

作者： 高一 項柏翰 高一 蔡孟憲	指導老師： 王玉琪 簡聿成
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：泡泡環、白努力定律、表面張力

摘要

形成泡泡環的主要因素為：外圍液體由氣泡底部衝入氣泡內貫穿氣泡而形成泡泡環。

起始孔徑的形狀不會影響泡泡環的形成。

在雙孔的實驗中，若孔重疊，則可視為單孔；而不重疊孔氣泡混合後會產生壓力大的混合區，造成中間破裂而不成環。

在相同孔徑下，泡泡環離開時間與外加壓力及外力時間無關。

由連續方程式可推知孔徑越小的氣泡成長所需時間越短。

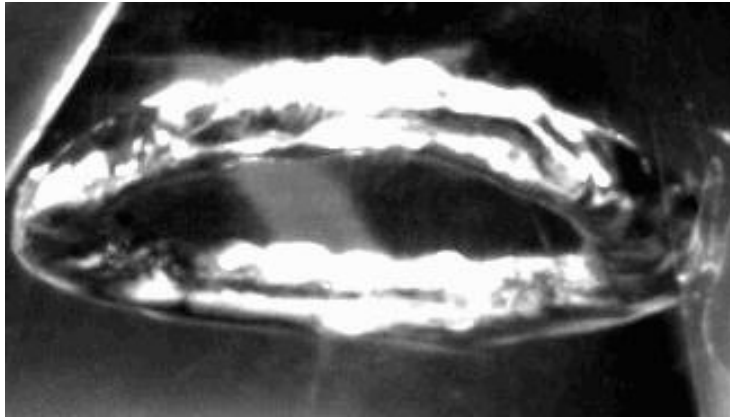
當泡泡達到離開噴射孔的時間，即使外力繼續作用，還是無法增加氣泡的體積，所以會有達到飽和值的趨勢。

使用球型氣泡模型來解釋外加壓力增加，氣泡體積亦增加的趨勢。

利用離開噴射孔氣體體積等於氣體進入氣泡的體積，可解釋外力時間與體積成正向增加關係。而氣泡在成長過程中，體積膨脹率隨時間而增大。

壹、研究動機

在偶然的一個下午，我們在 youtube 發現一段影片，裡面的日本潛泳達人在游泳池裡吐出了好幾個煙圈型的泡泡（以下簡稱泡泡環），我們都對它的美麗嘆為觀止，並開始想了很多問題。泡泡環的旋轉是否只有一種方式？它的形成原因是什麼？到網路上搜尋卻發現台灣有關於泡泡環的文獻並不多，於是我們就自製一台泡泡環產生器，開始進行對它的研究。

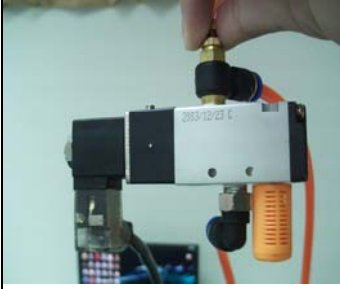


貳、研究目的

爲了要探討泡泡環的形成原因，首先我們自製了一台泡泡環產生器，利用不同的蓋子個別鑽出四個孔徑，探討不同的起始孔徑、速度對泡泡環產生之影響。

- 一、泡泡環各階段現象說明與探討形成關係
- 二、探討不同形狀的起始孔徑對泡泡環產生的影響
- 三、探討雙孔對泡泡環產生的影響
- 四、計算法與排水集氣法的體積比較
- 五、探討泡泡環的轉動方向
- 六、探討氣泡在噴射孔形成泡泡環的過程中各物理量的變化
 - (一)、泡泡環脫離噴射孔時間
 - (二)、各種孔徑氣泡長度與外力時間關係之探討
 - (三)、將氣泡視為球形來探討出口速度與泡泡環的關係
 - (四)、不同大小孔徑泡泡環體積之關係
 - (五)、泡泡環各階段體積成長之關係

參、研究設備及器材

圖片	名稱與功能	圖片	名稱與功能
	高速攝影機：每秒可拍三百張照片，拍攝泡泡環在噴射孔的變化。		腳架：用來固定高速攝影機。
圖片	名稱與功能	圖片	名稱與功能
	聚光燈：用來加強背景與泡泡環的對比，讓照片更清晰。		自製圓筒深水槽。
圖片	名稱與功能	圖片	名稱與功能
	可調節氣壓幫浦：用來控制輸氣管的氣壓。		時間控制器：用來控制輸氣管的進氣時間。
圖片	名稱與功能	圖片	名稱與功能
	五口三向電磁閥：搭配時間控制器，用來控制幫浦開關。		

肆、研究過程及方法

一、泡泡環產生器的製備：

一開始我們先收集了有關泡泡環的資料和影片，以及看到別人吐泡泡環的方法——先閉緊嘴巴，再一口氣吐出。我們討論後推測，產生泡泡環的先決條件是須要一個快速噴發且瞬間開閉噴射口的過程，於是我們做了以下的設計。

(一) 泡泡環產生器 No.1

先將一個 25ml 的針筒放入水中，噴射孔朝上，並用手緊緊按住，之後往下壓縮空氣到一個極限，再一瞬間開啓噴射孔，一次噴出被壓縮的空氣。

用此方法需要重複把針筒拿出水面補充空氣，再拿到水缸裡面發射。我們覺得這樣一進一出的過程會干擾水的流動，需耗時良久水面才會趨於穩定，而且是用手固定針筒，增加實驗的不可控制變因，所以我們設計了泡泡環產生器 No.2。



泡泡環產生器 No.1

(二) 泡泡環產生器 No.2

首先準備兩個 50ml 的針筒。我們先將其中一個針筒底部鑽一個洞，然後把另一個割下來的針筒頭黏在鑽完的洞上面，這樣針筒的底部就會有兩個口，再分別在兩個口裝上一長一短的塑膠管，將 No.2 裝置在設計好的保麗龍上用來固定，長塑膠管露出水面以便補充空氣，短的用來當噴射孔。

此實驗雖然大大改進換氣的問題，但是關閉噴射孔的方法還是採用人工，我們覺得產生不了泡泡環是因為手在開啓噴射孔時會碰到噴出的氣體，導致泡泡無法形成環狀。所以我們設計了泡泡環產生器 No.3。



泡泡環產生器 No.2

(三) 泡泡環產生器 No.3

準備糖果罐瓶身一個及蓋子若干個，用鑽孔器在每個蓋子上鑽出不同大小的孔即完成。首先我們將處理好的糖果罐放入水中(裡面要有空氣)，過程中要用手堵住洞口並支撐它到水底，用手指在瓶身輕按後手指迅速移開洞口，使氣體噴出。

這個方法終於可以連續做出好幾個完美的泡泡環，但為了控制噴出氣體的壓力和體積，我們將幫浦與電磁閥與 No.3 的糖果罐進行結合，設計了泡泡環產生器 No.4。



泡泡環產生器 No.3

(四) 泡泡環產生器 No.4

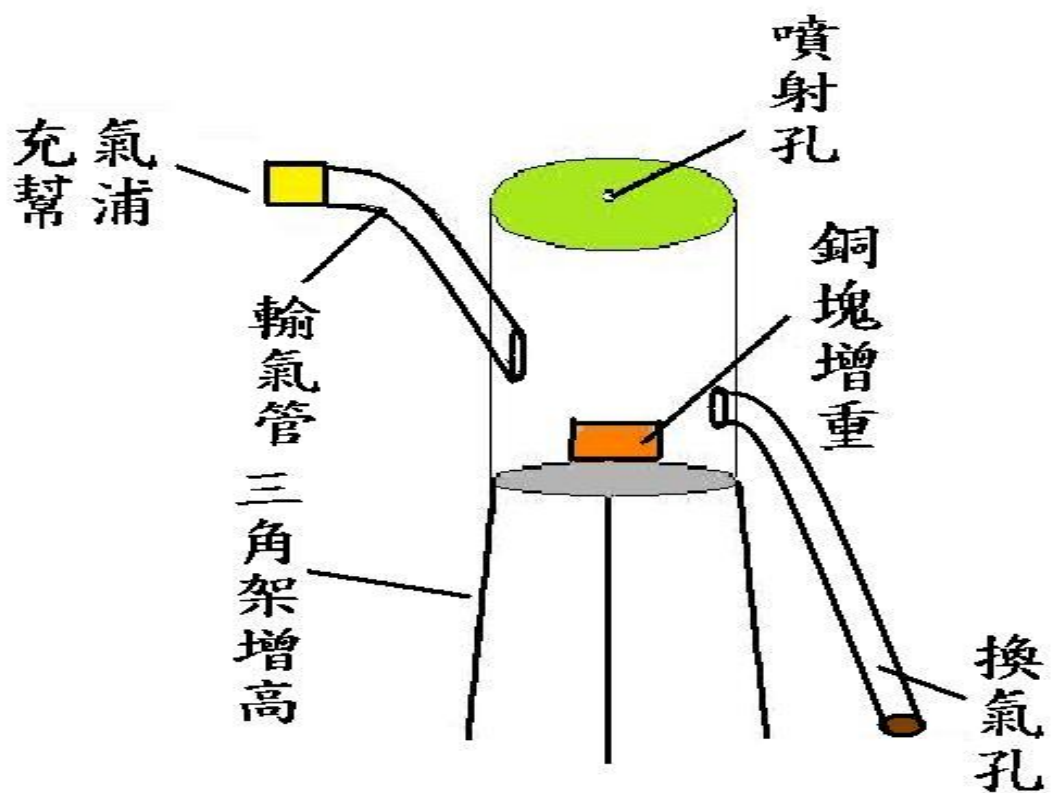
我們決定以電磁閥來控制噴射孔的開關，減少人爲的變因，並用了可調節氣壓的幫浦來控制壓力。

