

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 環境學科

第三名

052610

氣·塑 -- 氣泡牆對塑膠微粒攔截機制的探究

學校名稱：桃園市立桃園高級中等學校

作者： 高二 李冠旻 高二 曾筑筠 高二 馮亦妘	指導老師： 黃貞媛
---	------------------

關鍵詞：氣泡牆、塑膠微粒、保麗龍球

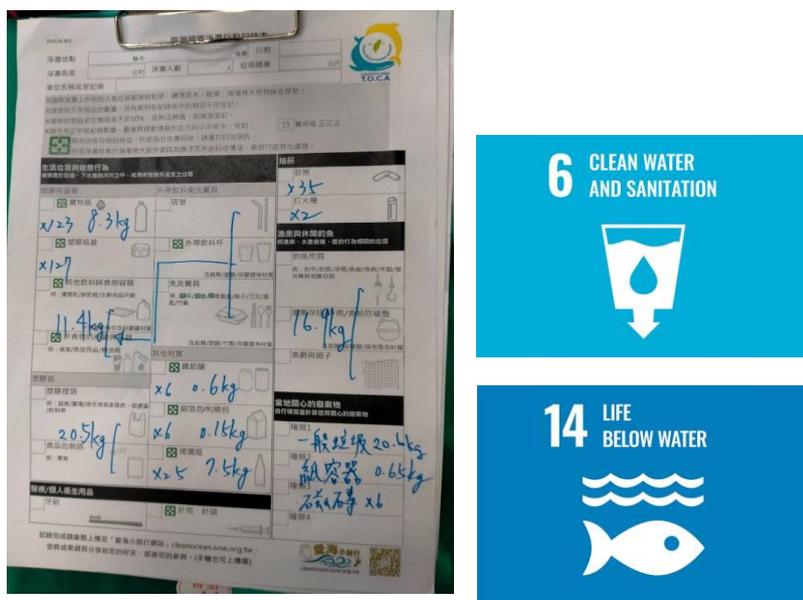
摘要

人類文明高速發展下，對石化產品的依賴導致塑膠垃圾激增。若垃圾未能有效回收處理，而在自然環境中降解、產生的大小不一的塑膠微粒，將提高回收難度，對自然環境各層面也造成巨量的傷害。為了解決這個問題，我們參考荷蘭的河道氣泡牆設計，建立一循環水箱並搭配出氣管，藉由調整出氣管參數以產生不同性質的氣泡牆，以探討對微小保麗龍球(<5mm)的攔截效果與微觀機制。由本研究發現，氣泡牆愈緻密能攔截到的微粒粒徑愈小，且整體攔截率落於 65%至 100%間。最後，我們比較氣泡牆攔截設計與淨水廠的污水處理流程，此系統能減少過濾材料耗損與水頭損失，且可由動態調整氣泡牆性質來調控攔截微粒的粒徑範圍，使後續之淨水流程得以更精密化。

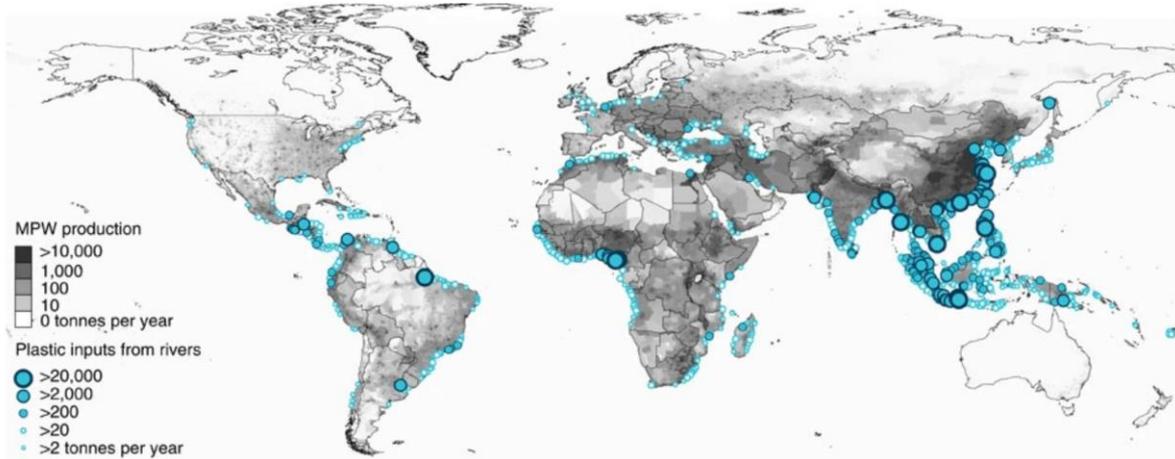
壹、研究動機

隨著人類文明飛速發展，便利的一次性塑膠產品逐漸滲透生活的各個層面，而緊隨的驚人垃圾量與對生態的嚴重破壞，更加不容小覷。塑膠製品流入溪流乃至大海中的過程中，會因降解而成體積更小的塑膠微粒而更加不易清除。根據美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)定義，塑膠微粒尺寸小於5毫米，因數量龐大且不易察覺，常在不知覺中進入食物鏈中，不僅危害人體健康，更會造成環境的惡性循環。因此，我們希望透過建置一套攔截系統，以有效過濾水溶液中的塑膠微粒，並降低對環境的傷害。

由本校志工服務社於2022年冬天在竹圍漁港進行之半日淨灘成果統計表可發現，在回收物中，寶特瓶在數量方面位居榜首，而廢棄餐具等諸多塑膠或紙製輕型容器亦是大宗，根據荒野保護協會與綠色和平共同發起的「全台海岸廢棄物快篩調查」計畫指出，2019年的全台海廢量約1227萬公升，重達646噸[1]。又根據海洋潔淨基金會之世界河川塑膠垃圾流向海洋的研究報告[2][3]：每年約有115至241萬公噸的塑膠垃圾從河川流入海洋。綜合實際淨灘記錄與上述統計資料，我們決定從源頭著手，期望降低廢棄物自河流入海的比例，以氣泡牆作為攔截手段，透過引導與攔截做到減少輕型廢棄物與塑膠微粒入海的比例。最後思考本研究在SDGs的意義，為世界的環保議題盡一份心力。



圖一、2022年12月，半日淨灘垃圾物統計。與本研究相關之SDG概念圖。



圖二、全球不當處理的塑膠垃圾產量分布與由模型推算之每年由河川排放至海洋的塑膠重量。[3]

貳、研究目的

- 一、探討塑膠微粒的特徵與影響層面
- 二、自製氣泡牆並探討其對應的性質
- 三、建置氣泡牆攔截塑膠微粒系統，找出最佳的攔截參數
- 四、討論攔截裝置應用於自來水廠淨水設施的可能性

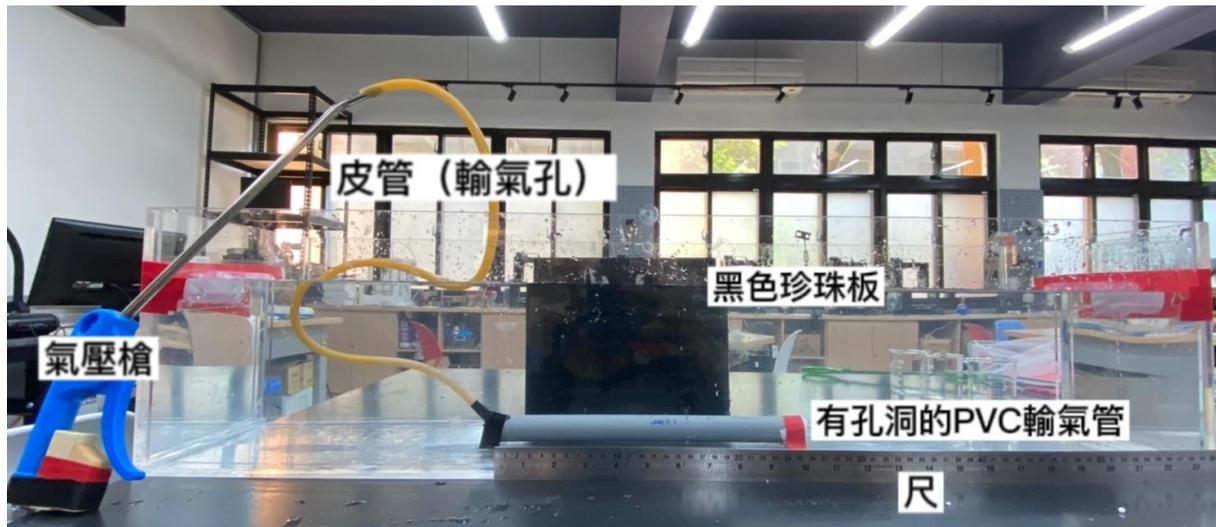
參、研究設備及器材

一、實驗相關設備與規格

設備名稱	規格	備註
空壓機	壓力：88 Bar/ 116 Psi	出氣(實驗出氣壓力為 9.75Bar)
橡皮管	略	接空壓機作為輸氣管
PVC 水管	略	鑽洞作為氣泡牆攔截主體
小型鑽頭	孔徑 0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm	鑽 PVC 水管孔洞

保麗龍球	平均直徑 3.65 mm、2.8 mm、1.05 mm 之保麗龍球	投擲樣品。密度 0.03 g/cm ³
壓克力水箱	90 cm × 25 cm × 20 cm	實驗裝置
木塊	略	製作固定用木板
鐵尺	30 cm、60 cm	拍攝參考比例尺
夾鏈袋	略	存放實驗前後樣品
電工膠帶	略	密封輸氣水管、固定物品
透明觀察平台	略	方便拍照作粒徑分析
黑色珍珠板	略	便於觀察氣泡牆性質
PVC 轉接頭	略	出水口
熱風槍	略	壓平轉接頭
沉水馬達	3000 L / H	循環水
一般漁網(大)	網目大小 1 mm	分離小顆粒保麗龍球，較利於觀察
緻密小漁網	網目大小 0.25 mm	撈剩餘在水箱的保麗龍球
緻密大漁網	網目大小 0.25 mm	攔截保麗龍球
椰子油起泡劑	濃度 35 %兩性界面活性劑	實驗樣品
量筒	25 ml	測量界面活性劑體積
燒杯	100 ml	盛裝配置好的保麗龍球
電腦	略	使用 Nano Measurer、Excel、Tracker、記事本等軟體分析實驗數據

二、觀察氣泡牆性質之實驗裝置



圖三、氣泡性質實驗之側視圖

三、塑膠微粒攔截水箱之裝置



圖四、氣泡攔截裝置俯視圖

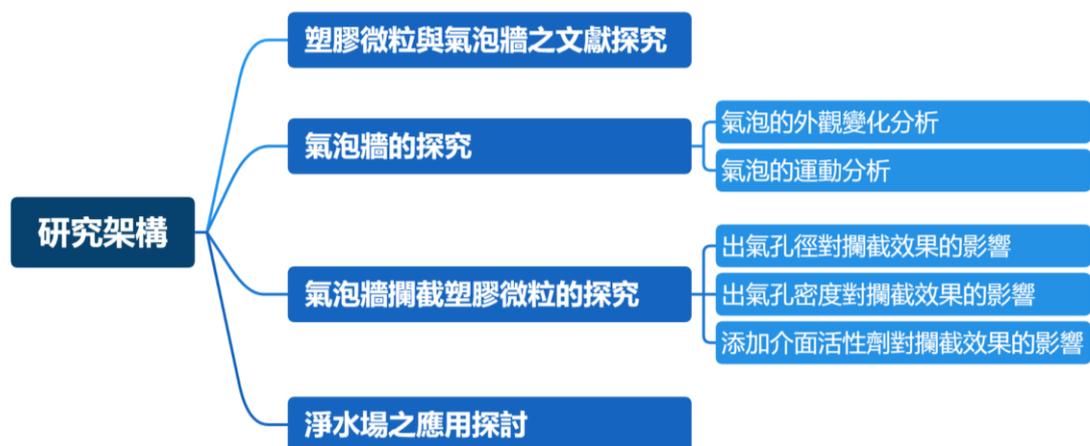
肆、研究過程與方法

一、研究大綱

因塑膠微粒體積太小，容易滲透在生活的每個階層，本研究提出以氣泡牆作為攔截過濾主體，探究以此去除液體中塑膠微粒的機制。我們採取粒徑落在 0.2~5mm 之間的保麗龍球作為測試樣品，並建置循環水箱與氣泡牆系統，探究不同氣泡管的變因下，產生之氣泡牆的性質，以及對保麗龍球的攔截效果。另外，我們嘗試在循環水中參雜介

面活性劑，以改變水溶液的表面張力，討論對應之攔截效果的改變。最後，為將此系統落於實際生活，我們進一步討論氣泡牆在自來水廠的可能應用。

- (一) 塑膠微粒與氣泡牆之文獻探討
- (二) 探究不同出氣管參數產生之氣泡的物理性質，包括氣泡外觀大小、速度。
- (三) 取投擲樣品：粒徑約 3 mm、1 mm、0.3 mm 的保麗龍顆粒各 200 顆，共 600 顆，拍照以做後續分析。
- (四) 利用 Nano Measurer 分析投擲樣品之照片，做粒徑與數量關係的分析。
- (五) 架設循環水箱與氣泡牆系統，作為氣泡牆對塑膠微粒的攔截實驗裝置。
- (六) 改變出氣管孔徑大小，探究氣泡牆攔截率與粒徑分布變化。
- (七) 改變出氣管孔密度，探究氣泡牆攔截率與粒徑分布變化。
- (八) 探究水中加入介面活性劑，對氣泡牆攔截率與粒徑分布變化的影響。
- (九) 建立模型，探討氣泡牆對塑膠微粒攔截的微觀機制。
- (十) 自來水廠的實際應用探討。



圖五、研究流程圖

二、文獻探討

(一) 塑膠微粒的產生與影響

塑膠碎屑或微粒能透過各種人為方式產生，例如汽車煞車時輪胎耗損[4]和處理回收物時磨碎的粉塵[5]，也能透過自然方式，例如風化、紫外線照射、生物分解等使塑膠垃圾分解成更小的微粒子[6]。另外，塑膠微粒也可直接由家庭與工業廢水排放出，例如洗衣後的廢水常含有大量成衣纖維，與人類清潔用品內含的柔珠等。根據國際自然保護聯盟（International Union for Conservation of Nature，IUCN）的調查報告，此種來源

占海中的塑膠微粒的 15%~31%。[7]

由同一份報告指出，塑膠微粒容易吸附環境賀爾蒙、重金屬與戴奧辛等劇毒成分，可經由霧霾散佈至空氣中，在不經意中吸入肺部。也可透過水循環，流至河川與大海中，被海中生物攝取而進入人類的食物鏈，並造成破壞性的影響。例如：Ragusa 等人利用拉曼光譜分析，於人類胎盤中發現尺寸介於 5 到 10 微米的塑膠微粒[8]，並進一步探討塑膠微粒與疾病的關係[9]。Leslie 等人在 22 志願受測者的血液中發現粒徑大於 700 奈米的塑膠微粒，成分包含常見的 PET(聚對苯二甲酸乙二醇酯)、PE(聚乙烯)、PS(聚苯乙烯，含 EPS 發泡聚苯乙烯，即保麗龍)、PP(聚丙烯)，因這些塑膠具有生物可利用性，吸收至血液中的速率大於排除速率。[10] Luís Fernando Amato-Lourenço 等人在人類的肺部各區域發現許多小於 5.5 微米的塑膠微粒[11]。

塑膠微粒的尺寸小於 5 毫米，但實際的粒徑分布範圍很大，其中，大氣中的微塑膠在 200-700 微米間[12]，易漂浮在空氣中，並靠大氣環流帶到世界各處，使得遠離塑膠產地的馬尼拉海溝、高山與兩極地，皆可找到塑膠微粒的蹤跡。

目前已知從液體中收集並去除塑膠微粒的方式，主要透過拖網採集，類似的概念包括台灣點點塑公司設計的塑膠微粒收集機台，其原理為利用水流特性與物體密度的差異，使水流中的微粒產生自然沉降，可收集 20 微米的微粒[13]。另外，汗水處理廠通常利用沉澱、過濾等地物理性方法，來做初步篩除，再進一步利用細菌與維生物做塑膠殘存物質的分解。但是一些微粒在奈米等級，經過處理的汗水仍會有塑膠微粒殘留。

所有塑膠製品中，保麗龍為密度極輕的一類，其成分為發泡性聚苯乙烯(Expandable Polystyrene, EPS)，所占體積裡有 90%-95% 的空氣，密度介於 0.01~0.03 g/cm³ 之間。因其蓬鬆特性，常作為緩衝、絕緣、隔熱等材料。例如市場裝放漁獲的包裝盒、台灣西南沿海養蚵的浮具、貨物包裝層等。保麗龍因成本低而被廣泛使用，但使用年限只有 2-3 年，過去習慣使用的保麗龍漁具，已經造成沿海環境嚴重的汙染[14]。

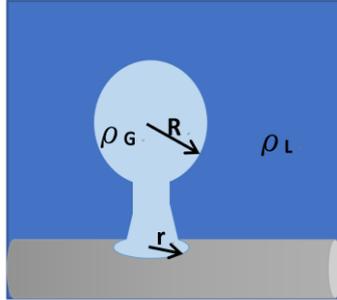
(二) 氣泡牆的物理性質

1. 氣泡脫離氣泡管的條件

若在水中放置氣泡管，產生的氣泡大小可由牛頓力學估計[15]。由圖六所示，產生一個氣泡需要抵抗表面張力額外作功。作功的大小與氣泡的表面積 ΔA 有關，

$$W = \gamma \Delta A \quad (1)$$

其中 γ 為液體的表面張力。



圖六、由氣泡管產生之單一氣泡過程示意圖

假設氣泡管出氣孔徑為 r ，液體的密度為 ρ_L ，氣泡內的氣體密度為 ρ_G ，則產生的氣泡體積為 V ，半徑為 R 。

氣泡產生過程中，因壓力差的原因而產生浮力 F_b ，向上；並考量氣泡的重力 F_w ，向下

$$F_b - F_w = V(\rho_L - \rho_G)g \quad (2)$$

同時，氣泡管底部有表面張力 F_s ，向下，

$$F_s = 2\pi r\gamma \quad (3)$$

當浮力與重力合大等於表面張力時， $F_b - F_w \geq F_s$ ，氣泡能脫離出氣管，形成完整的氣泡。臨界條件為 $V(\rho_L - \rho_G)g = 2\pi r\gamma$ 。

若產生的氣泡為球形，則 $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ ，可推得

$$R = \left[\frac{3r\gamma}{2g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

2. 氣泡上升的運動方程式[16]

當液體中的氣泡完整形成後，若上升速度為 v ，則會有液體阻力的作用，向下，

$$D = 6\pi\mu Rv \quad (5)$$

其中 μ 為液體的黏滯係數。(5)式為低流速時，雷諾數 $R < 1$ 時的黏滯阻力方程式[17]。因雷諾數(Reynolds number)是流體中慣性力與黏滯力的比值，當雷諾數小時，流體穩定；相對上雷諾數大時，流體流動不穩定，形成湍流[18]。因定義雷諾數 $R_e = \frac{\rho VL}{\mu}$ ，在本實驗裝置內，水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，特徵速度 V 約為 5 cm/s ，特徵長度 L 約為 15 cm ，水的黏滯係數 $\mu = 1 \text{ (mPa} \cdot \text{s)}$ ，推得之雷諾數 $R_e = 7.5$ ，雖然大於 1 ，但仍遠低於高流速時的雷諾數 $R < 1000$ 極限，故此以低流速的阻力方程式做估算。

因氣泡上升的過程中同時受到重力 F_w 、浮力 F_b 和液體阻力 D 的作用，

$$\text{外力合為 } F = F_w + F_b + D = \frac{3}{4}\pi R^3(\rho_L - \rho_G)g - 6\pi\mu Rv$$

$$\text{其中氣泡質量為 } m = \frac{3}{4}\pi R^3\rho_G$$

$$\text{所以 } m \frac{dv}{dt} = \frac{3}{4}\pi R^3(\rho_L - \rho_G)g - 6\pi\mu Rv$$