先將糖果罐的瓶身鑽一個可插進塑膠管的孔，利用塑膠管將糖果罐與幫浦連結，另外一端的孔則向外延伸，以便補充氣體，再來在糖果罐內置入銅塊增重以克服浮力，如此一來就可以把糖果罐放進水缸裡面，接下來只要控制電磁閥開關便可產生泡泡環。

此裝置已經大大改善了之前所有的泡泡環產生器的缺點，讓實驗完全改爲機器操作將人爲誤差降至最低，此後我們便以此爲設備來產生泡泡環。



泡泡環產生器 No.4 實體



泡泡環產生器 No.4 示意圖

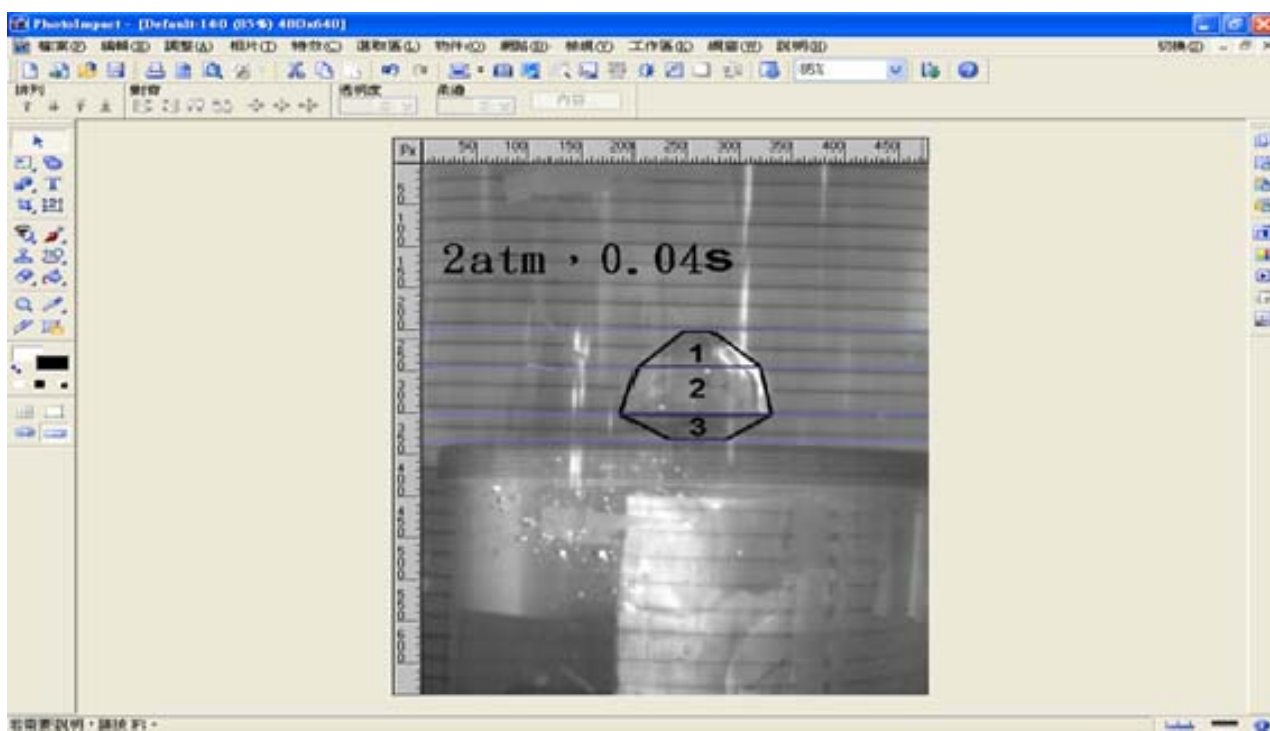
二、氣泡體積的測量：

(一)排水集氣法測氣泡體積：

我們先將 300ml 的廣口瓶裝滿水放入容器中，噴出一個泡泡環，使它進入廣口瓶內將水排出。計算裝滿水的廣口瓶體積和排水集氣後的體積差，即為泡泡環之水面的體積，再利用波以耳定律算出該氣泡在噴射孔時的體積。

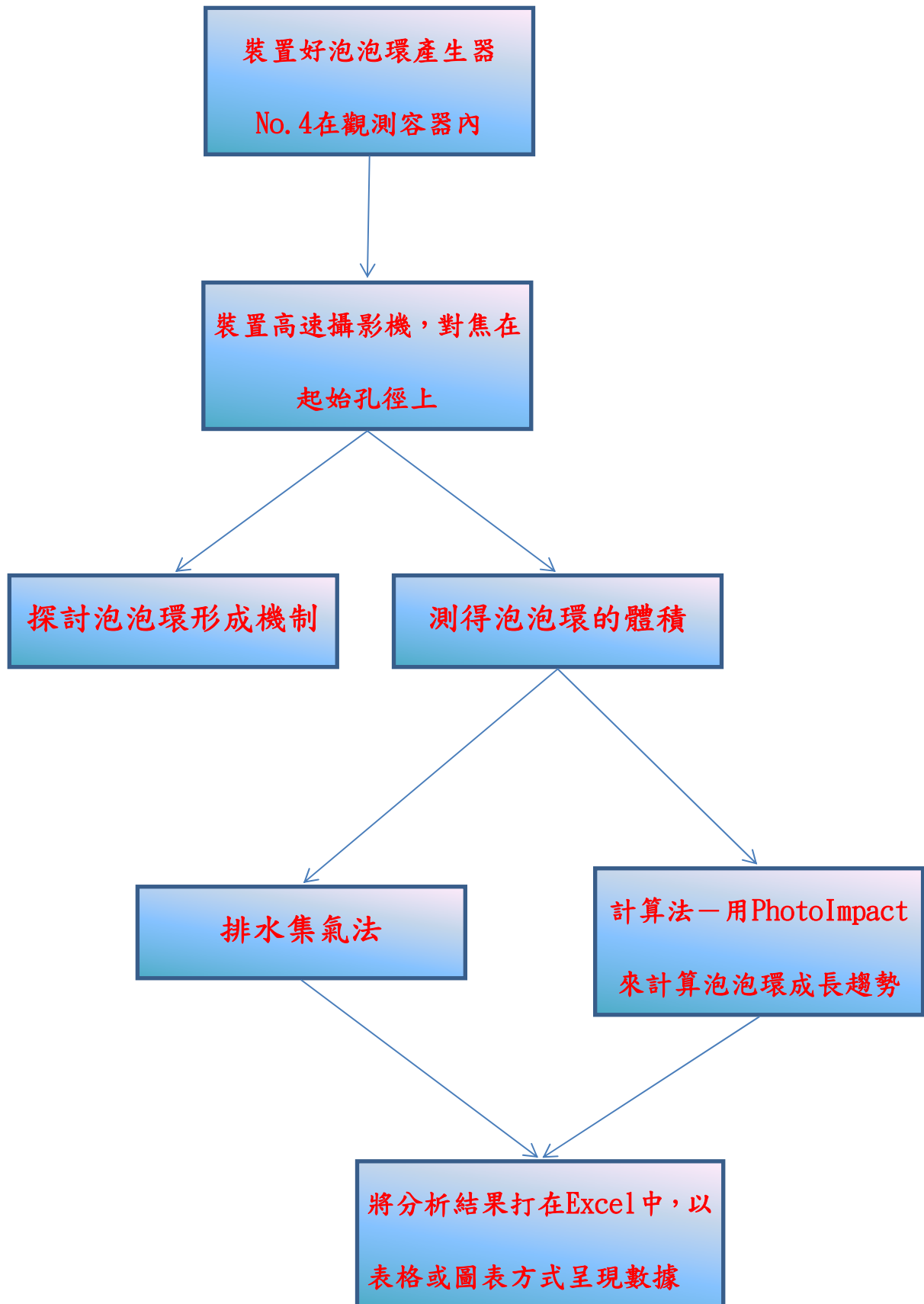
(二)計算法所得之氣泡體積：

利用排水集氣法雖可量測氣泡的體積，但卻不能測量各成長階段之氣泡體積，於是我們把影像傳輸到 PhotoImpact 裡，把一個氣泡分為若干個梯型錐來計算。我們發現此方法和排水集氣法的數值相當接近，故採用此方法進行氣泡各階段體積之計算。



利用影像分析計算 2atm，0.04s 的氣泡體積示意圖

三、研究流程：

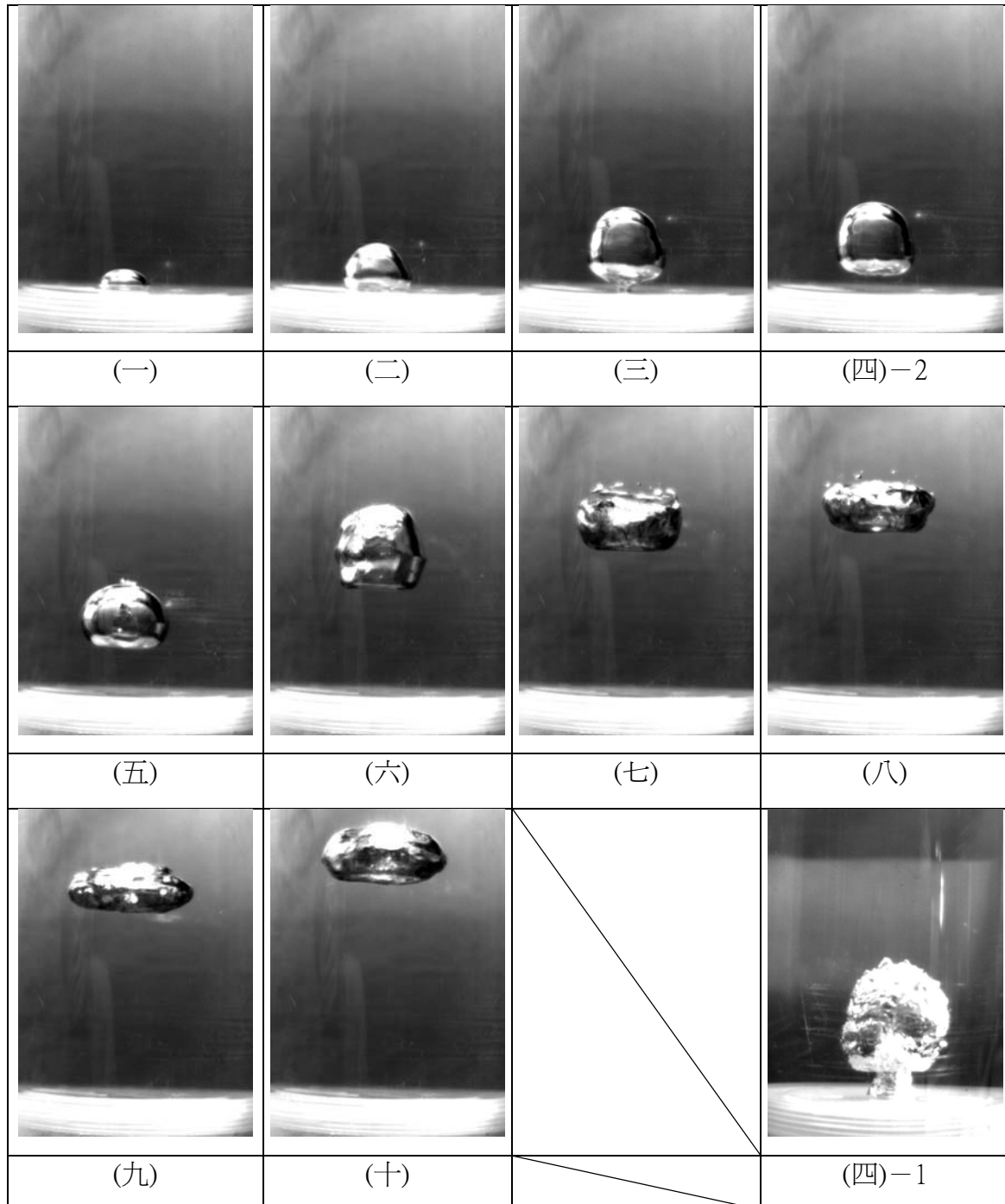


伍、研究結果與討論

註： V：體積 v：速度 T：表面張力 t：時間

P：充氣幫浦壓力(atm) r：氣泡半徑 ρ ：氣體密度 A：孔徑截面積

研究一、泡泡環各階段現象說明與探討形成關係：(時間間隔：1/30 秒)



(一)空氣開始由噴射孔逸出，氣泡受表面張力作用，空氣開始流動到氣泡周邊。氣泡變得扁平而寬大。

(二) 空氣持續流入氣泡，氣泡增大。

(三) 在氣泡內，因先前注入的空氣產生氣泡內氣體旋轉的力矩來源，進而造成氣泡內氣體的旋轉。由於氣泡內氣體的旋轉流動帶動氣泡外的水流動，使得水壓降低而使氣泡更易膨脹。