整理過後可得，

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_L - \rho_G)g}{\rho_G} - \frac{9\mu v}{2R^2\rho_G} \quad (6)$$

當上升過程中，氣泡半徑 R 變化不大時，可視半徑為常數。由上式可解得氣泡上升速率

$$v = \left[v_0 - \frac{2(\rho_L - \rho_G)gR^2}{9\mu} \right] \exp\left(-\frac{9\mu}{2\rho_G R^2} t\right) + \frac{2(\rho_L - \rho_G)gR^2}{9\mu} \quad (7)$$

其中 v_0 為上升時的初速度。

當完整氣泡由管子冒出後，在上升過程中，隨著速度變大，阻力也變大，直到外力合為零，此時氣泡作等速度運動。此極限可以 $t \rightarrow \infty$ ，來找到近似的解。

$$v = \frac{2(\rho_L - \rho_G)gR^2}{9\mu} \quad (8)$$

3. 氣泡上升時的半徑改變[16]

氣泡上升時，液體的壓力會隨深度改變。設大氣壓力為 P_0 ，氣泡距液面的距離為 z ，氣泡內部的壓力為 P ，

$$P = P_0 - \rho_L g z + \frac{2\gamma}{R}$$

若氣泡內的壓力很小，其內的氣體可視為符合理想氣體狀態，可用理想氣體方程式描

述， $PV = nRT$ 。

$$\left(P_0 - \rho_L gz + \frac{2\gamma}{R}\right) \times \frac{3}{4}\pi R^3 = nRT \quad (9)$$

所在液體溫度 T 固定，可看出氣泡上升過程時，深度 z 變小，則氣泡半徑 R 變大。

然而，當氣泡大小與移動距離尺度差異不大時，關於氣泡大小的變化還需要進一步考量氣泡在水中所受到的靜水壓(hydrostatic pressure)差[15]。參考圖七，U 點與 B 點分別代表液體中的氣泡上、下端點。設此兩端點的距離為 h ，

兩點間的靜水壓差為

$$\Delta P = (\rho_L - \rho_G)gh \quad (10)$$

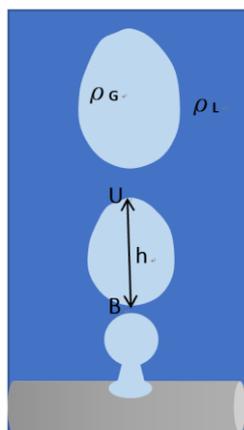
另外，兩點間的毛細管壓力(capillary pressure)差為，

$$P_c = 2\gamma\left(\frac{1}{R_U} - \frac{1}{R_B}\right) \quad (11)$$

其中 R_U 與 R_B 分別為上端點和下端點的曲率半徑。

當達平衡時， $\Delta P = P_c$ ，

$$(\rho_L - \rho_G)gh = 2\gamma\left(\frac{1}{R_U} - \frac{1}{R_B}\right) \quad (12)$$



圖七、氣泡由氣泡管上升過程的外觀變化示意圖。

因為液體密度大於氣體密度，左式必為正值，代表 R_U 必小於 R_B 。氣泡上升的過程的過程，不可能維持完美球形。由式子可看出，當 h 變大， R_U 與 R_B 的差值會隨之變大；即氣泡上升時，體積變大，原球形氣泡的形變會變得更加明顯。氣泡顯然地呈現不穩定狀態。

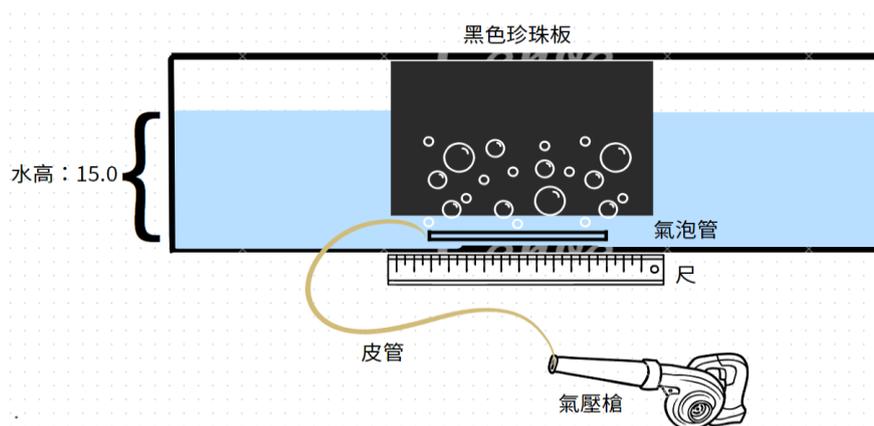
(三) 氣泡牆系統的已知應用

1. 降低海上施工噪音[19][20]：氣泡幕可以用來減少海上打樁機產生的噪音影響。科學家在海上平台外圍建立氣泡牆，可有效降低一公里內的噪音影響，使得一些對聲音敏感的動物，例如海豚，生存環境不會受到干擾。
2. 減少海上漏油的油污擴散[21]：利用氣泡上升時，會將周圍的水一同向上帶領的特性，當這些水到達液面後會隨之形成水平的表面流，使石油擴散停滯。此外，因氣泡幕產生器通常設置在幾公尺深的地方，這使得船隻可在其上行駛而沒有任何阻礙。這在海上漏油的回收行動中屬於相當明顯的優勢。
3. 收集海洋垃圾[22][23]：上述所提到的表面流在收集輕型廢棄物中也有相當卓越的貢獻，在荷蘭已有實際於河道建置的案例，預期可清除86%~90%的塑膠污染。

三、實驗流程

(一) 氣泡牆性質的探究

1. 實驗裝置



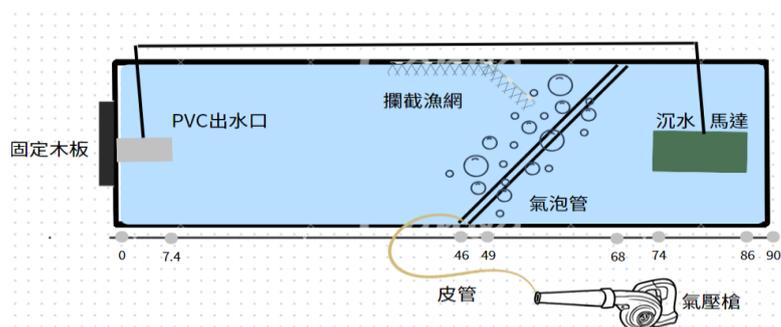
圖八、探究氣泡牆性質的實驗側視圖，單位為公分。

2. 實驗步驟

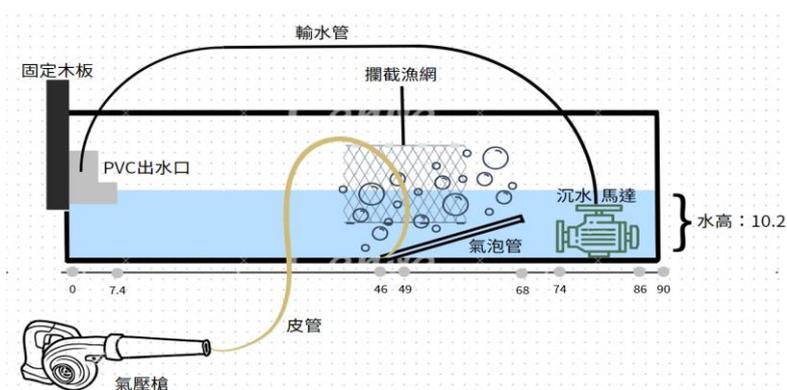
- (1) 裝置架設完成後，依序安裝氣泡管(0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm)
- (2) 啟動空壓機，以 240 Frame Per Second (FPS)的慢動作進行錄製。
- (3) 利用 Handbrake 進行轉檔，將影片轉成 60 FPS。
- (4) 利用 Tracker，追蹤氣泡位置變化並進行外觀與運動分析。

(二) 氣泡牆攔截裝置之實驗

1. 實驗裝置



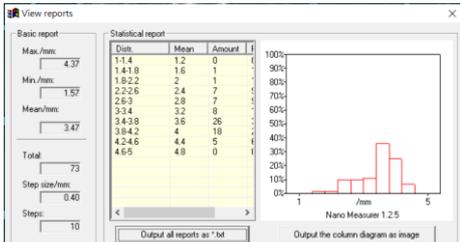
圖九、氣泡牆攔截實驗之俯視圖，圖中數值標示之尺度，單位為公分。



圖十、氣泡牆攔截實驗之側視圖，圖中數值標示之尺度，單位為公分。

2. 樣品選擇與粒徑分布

- (1) 取粒徑約 3 mm、1 mm、0.3 mm 的保麗龍顆粒各 200 顆，共 600 顆做為實驗之投擲樣品母體，拍照紀錄。
- (2) 利用 Nano Measurer 分析樣品之照片，做粒徑與數量關係的分析。
- (3) 輸出數據至 Excel 做後續統計討論。

600 顆投擲母體	量測每顆樣品粒徑	由 Nano Measurer 的分析得粒徑與個數關係
		

3. 實驗一：出氣管出氣孔徑對攔截率與攔截粒徑分布的影響

(1) 操縱變因：出氣孔徑(0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm)

(2) 控制變因：投放之保麗龍球(粒徑約 3 mm、1 mm、0.3 mm 各 200 顆，總數 600±5 顆)、保麗龍球投放點(出水口正中心)、氣壓(由 9.75 bar 啟動)、PVC 管規格(長 30.0 cm、內徑 20 mm)、出氣孔間隔(0.5、1、1.5 cm)、傾斜角度(0 度)、旋轉角度(45 度)、循環水時間(30 秒)、水寬(24 cm)、水長(90cm)、水高(10.2 cm)、出水口高度(10.0 cm)