氣泡體積隨時間而增大，並因浮力作用漸漸離開噴射孔。在氣泡離開噴射孔的過程中，有兩種可能的現象。

(四)－1 噴射氣體的速度夠大，使得氣泡在離開噴射孔時，仍有氣體衝入氣泡內，此時噴射氣體周圍水體的壓力因白努力定律而減小，以致於水體的壓力差而將水推入氣泡內。

(四)－2 噴射氣體速度不夠快，以致氣泡在離開噴射孔時，不再有氣體衝入氣泡內，則在離開噴射孔的短暫瞬間是一個完整的氣泡。

(五)由於氣體旋轉運動使得氣泡周圍水體亦隨之流動，以致於在氣泡底部中間處的水體流動速度最小，所以此處壓力最大，導致液體由此處克服氣泡的表面張力而進入氣泡內。

(六)有更多的水進入氣泡的中心。

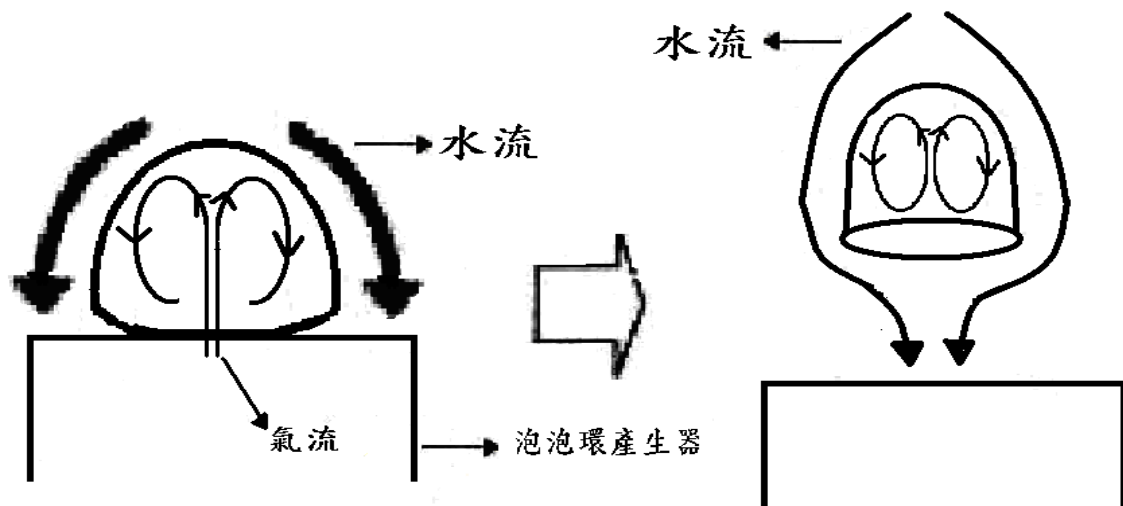
(七)由於水的衝力打破氣泡的上緣。上升水流衝破氣泡，使其排出小型氣泡。

(八)泡泡上方持續破裂，小型氣泡並沒有直接上升，而是分別以兩個圓圈，左邊以逆時針旋轉，右邊反之。

(九)因小氣泡分裂時，隨著周圍水流方向移動，也就是隨著大氣泡內氣體的流動方向，在過程中，又再與大氣泡融合。

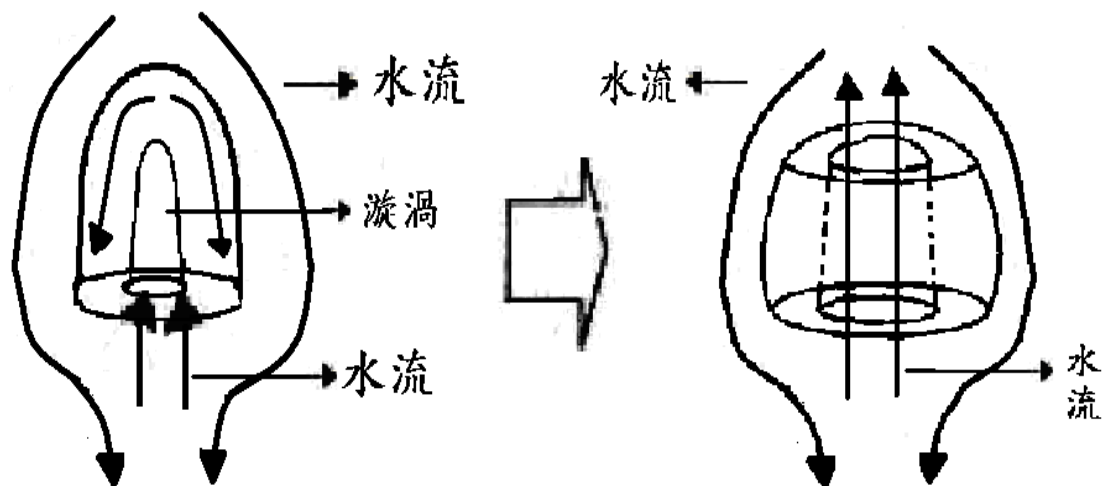
(十)所有空氣現在重新回到中心，並且氣泡形成了一個完整的圓環。

氣泡向上運動視為水向下流動而泡泡不動。



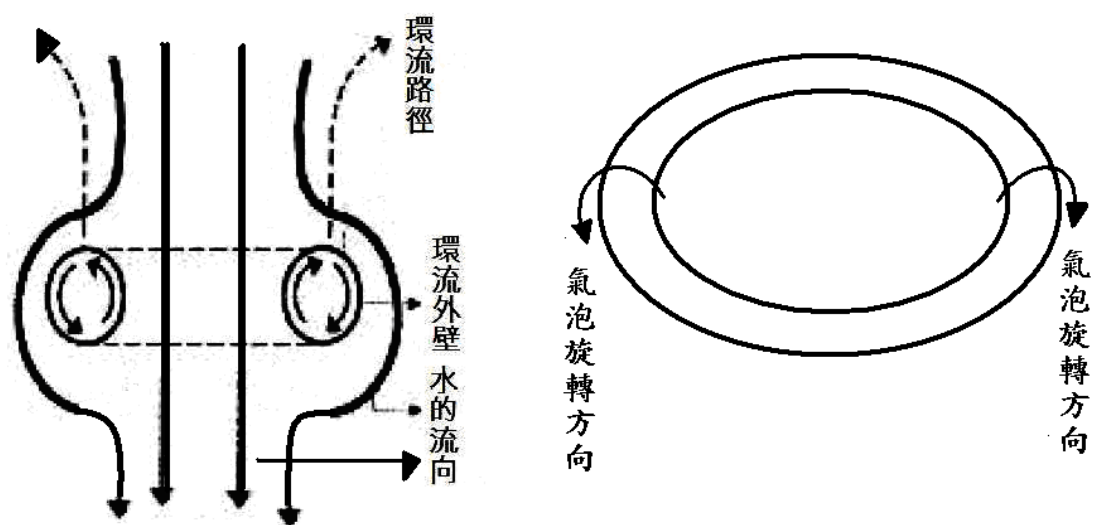
(一) 氣泡泡剛冒出產生器

(二) 氣泡離開噴射孔



(三) 水克服表面張力而進入氣泡內

(四) 水貫穿氣泡頂部



(五) 氣泡環側視圖

氣泡環俯視圖

研究二：探討不同形狀的起始孔徑對泡泡環產生的影響

了解完泡泡環形成的機制之後，我們又想知道不同形狀的的起始孔徑是否也會形成泡泡環，所以我們以三角形、正方形和圓形進行比較。



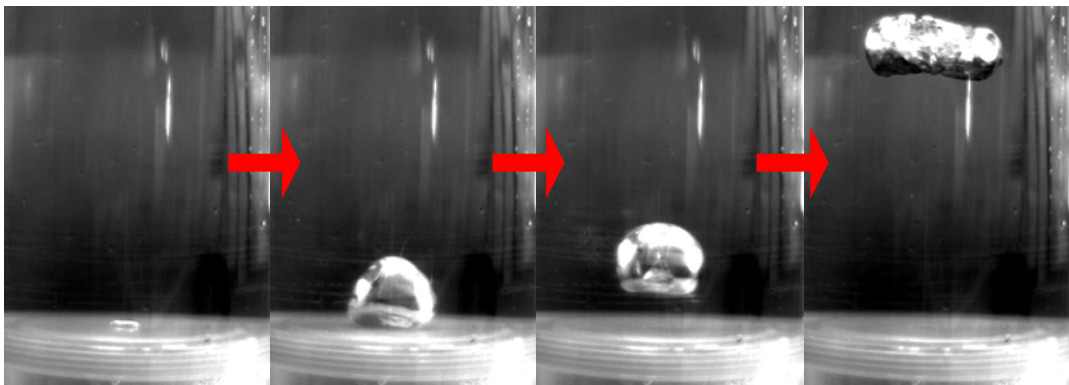
三角形的孔

正方形的孔

不同形狀噴射孔的結果是都可產生泡泡環，對於這個結果我們做以下的推論：

由於氣泡形成時的底部大於噴射孔的面積，所以不論孔的形狀如何，氣泡內的氣體皆是在中央部分由噴射孔注入而至氣泡頂端後向四周散逸而形成氣體的旋轉，所以不論出口形狀，皆可滿足形成泡泡環的氣體旋轉要件。又出口的氣泡在表面張力的作用下，使得氣泡的形狀也是與孔的形狀無關，也就是氣泡形狀皆為鐘形。

所以我們發現：不同形狀的發射孔並不會影響泡泡環的產生。



這是三角形噴射孔所產生出的泡泡環

研究三：探討雙孔對泡泡環產生的影響

單獨的噴射孔對氣泡形狀沒有影響，那麼兩個噴射孔的結果會如何呢？我們製作了以下兩個噴射孔－14/64 雙孔圓心距 1cm(雙孔不重疊) 及 14/64 雙孔圓心距 0.5cm(雙孔重疊)。



14/64 雙孔圓心距 1cm(雙孔不重疊)

14/64 雙孔圓心距 0.5cm(雙孔重疊)

觀察 14/64 雙孔圓心距 0.5cm(雙孔重疊)：

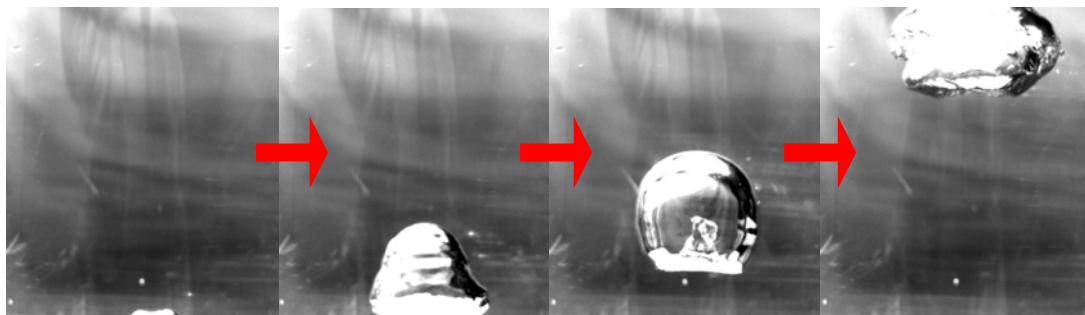
產生的氣泡形狀與過程皆與單孔的噴射孔相同，這是因為雙孔有重疊，可等同於一個單孔。

觀察 14/64 雙孔圓心距 1cm(雙孔不重疊)：

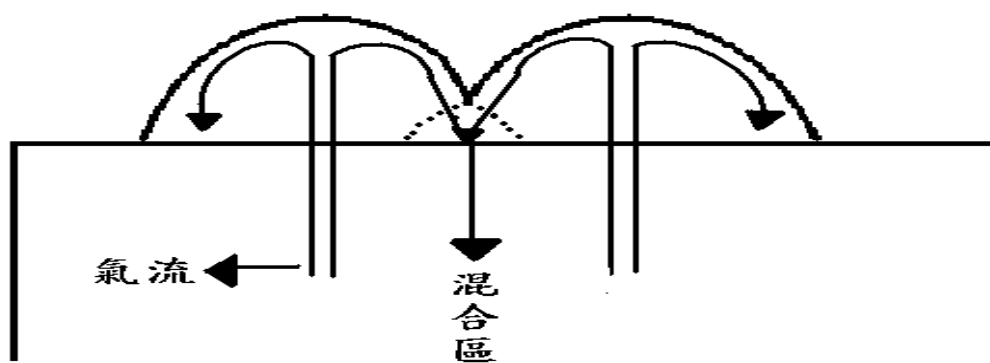
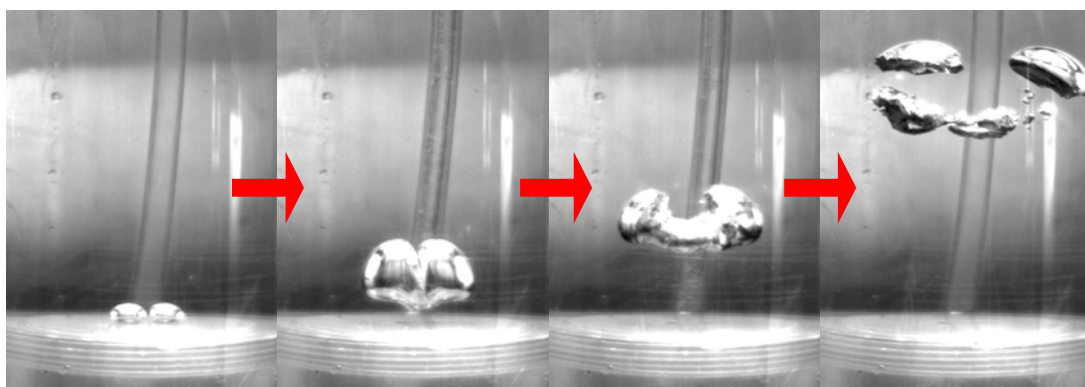
1. 在先前單獨氣泡形成時，利用注入的空氣，產生氣泡內氣體旋轉的力矩來源，進而造成氣泡內氣體旋轉的慣性。
2. 在兩個氣泡接觸後，個別氣體注入氣泡內時，會有因氣體碰撞而產生的混合區域，進而減小了氣泡內的氣體旋轉慣性。
3. 由於混合區內氣體並無特定流向，故此區域內的氣體壓力就會大於旋轉流向的氣體壓力，所以此區域的界面水體無法衝入氣泡內。

由於混合區耗損氣體的能量，故混合區將隨著時間而增大，以至於連外側旋轉範圍亦開始減小，當氣泡外水體無法衝入氣泡內時，氣泡本身將由於表面張力作用，而使得原來兩個氣泡將開始分離，而分離過程中，也因氣泡內剩餘的旋轉區與混合區，使得氣體分布極不均勻，所以表面張力將使得不均勻氣體分布的氣泡分裂而無法成環。

14/64 2atm 0.03s 雙孔圓心距 0.5cm(雙孔重疊)



14/64 2atm 0.03s 雙孔圓心距 1cm(雙孔不重疊)



雙孔氣泡形成示意圖

研究四：計算法與排水集氣法的體積比較

由結果得知排水集氣法與計算法的數值相當接近，且排水集氣法不能測得各成長階段之泡泡環體積，故採用此方法進行泡泡環各階段體積之計算。

	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	平均
泡泡環體積(cm^3)	55	55	56	53	55	54.8

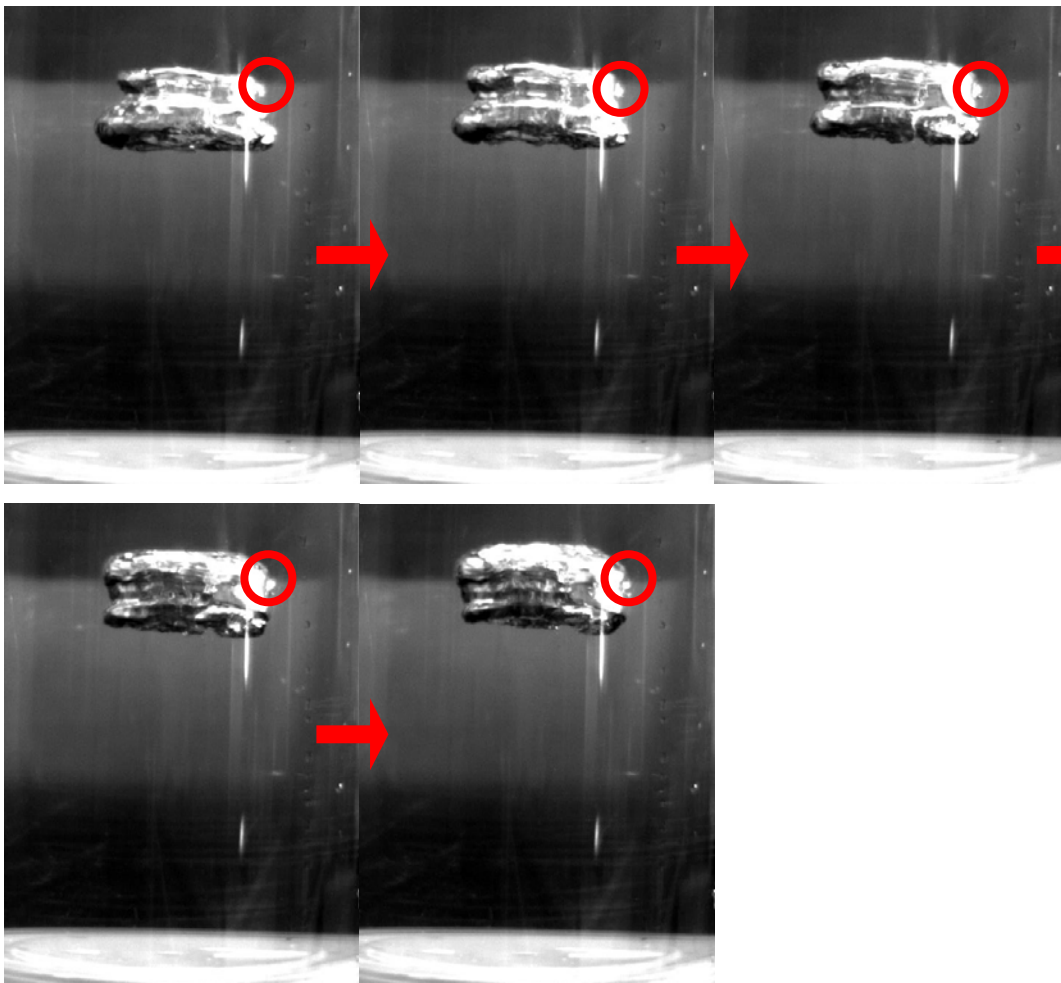
集氣排水法收集 2atm，0.04s 的泡泡環體積

	第一部分	第二部分	第三部分	加總
泡泡環體積(cm^3)	10.14	33.93	11.69	55.76

利用影像分析計算 2atm，0.04s 的泡泡環體積

研究五：探討泡泡環的轉動方向

我們從泡泡環的上升過程中發現，泡泡環頂端被水衝破後，破碎的頂端小氣泡隨著周圍水流方向移動，也就是隨著大氣泡內氣體的流動方向，在過程中，又再與大氣泡融合。而這個事實，恰好讓我們確認泡泡環內的氣體旋轉方向。