(3) 應變變因：攔截粒徑分佈、攔截質量百分比

(4) 實驗方法：開啟氣泡牆出氣閥與循環水系統，於出水口前方投擲保麗龍球樣本，循環水運作 30 秒後提起濾網，以面紙輕覆使其乾燥，最後拍照進行粒徑分析，並將結果匯入 Excel 製圖。重複三次實驗，做統計平均。

4. 實驗二：出氣管洞密度對攔截率與攔截粒徑分布的影響

(1) 操縱變因：出氣孔間隔(0.5、1、1.5 cm)

(2) 控制變因：投放之保麗龍球(粒徑約 3 mm、1 mm、0.3 mm 各 200 顆，總數 600±5 顆)、保麗龍球投放點(出水口正中心)、氣壓(由 9.75 bar 啟動)、PVC 管規格(長 30.0 cm、內徑 20 mm)、出氣孔徑(0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm)、傾斜角度(0 度)、旋轉角度(45 度)、循環水時間(30 秒)、水寬(24 cm)、水長(90cm)、水高(10.2 cm)、出水口高度(10.0 cm)

(3) 應變變因：攔截粒徑分佈、攔截質量百分比

(4) 實驗方法：開啟氣泡牆出氣閥與循環水系統，於出水口前方投擲保麗龍球樣本，循環水運作 30 秒後提起濾網，以面紙輕覆使其乾燥，最後拍照進行粒徑分析，並將結果匯入 Excel 製圖。重複三次實驗，做統計平均。

5. 實驗三：加入介面活性劑之氣泡牆對攔截率與攔截粒徑分布的影響

(1) 操縱變因：介面活性劑之毫升數(0 mL、0.072 mL、0.144 mL)

(2) 控制變因：投放之保麗龍球(粒徑約 3 mm、1 mm、0.3 mm 各 200 顆，總數 600±5 顆)、保麗龍球投放點(出水口正中心)、氣壓(由 9.75 bar 啟動)、PVC 管規格(長 30.0 cm、內徑 20 mm)、出氣孔徑(1.0 mm)、出氣孔間隔(1.5 cm)、傾斜角度(0 度)、旋轉

角度(45 度)、循環水時間(30 秒)、水寬(24 cm)、水長(90cm)、水高(10.2 cm)、出水口高度(10.0 cm)

(3) 應變變因：攔截粒徑分佈、攔截質量百分比

(4) 實驗方法：開啟氣泡牆出氣閥與循環水系統，於出水口前方投擲保麗龍球樣本，循環水運作 30 秒後提起濾網，以面紙輕覆使其乾燥，最後拍照進行粒徑分析，並將結果匯入 Excel 製圖。

伍、研究結果

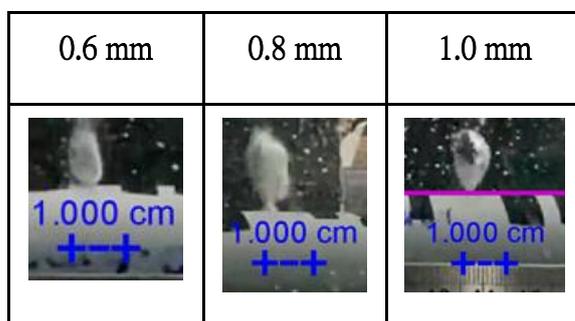
一、氣泡牆性質的探究

(一) 氣泡的外觀變化分析

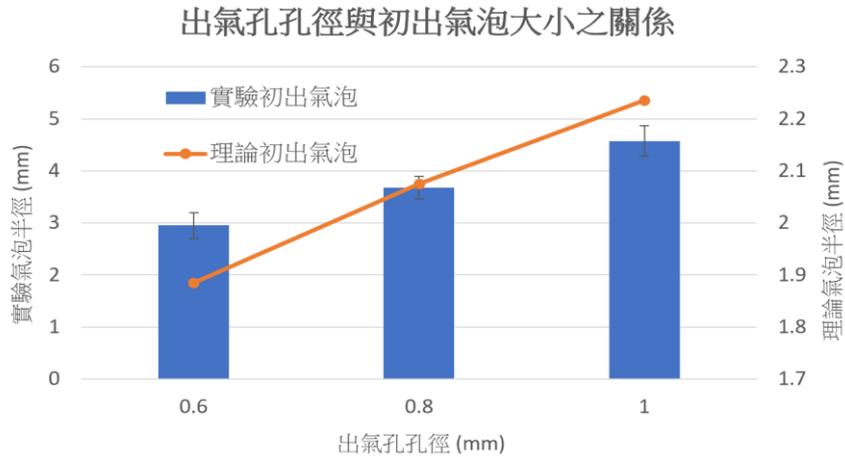
1. 初出氣管的氣泡大小

我們可由理論估算從出氣管初出剛形成的完整氣泡之半徑。以 20° C 時，水的表面張力 $\gamma = 72.75$ (mN/m)，水的密度 $\rho_L = 9.982$ (kg/m³)，空氣的密度 $\rho_G = 1.205$ (kg/m³)；另外重力場強度 $g = 9.8$ m/s²。將以上數值代入(4)式，可分別求得不同出氣孔徑大小所形成的理論氣泡半徑： $R_{0.6\text{ mm}} = 1.87$ (mm)、 $R_{0.8\text{ mm}} = 2.08$ (mm)、 $R_{1.0\text{ mm}} = 2.24$ (mm)。

下圖為不同出氣孔產生的氣泡示意圖。



針對每種出氣孔徑，我們分別各取 10 個氣泡測量其半徑大小、紀錄並作統計分析，結果如圖十一。



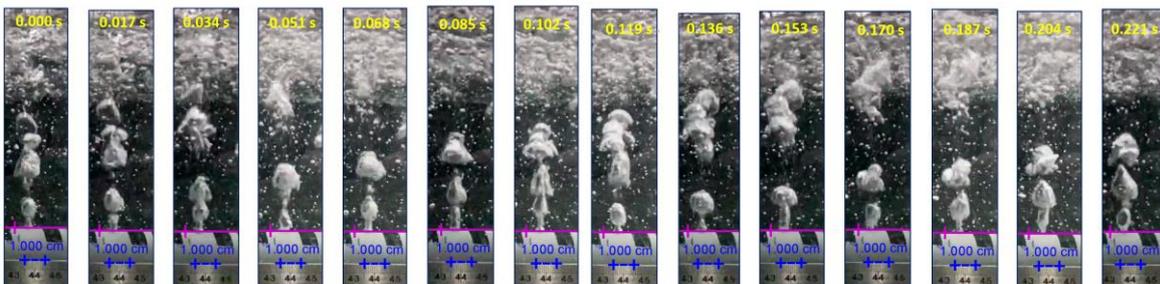
圖十一、不同出氣孔徑與產生之完整氣泡大小的關係。

由實驗數據可見，隨著出氣孔徑增大，氣泡半徑也隨之增大。但整體實驗值約為理論值的 2 倍。因(4)式的理論值成立在產生氣泡非常緩慢的準靜態條件下[15]，然而實際實驗產生的氣泡牆，為經過 9.75 bar 的空壓機穩定打氣的結果。氣泡因一定的氣壓被打至水中，平均產生一個完整氣泡的時間約分別為 0.05 秒，使得實驗值與理論值間存在系統性的偏移。

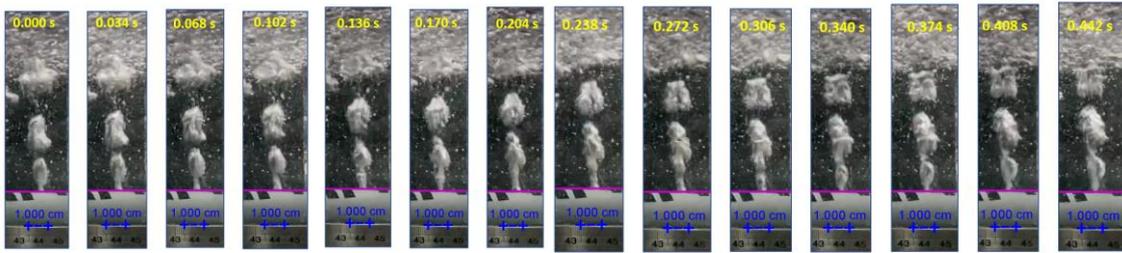
2. 氣泡外觀的變化

我們以水深 15 cm 觀察氣泡上升過程時，大小與外觀變化的細節，藉以獲得完整氣泡牆的微觀性質與整體規律。不同出氣孔產生的氣泡速率不同，因此對應採樣的圖片間格也有所不同。

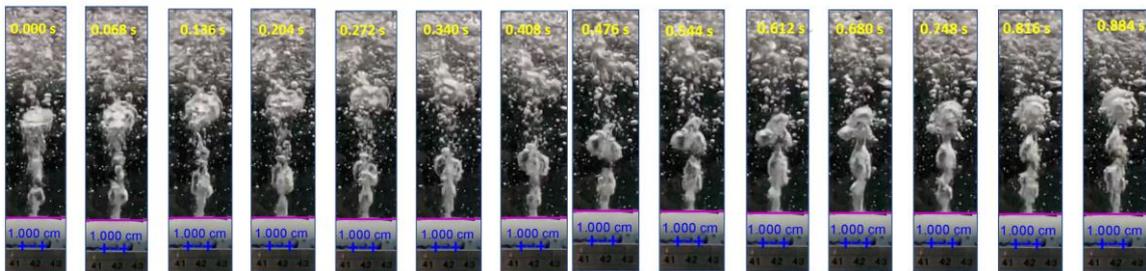
(1) 1 mm 出氣孔徑 (每個影幅間格 0.017 秒)



(2) 0.8 mm 出氣孔徑 (每個影幅間格 0.034 秒)



(3) 0.6 mm 出氣孔徑 (每個影幅間格 0.068 秒)