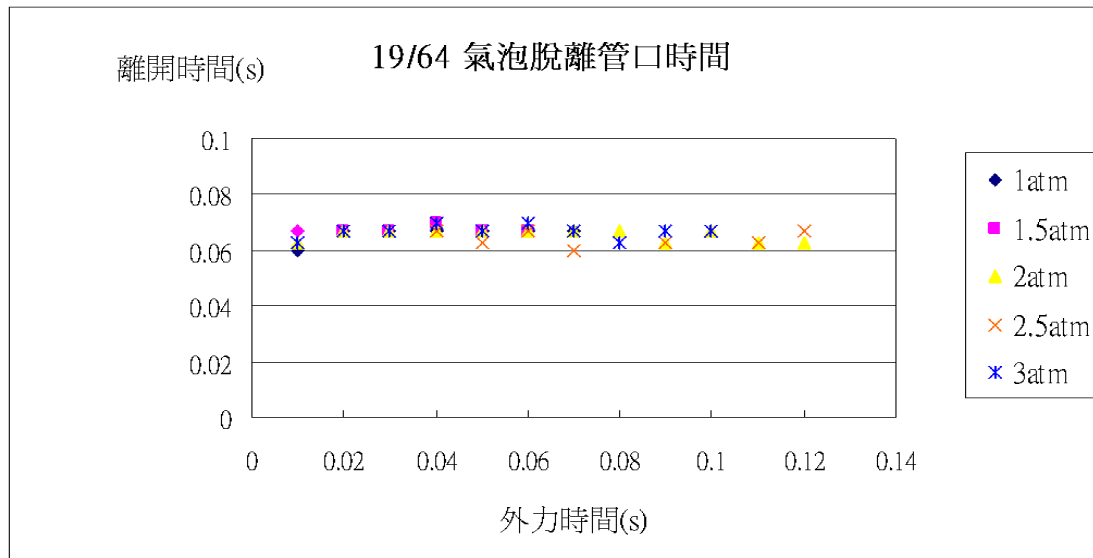


由上圖可以得知，右半邊泡泡呈順時針轉動，左邊則反之。

研究六：探討氣泡在噴射孔形成泡泡環的過程中各物理量的變化。

(一)、泡泡環脫離噴射孔時間

由於我們使用的高速攝影機可拍攝到每秒三百張的照片，我們發現 19/64 孔徑，不管各種壓力與時間的搭配組合，19/64 孔徑的泡泡環從開始到離開噴射孔，皆經過大約 19 張照片，也就是約 0.066 秒的時間。

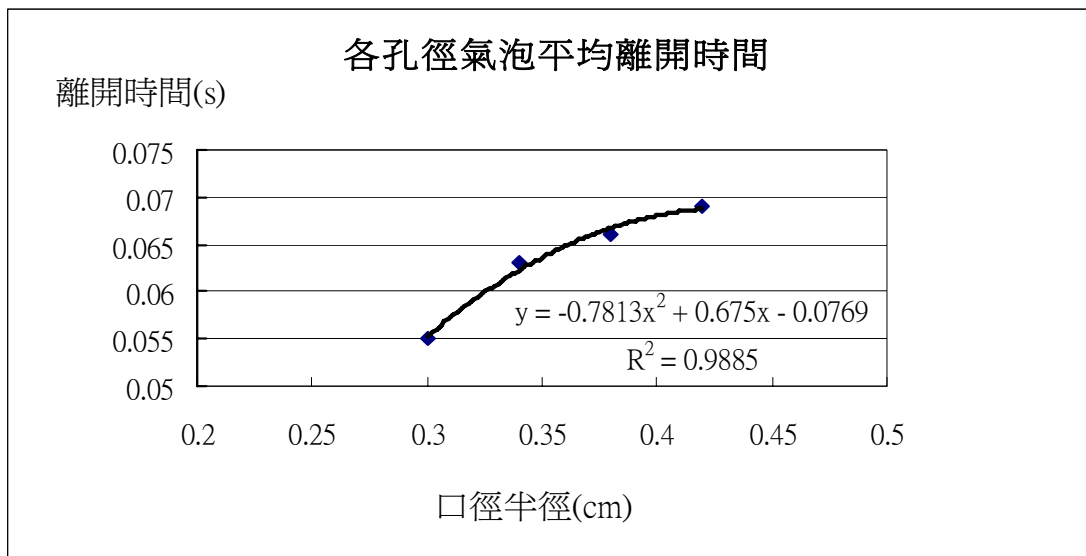


由上面的結果，我們又想知道是否每個孔徑都有這樣的關係，所以我們再針對另外三個孔徑做了相同的實驗。

在不同孔徑的噴射孔所得到的氣泡離開噴射孔的時間關係，我們發現：

- 1.孔徑越大，氣泡平均離開時間越大。
- 2.孔徑由小到大呈現一個二次函數的關係。

孔徑直徑(英吋)	孔徑半徑(公分)	平均時間(s)
21/64	0.417	0.069
19/64	0.377	0.066
17/64	0.337	0.063
15/64	0.298	0.055



針對不同孔徑大小所導致的氣泡離開噴射孔的時間差異，我們可以用連續方程式來討論。

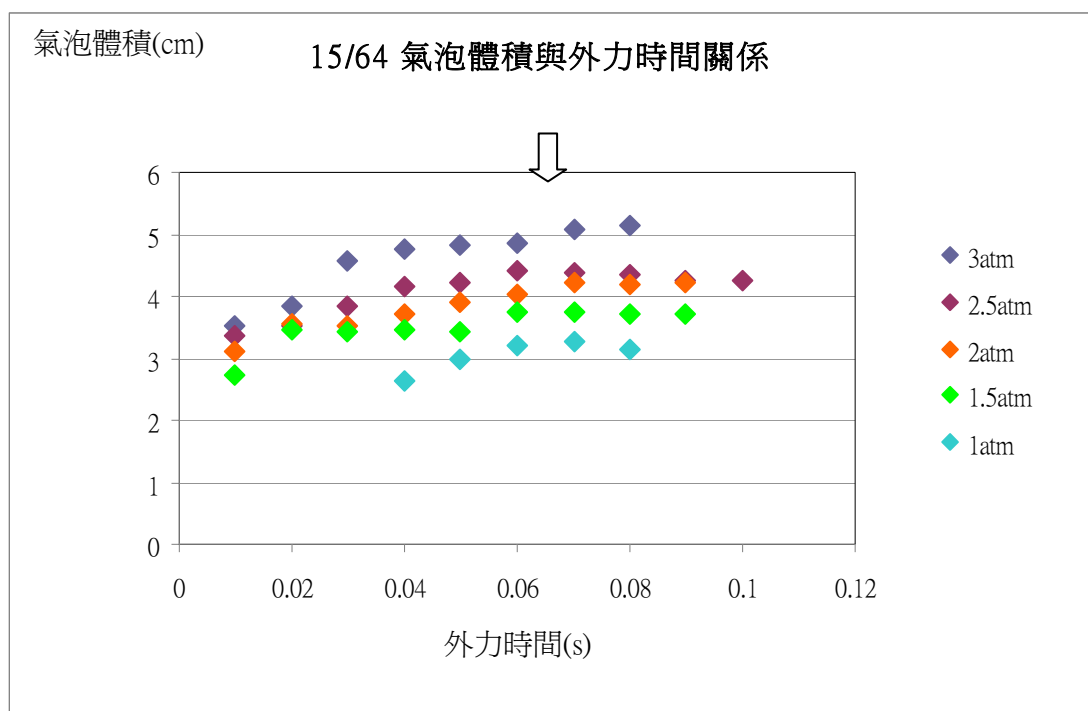
由連續方程式 $A_1V_1=A_2V_2$ 得知：孔徑越小，出口速率越大，就可以推得離開時間越短。

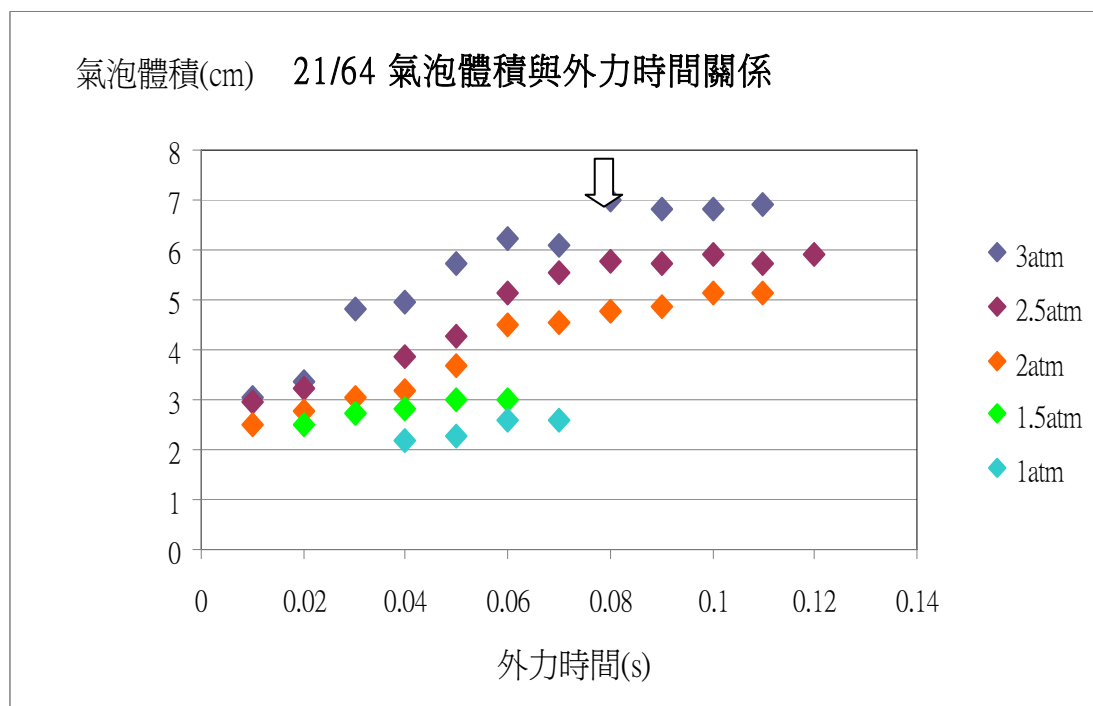
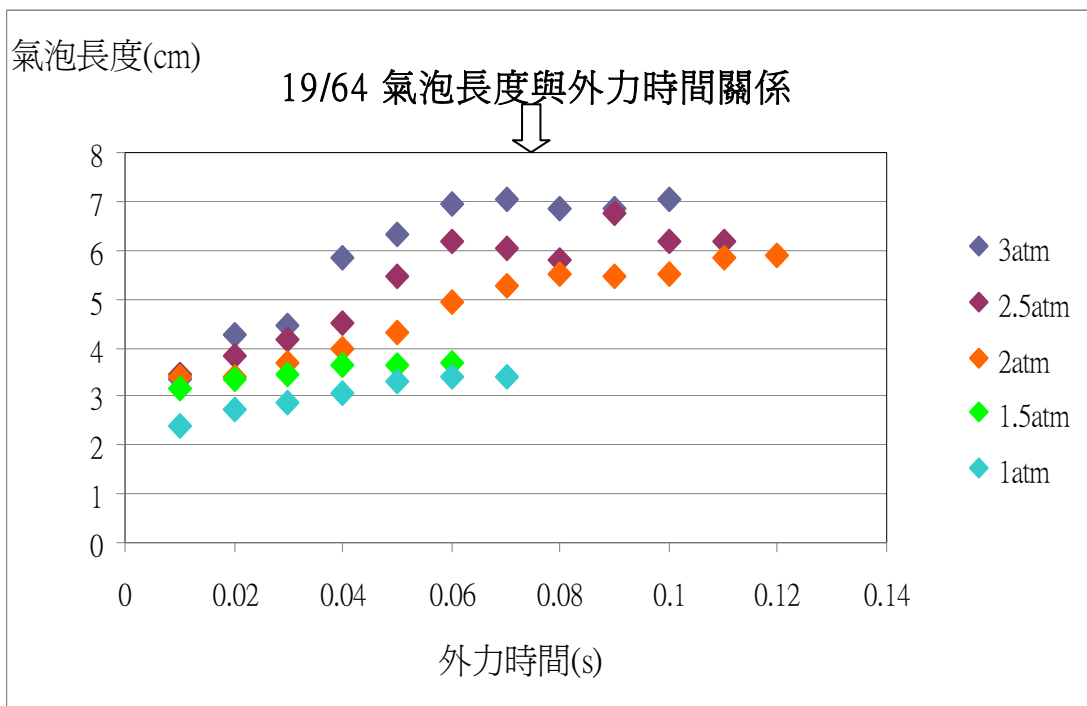
(二)、各種孔徑氣泡長度與外力時間關係之探討

1. 在外力時間或外加壓力增大時，氣泡表面趨於不規則，故我們以氣泡長度代替氣泡體積找出與外力時間之關係。

2. 由研究(一)得知，15/64 孔徑的氣泡平均離開時間為 0.055 秒，我們發現，不管在任何壓力的條件下，氣泡長度皆在約 0.05 秒到 0.06 秒的時間達到飽和後趨於平緩。於是我們推論，在本實驗裝置的條件下，15/64 孔徑氣泡長度最大值是出現在 0.05 秒到 0.06 秒之間，之後不管再增加多大的時間，都會因泡泡環都已在約 0.055 秒時離開噴射孔，所以長度不會有明顯的增加。其他孔徑亦呈現這樣的關係。

3. 在本實驗裝置中，時間代表外加壓力氣體衝出的長短，故固定時間而改變壓力可視為一定時間內氣體衝出的速度不同。同一時間內速度越快，泡泡環長度越大，故每個孔徑的氣泡長度關係都呈現出由 3atm 依序往 1atm 減小的趨勢。





(三)、將氣泡視為球形來探討出口速度與泡泡環的體積關係

在討論完體積與外力時間的關係後，我們想知道氣體出口速度與泡泡環體積的關係。

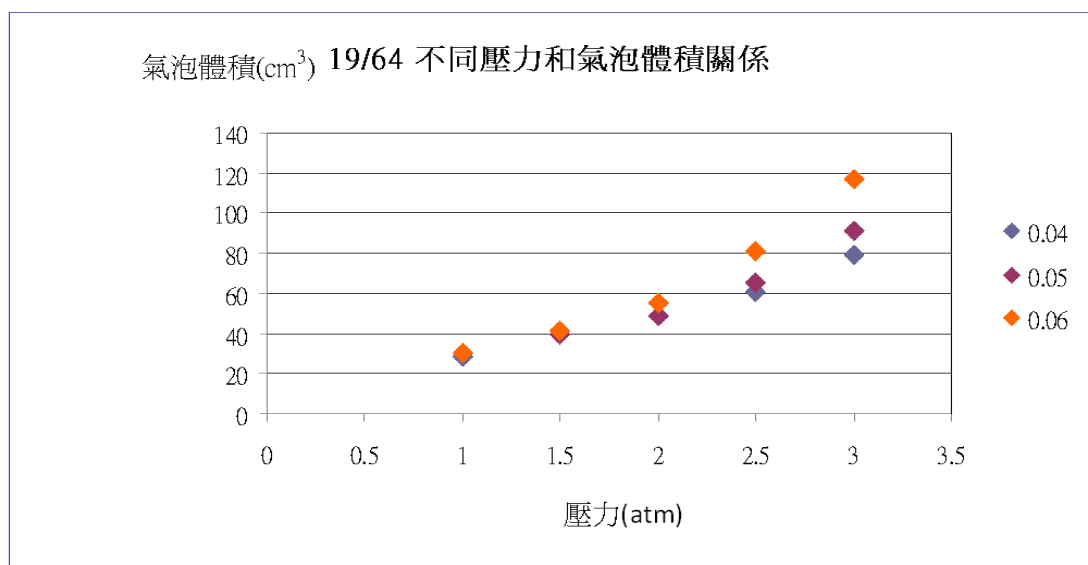
一般氣泡的大小與氣泡內外壓力及表面張力有關： $P_{in}=P_{out}+2T/r$

所以當氣泡內壓力越大，氣泡的半徑（體積）應越小。

在我們的實驗，離開管口的氣泡要比不成環的氣泡來的大，所以成環氣泡內的壓力比一般氣泡來的小，這個原因我們認為是成環氣泡內的氣體有一個規律流動的方向所造成的。

因泡泡環在各個壓力的時間裡，0.04 秒到 0.06 秒是氣泡表面較為平滑的泡泡環，所以針對這三個外力時間做出壓力與氣泡體積關係。而在本實驗裝置中，壓力越大，可視為速度越大。由此圖可知，速率越大，泡泡環體積越大。

由實驗結果看出泡泡環的體積與外加壓力有一定的關係，外加壓力越大，泡泡環體積也越大。這個結果與研究五(一)的結果可互相驗證。因為在前項結果，表明了氣泡離開管口的時間是與外加壓力無關，而此壓力代表管口的氣體出口速率，故每個氣泡都在相同的時間內，得到不同出口速率的氣體分子，所以壓力越大，離開管口的氣泡體積亦越大。