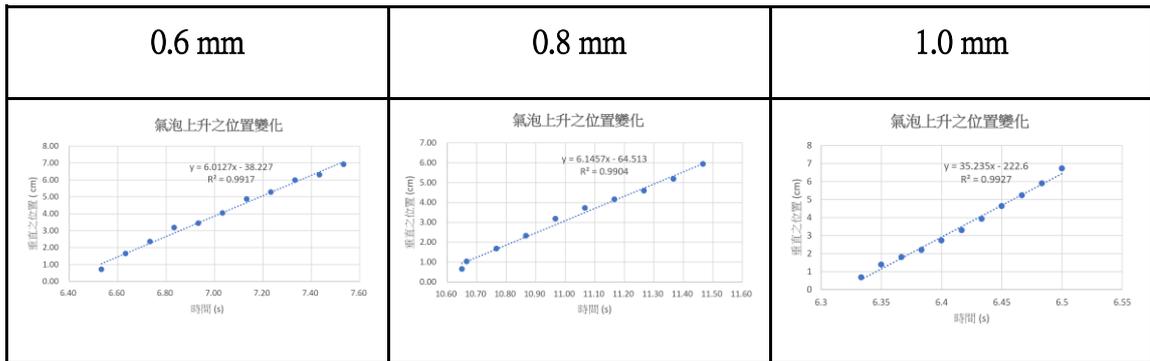
由單一氣泡連續變化圖可觀察到幾個共同點，氣泡約在 7cm 深時，雖然外觀明顯變大，但實際上為原氣泡分裂成較小的氣泡所組成，整理形狀已非對稱的球形。此符合理論討論所歸納出的(12)式，即出氣管產生的氣泡，不易控制其外形，以形成較有規律變化的氣泡牆。另外，若兩個氣泡之間太靠近以至於相連，也可觀察到，下方氣泡的氣體會快速補充至上方氣泡的現象。基於這些原因，在實驗裡產生的氣泡牆，會有許多變數待釐清。

(二) 氣泡的運動分析

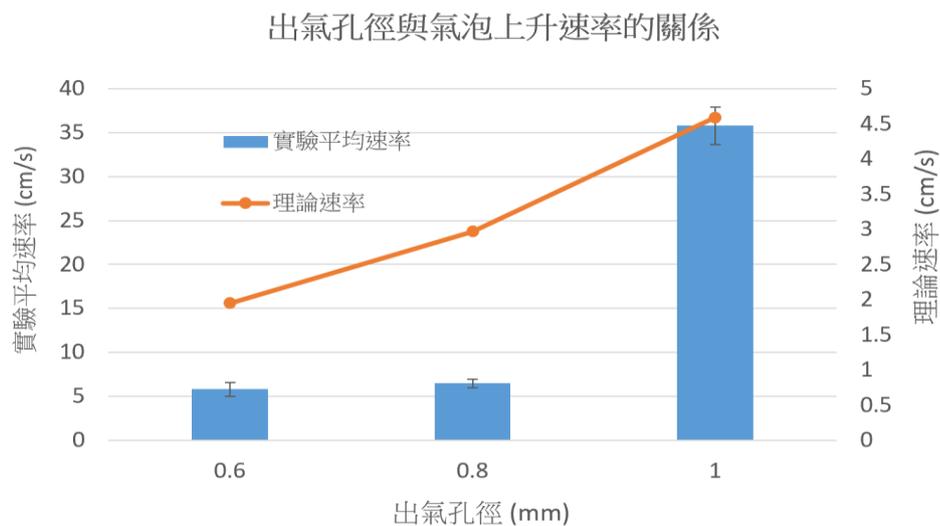
藉由觀察單一氣泡的外觀，氣泡雖然有變大的趨勢，但在我們實驗的水深裡，變化不大，因此由(8)式可估算氣泡的上升時的終端速度。在 20°C 時，水的黏滯係數 $\mu=1$ (mPa·s)，以實驗測得之初出氣泡半徑為參考： $R_{0.6\text{ mm}}=3.0$ (mm)、 $R_{0.8\text{ mm}}=3.7$ (mm)、 $R_{1.0\text{ mm}}=4.6$ (mm)，可分別求得理論之終端速度分別為： $v_{0.6\text{ mm}}=1.95$ (cm/s)、 $v_{0.8\text{ mm}}=2.97$ (cm/s)、 $v_{1.0\text{ mm}}=4.59$ (cm/s)。

針對三種出氣管孔徑，我們各取 10 個氣泡，分析其上升過程時的運動變化，利用 Tracker 標示氣泡的位置，將取得之數據利用一階線性方程擬和，其判定係數 R^2 皆在

0.99 以上，因此判斷實驗之氣泡上升之速度已在終端速度。由擬和所給之方程式，求一階導數以得氣泡的速率大小。下表所示為分析的其中一個氣泡數值。



所有氣泡之速度的統計結果如圖十二。

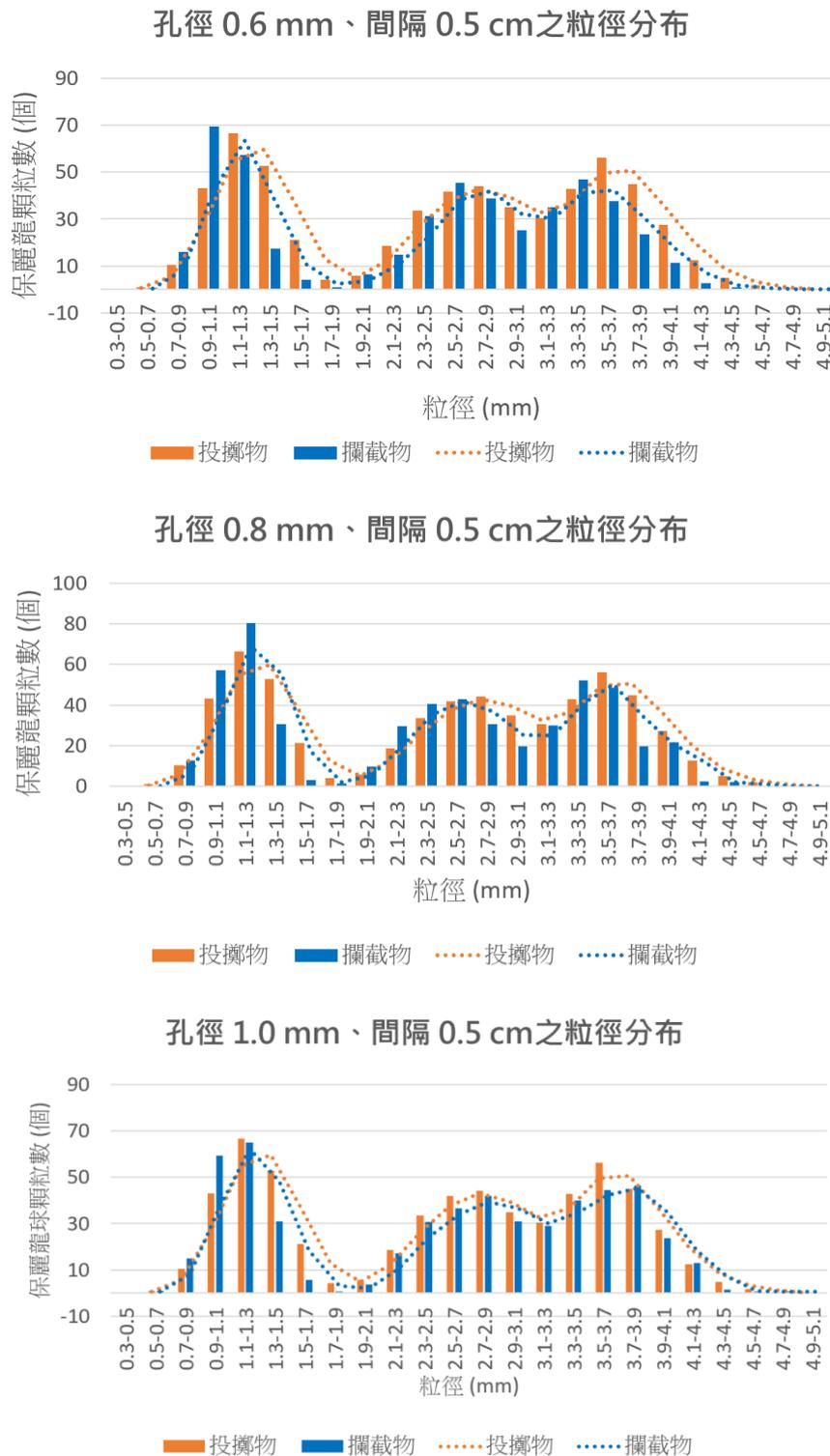


圖十二、不同出氣孔徑與氣泡上升速率的關係。

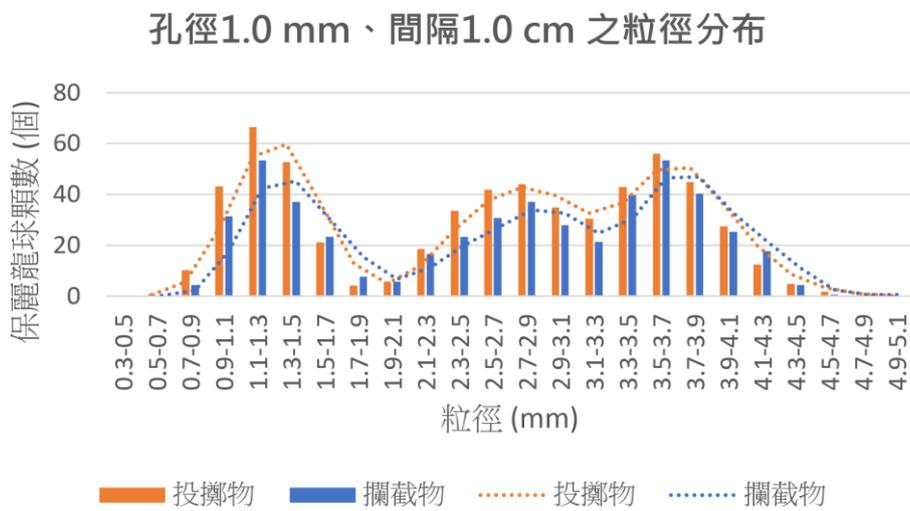
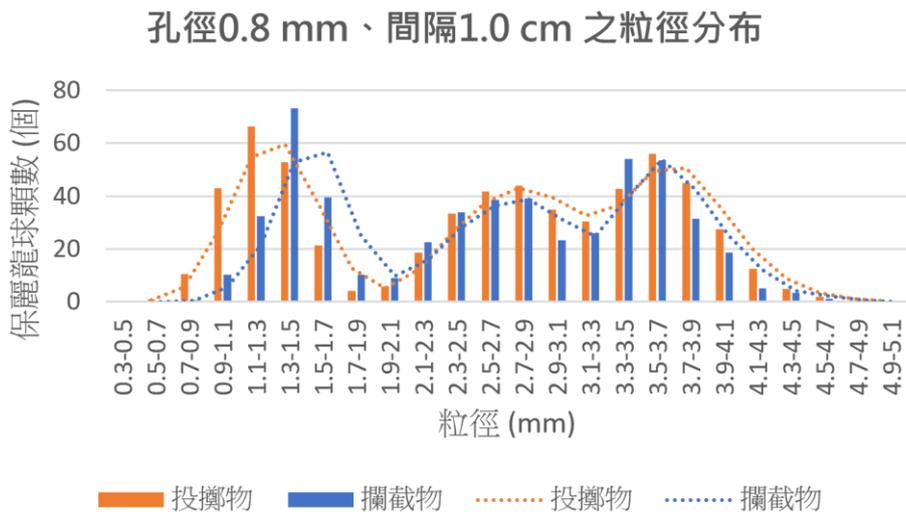
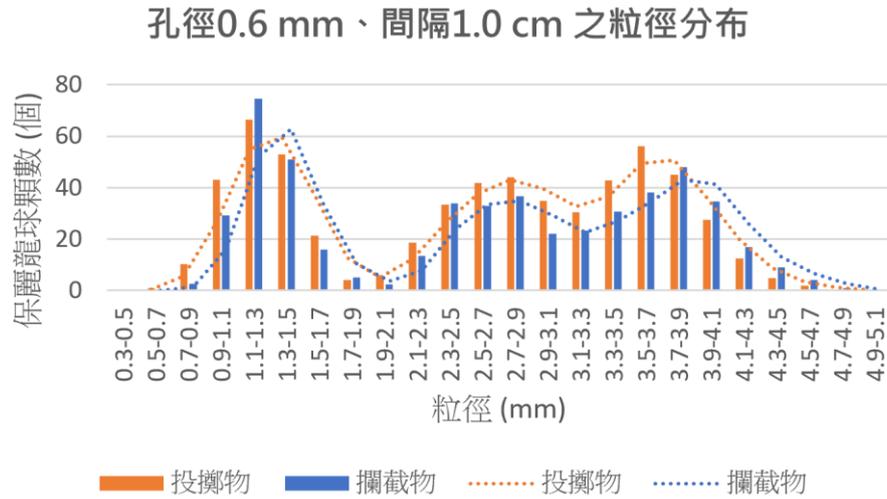
實驗分析得之上升速率與理論值有同樣趨勢，即隨著出氣孔徑變大，產生之氣泡上升速率也隨之變大。然而，孔徑 0.6 mm 與 0.8 mm 的實驗值約是理論值的 2 倍，而孔徑 1.0 mm 的實驗值卻是理論值的 7 倍左右。雖然由白努力定律的連續方程式 [24] 可知，不可壓縮流體的截面積與流體速率成反比，但實驗為可壓縮的氣體，且在實驗所在出氣孔徑範圍，1mm 的氣孔較能有效洩壓，使得生成氣泡被以較快的速度打出，推測此為實驗速率與理論數據偏差的原因。