我們更進一步，使用球型氣泡模型來探討此關係。（ $P_{in,o}$ 為氣泡內氣體無旋轉時的壓力）

1.氣泡為球形時，氣泡內外壓力與表面張力之關係為 $P_{in,o}=P_{out}+2T/r_o$

2.一般氣泡內，氣體運動為雜亂無規律，但在泡泡環內的氣體是有規律的運動，所以會有白

努利關係式： $P_{in}=P_{in'}+1/2\rho v^2 \Rightarrow P_{in'}=P_{in}-1/2\rho v^2$

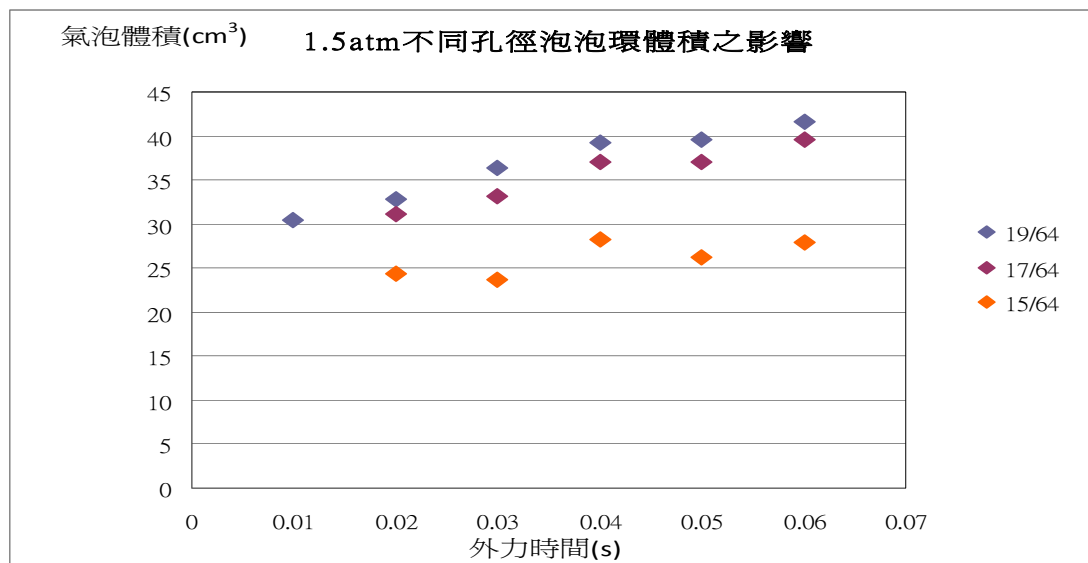
所以因氣體流動而使得氣泡內壓力將成為 $P_{in}=P_{in,o}-1/2\rho v^2 \Rightarrow P_{in}=P_{out}+2T/r_o-1/2\rho v^2$ ，

$P_{out}+2T/r_o-1/2\rho v^2=P_{out}+2T/r$ ，所以 $2T/r=2T/r_o-1/2\rho v^2$

故：當出口速率增加時，泡泡環體積相對上升。

(四)、不同大小口徑泡泡環體積之關係

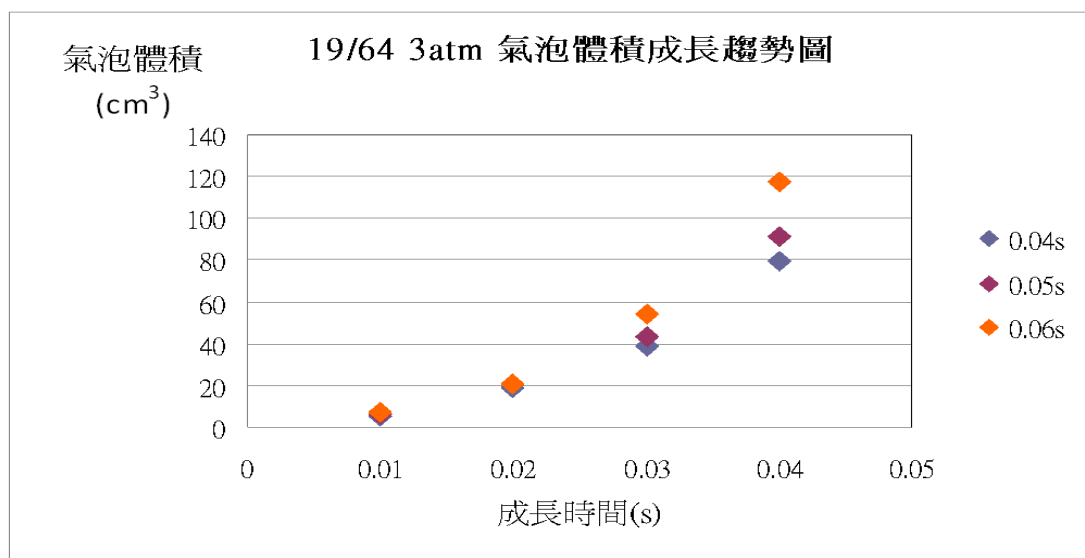
我們想知道不同大小的起始孔徑，是否會對泡泡環的體積造成影響，於是我們固定 1.5atm，並拿三個孔徑來做比較。固定壓力，我們發現孔徑越大，氣泡體積越大。



因為壓力相同，所以出口速率相同，利用離開噴射孔之氣體體積等於氣泡的體積， $A \cdot v \cdot t = V$ ，所以 $V \propto t$ 。所以在相同外加壓力下，外力作用時間越長，離開噴射孔之氣泡體積就越大。故噴射孔截面積越大，氣泡體積越大。

(五)、泡泡環各階段體積成長之關係

我們想知道一個泡泡環從無到有的體積變化與時間關係，於是我們固定 3atm，19/64 英吋孔徑的蓋子做這個實驗。



噴射孔氣泡的體積與時間關係圖的斜率代表氣泡的膨脹率。在氣泡最初形成時，氣泡內的氣體分子因數量不多，所以旋轉動量不大，使得氣泡外圍水的流速不大，所以氣泡外的水壓力大於水在流動時的壓力，故氣泡的膨脹較不易。當注入氣泡內的氣體愈多，氣體旋轉動量亦隨之增大，所以氣泡外圍水的流速增加，因而氣泡外的水壓力小於氣泡初使時的壓力，所以氣泡的膨脹率就增大。

陸、結論

- 一、經由形成泡泡環過程的影像分析，可知形成泡泡環的主要因素為：外圍液體由氣泡底部衝入氣泡內將氣泡貫穿而形成泡泡環。
- 二、使用排水集氣法與影像分析法所得之氣泡體積非常接近
- 三、由氣泡破碎分裂的小氣泡之運動過程可得到泡泡環的內部氣體流動方向。
- 四、起始孔徑的形狀並不會影響泡泡環的形成。
- 五、在雙孔的實驗中，若孔重疊，則可視為單孔的結果；而不重疊孔氣泡混合後會產生速度慢、壓力大的混合區，最後造成中間破裂而不成環。
- 六、在相同的氣體噴射孔徑下，泡泡環由開始產生至離開噴射孔所需時間與外加壓力及外力作用時間皆無關。
- 七、由連續方程式知噴射孔徑越小，氣體出口速率越大，所以噴射孔徑越小之氣泡成長所需時間越短。
- 八、由於本實驗為利用外加氣體壓力作用於水管之水體，再由水管內的水進入泡泡環產生器內，增加其水的體積進而造成產生器內的氣體向出口運動，所以噴射孔氣泡離開噴射孔後，即使外力繼續作用都無再增加氣泡的體積，所以在氣泡高度與外力作用時間的結果中，會有達到飽和值的趨勢。
- 九、使用球型氣泡模型來解釋外加壓力增加，氣泡體積亦增加的趨勢。
- 十、利用離開噴射孔氣體體積等於氣泡的體積，可解釋外力作用時間與體積成正向增加關係。
- 十一、隨著時間增加，噴射孔氣體速率越大，則氣泡體積膨脹率越大。

柒、未來展望

完成了泡泡環產生器 No.4 之後，未來我們打算利用能拍攝每秒 300 張照片的高速攝影機，觀察泡泡環通過不同液體介面的現象(例：油水混合)、是否能產生出逆向旋轉的泡泡環；在這個實驗中先在孔蓋上鑽出很多小的圓孔，接著我們想將薄膜塗在孔蓋上中心周圍的小圓孔，使氣流衝出時中心受到阻力影響，來達到周圍的氣體流速大於中心點，使這項裝置有別於一般的泡泡環「中間比較快、周圍相對慢」的特性，以及許多泡泡環有趣的現象，像：海豚吐出橫向泡泡環、兩個泡泡環相連結會形成一個大的泡泡環、流星趕月(後來產生的泡泡環追上之前的泡泡環)及泡泡環從中間穿過另一個泡泡環時會變大等有趣的現象……。

捌、參考資料及其他

註一、泡泡環達人。

<http://www.youtube.com/watch?v=ClPa76lKvrY>

註二、氣泡科學。

<http://www.deepocean.net/deepocean/index.php?science09.php>

註三、泡泡環相關。

<http://www.bubblerings.com/bubblerings/media.cfm>

註四、科展作品—環型渦流。<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/39/highschool/39-1-1.pdf>

【評語】 040107

- 1.本作品探討水中環狀泡泡形成機制，設計各類實驗從事探討，具有科學實驗探究意義。
- 2.惟本作品應對其詮釋原因予以進一步之實驗驗證，使其立論可憑。
- 3.鼓勵本作品持續努力，補足理論模擬分析，使作品更完善。