二、氣泡牆攔截裝置之實驗

(一) 改變出氣管「出氣孔徑」與「出氣孔間隔」對攔截粒徑分布的影響

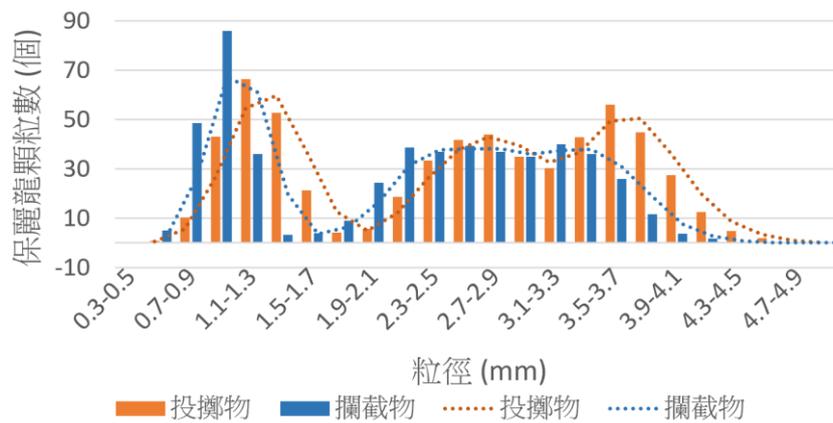


圖十三、氣泡孔間隔 0.5 cm，不同「出氣孔徑」與「攔截粒徑分布」的關係。

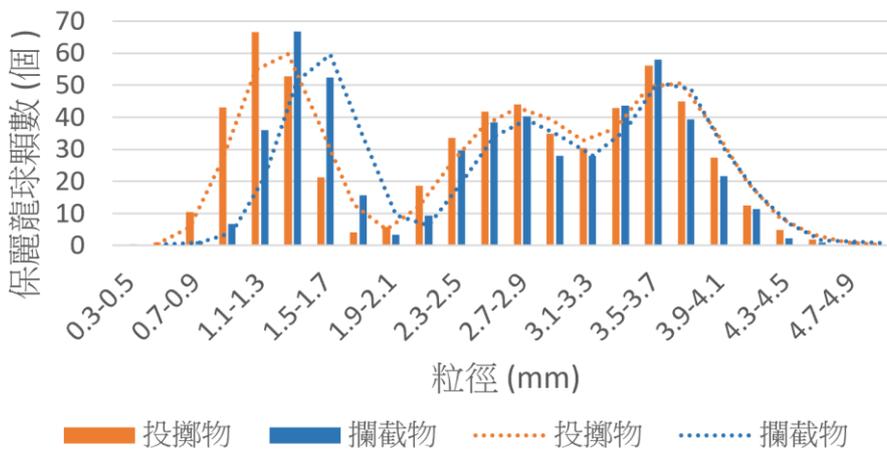


圖十四、氣泡孔間隔 1.0 cm，不同「出氣孔徑」與「攔截粒徑分布」的關係。

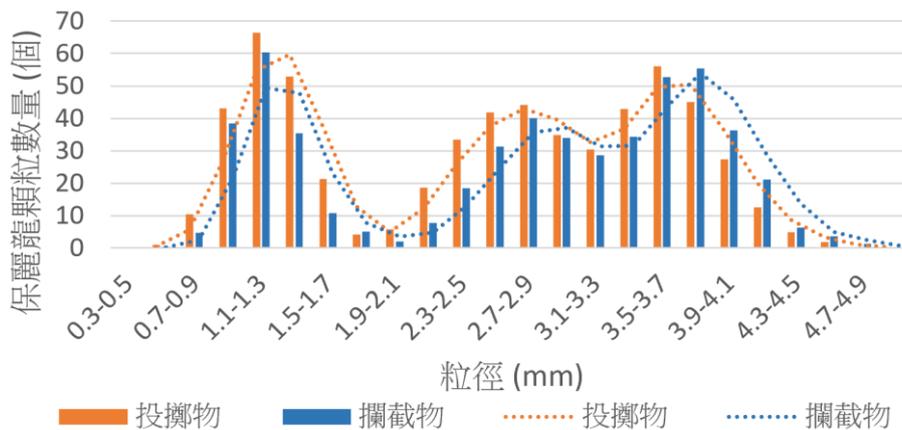
孔徑0.6 mm、間隔1.5 cm之粒徑分布



孔徑0.8 mm、間隔1.5 cm之粒徑分布

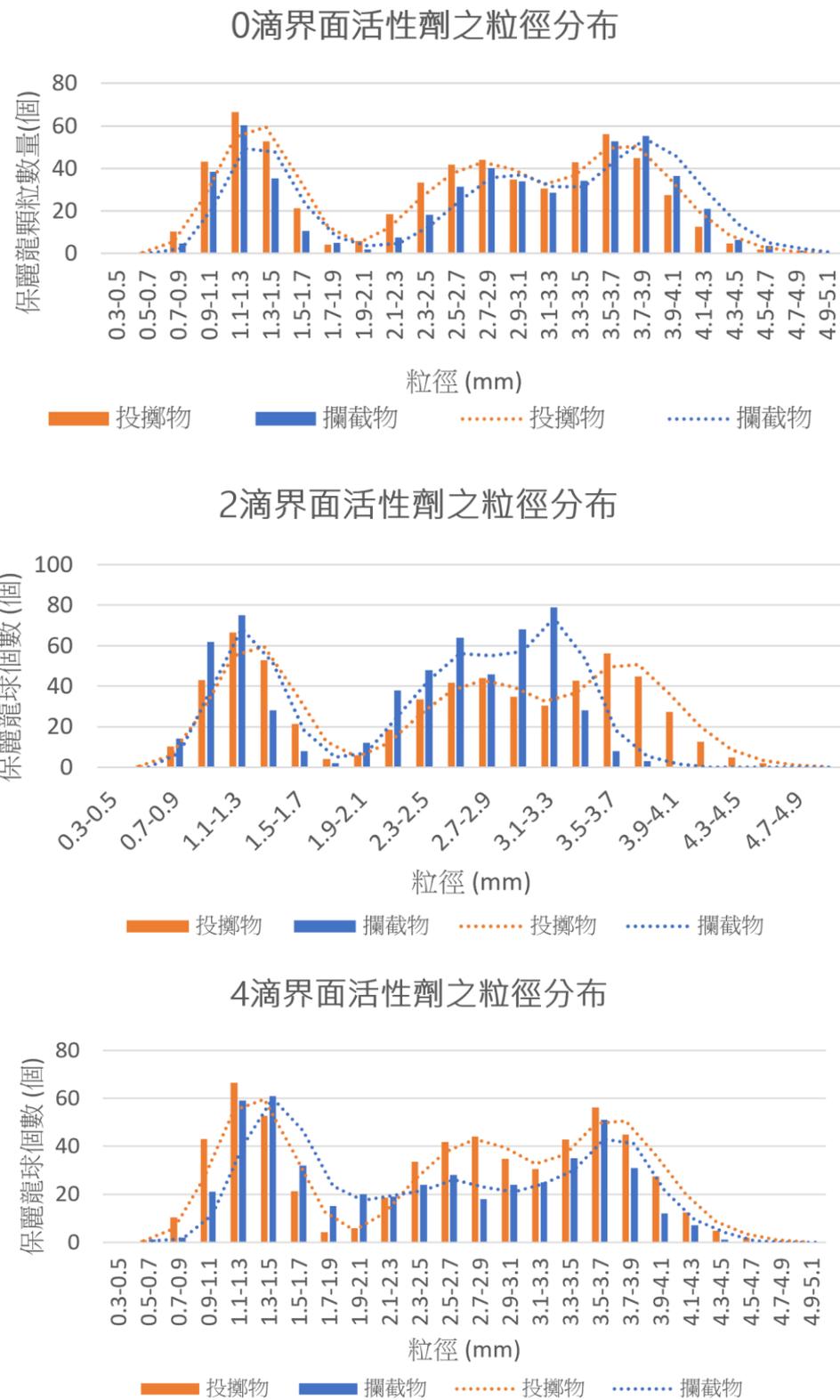


孔徑1 mm、間隔1.5 cm 之粒徑分布



圖十五、氣泡孔間隔 1.5 cm，不同「出氣孔徑」與「攔截粒徑分布」的關係。

(二) 「介面活性劑溶液濃度」對攔截粒徑分布的影響



圖十六、不同「介面活性劑濃度」與「攔截粒徑分布」的關係。

陸、討論

一、氣泡牆性質的探究

由我們的實驗結果可知，出氣管孔徑愈小，形成的氣泡愈小，也愈不穩定。氣泡在上升的過程中，體積變大但也容易碎裂成小氣泡團，液面的氣泡數量也因此提升。另外，出氣孔徑大小與氣泡上升速率呈正相關。這兩者的變化趨勢，大致與理論預測符合。因實驗值為理論值的 2~7 倍，我們將此歸因於實驗由空壓機打氣，產生氣泡過程非準靜態，因而有系統性偏移。歸納整體的實驗結果，較小的出氣孔，在水流經過的截面上，能產生較緻密之氣泡幕，使得經過氣泡管上方水域的微粒，較能有效阻攔，並被帶至濾網中。

圖十七為實驗水箱裡產生的氣泡牆俯視圖，氣泡牆位於氣泡管正上方，約 5~6 倍的出氣管寬(約 10 cm)。部分區域受限於實驗有限的水道空間，有時會產生局部渦流，例如在濾網前，約有 5%的測試樣品因此無法被攔截。

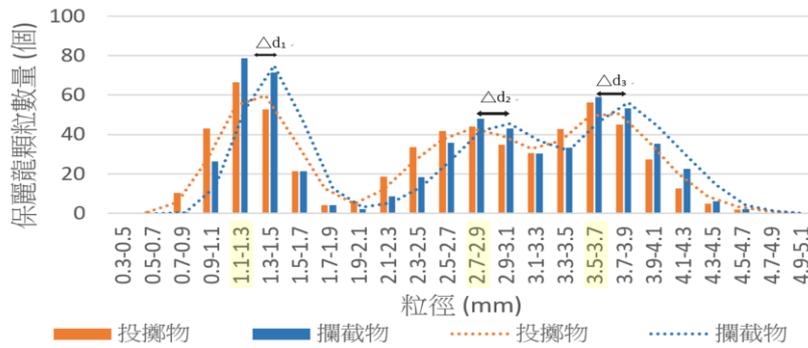


圖十七、氣泡牆在液體表面的分布。

二、氣泡牆攔截裝置之實驗

(一)「出氣管孔徑」與攔截粒徑的關係

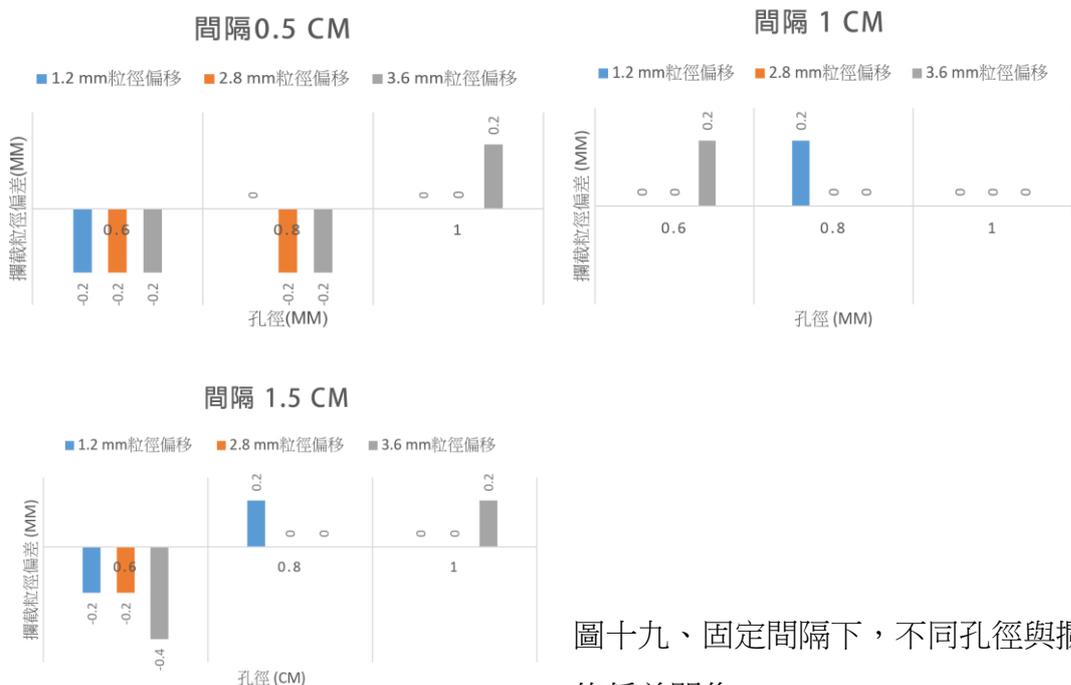
將原始投擲物粒徑分布畫出，可以找出本研究樣品的三個特徵峰值，分別落在平均粒徑 1.2、2.8、3.6 mm 的位置。比較固定變數下(出氣孔徑或出氣管密度)，實驗的攔截物粒徑分布，可能會有對應的峰值偏差量： Δd_1 、 Δd_2 、 Δd_3 。此偏差量可以用以檢視不同氣泡牆性質下，對特定粒徑範圍的攔截情形。定義方法如圖十八。



圖十八、定義粒徑分布偏移之示意圖。

首先，分別固定出氣孔間隔(密度)的情況下，可歸納出出氣孔徑與攔截粒徑偏差的關係，如圖十九。出氣孔間隔 0.5 cm 時，出氣孔徑 0.6 mm 與 0.8 mm 皆負偏移 0.2 mm；另外，在間隔 1.5 cm，出氣孔徑 0.6 mm 部分也有明顯的負偏移，此表示產生的較小、較密的氣泡幕，能攔截較小粒徑的保麗龍微粒。雖然這樣的趨勢並沒有出現在出氣孔間隔 1.0 cm 時，詳細原因待進一步動力學探究。

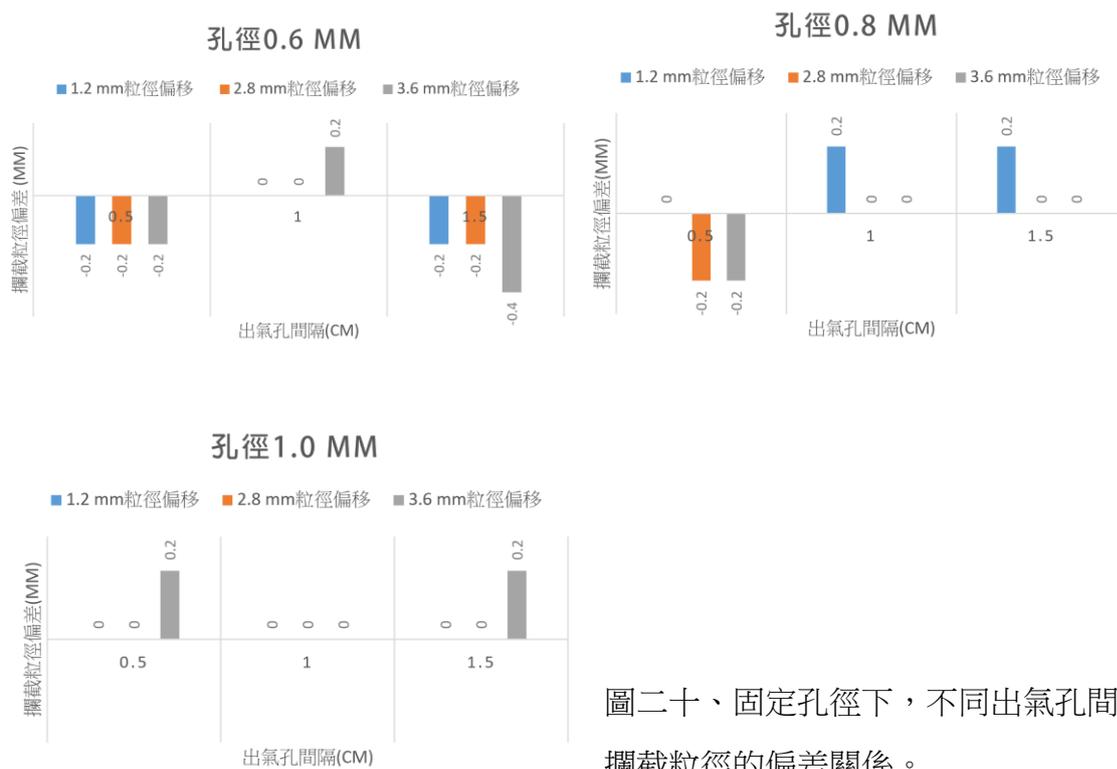
由圖十九，在大間隔(1.0 cm 與 1.5 cm)與大孔徑(0.8 mm 與 1.0 mm)時，攔截粒徑有部分正偏差，但效果不明顯，尤其是在 1.0 mm 孔徑下，幾乎無明顯的偏移，此暗示 1.0 mm 出氣孔產生的氣泡牆性質(氣泡半徑 4.6 mm、上升速度 35.8 cm/s)無法特殊擷取特定粒徑粒子。未來若欲深入探討氣泡牆性質對攔截粒徑偏差的效應，應採取小於 1 mm 的出氣孔，才能觀察出對應的影響。



圖十九、固定間隔下，不同孔徑與攔截粒徑的偏差關係。

(二) 「出氣管孔間隔(密度)」與攔截粒徑的關係

接著，分別固定出氣孔孔徑，可歸納出出氣孔間隔(密度)與攔截粒徑偏差的關係，如圖二十。此圖為上段落的再整理，可以看出類似趨勢。當孔徑為 0.6 mm 時，間隔 0.5 cm 與 1.5 cm 有負偏差量；但間隔 1.0 cm，轉變為不明顯的正偏差量。當孔徑為 0.8 mm 時，小間隔(0.5 cm)一樣有負偏差量，間隔變大時，出現正偏差效果。此兩個趨勢代表：間隔小的出氣孔產生較密的氣泡牆，偏向攔截液體中的較小微粒；相對的，間隔大的出氣孔產生之氣泡牆較鬆散，偏向攔截液體中的較大微粒。此效應，在孔徑 1 mm 時，並不明顯。

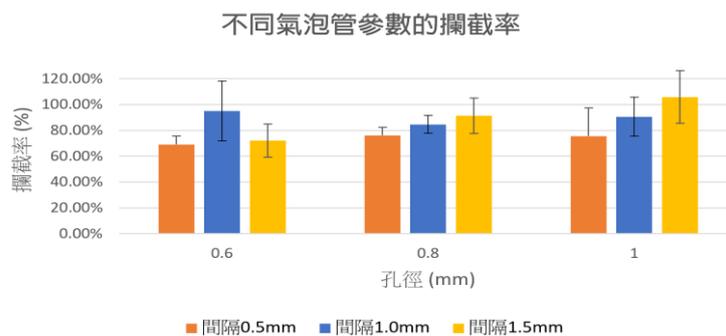


圖二十、固定孔徑下，不同出氣孔間隔與攔截粒徑的偏差關係。

(三) 出氣管「出氣孔徑」與「出氣孔間隔」對攔截率的影響

由實驗所得粒徑分布圖，可推算出投擲物與攔截物的質量：(i) 取每個粒徑範圍的平均值當作平均粒徑，由此算出平均體積 (ii) 將每個範圍的平均體積乘以個數，並加總，得投擲物或攔截物的總體積 (iii) 將體積乘以保麗龍球密度(0.03 g/cm³)得對應之質量 (iv) 以「攔截率(%) = $\frac{\text{攔截物質量}}{\text{投擲物質量}} \times 100\%$ 」計算對應之攔截率。另外，因為密度項可同除約去，故本研究直接由體積計算攔截率。

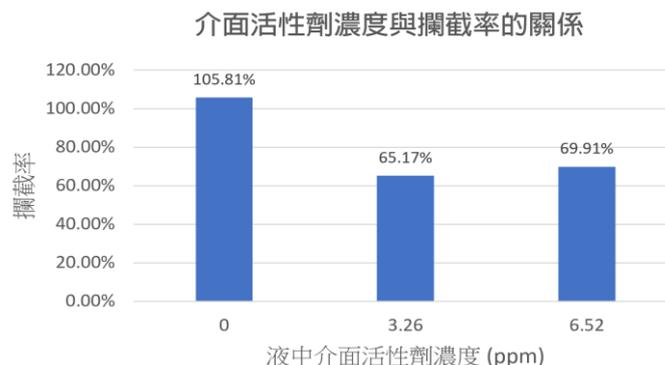
若將兩操作變因所得之攔截率作圖，可得以下關係。除了出氣管孔徑 0.6 mm 之外，攔截率隨著出氣孔間隔上升而變大，表示在此實驗設計下，較鬆散的氣泡幕造成的氣泡堆反而較能攔截水流表面大部分的保麗龍微粒。在單一間隔下(0.5 mm 或 1.0 mm)，攔截率與孔徑大小變化關係不明顯，但在間隔 1.5 mm 時，隨著孔徑變大，攔截率隨之上升，推測此應為本實驗由體積計算攔截率有關。整體攔截率皆在 65%以上，表示氣泡牆能做為水中微粒的攔截手段，若能有效控制對應之產生氣泡參數，能提高攔截率至 90%以上。



圖二十一、「出氣孔徑」與「出氣孔間隔」與攔截率的關係。

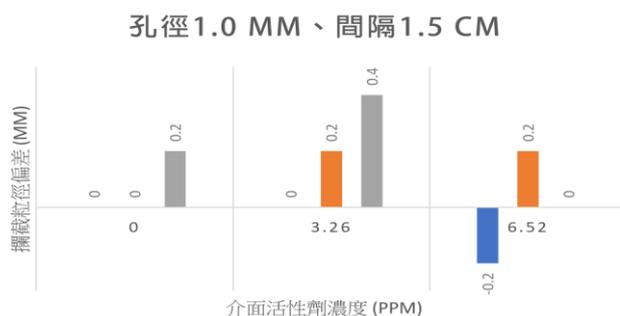
(四) 液中「介面活性劑濃度」與攔截粒徑、攔截率的關係

本實驗能擷取之最小介面活性劑量為一滴(0.036 mL)，對應實驗的水箱的水容積為 22L，可推算當加入一滴介面活性劑入實驗水箱內，濃度為 1.63 ppm。將實驗數值依此比例換算成濃度(ppm)。並計算攔截率，如圖二十二。因濃度為零的數據產生不合理之偏差(攔截物>投擲物)，在此先不考慮此數據。隨著濃度上升，攔截率漸升。表示介面活性劑能使氣泡牆產生更持久穩定的氣泡，以將水中微粒雜質導引至攔截網。另外，本研究也嘗試過以濃度大於 16.3 ppm 的水溶液進行實驗，此時會產生過量的氣泡，在有限的水箱內，氣泡堆積於濾網前，使得保麗龍微粒無法被攔截。



圖二十二、介面活性劑濃度與攔截率的關係。

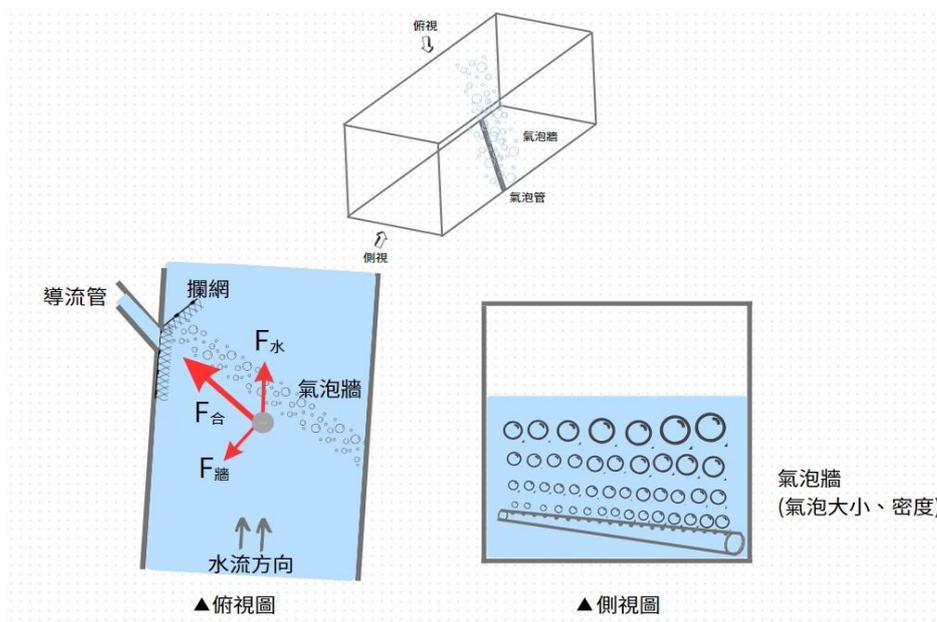
圖二十三討論水箱中加入介面活性劑對攔截粒徑偏差的影響。相較於濃度為零、無明顯偏差，在低濃度(3.26 ppm)時，攔截粒徑有明顯正偏差，表示因介面活性劑加入額外產生的泡沫，能攔截住較大粒徑的微粒，此現象與實驗觀察到的大氣泡有關。然而，此趨勢在濃度上升後消失，粒徑偏差正負皆有，無特定偏向。



圖二十三、介面活性劑濃度與攔截粒徑偏差的關係。

三、氣泡牆攔截水中微粒的機制探討

氣泡牆的攔截水中物質機制如圖二十四。



圖二十四、氣泡牆攔截機制之示意圖。

由俯視圖可知，當氣泡管斜放於水道正下方，在一固定水流下，此時液面的微粒同時受到水流推力 $F_{水}$ 與氣泡牆給予之正向力 $F_{牆}$ 作用，這兩力之合為 $F_{合}$ ，微粒會被推至此淨力方向，若將攔截網放置於此，便可攔截住水中的雜質微粒。此裝置若設置於淨水廠的濾水系統內，可於濾網後設置引流管，以減少濾網前渦流的產生。

氣泡牆的設立，可以攔截水道中大部分的大型固體垃圾，而若想攔截小於 5 mm 的塑膠微粒，氣泡牆性質的調控就相對重要。由本研究發現，藉由調整出氣孔徑與出氣孔密度，可以控制產生之氣泡牆的氣泡大小與密度。當經過水流截面的氣泡牆愈細緻且密集，便能攔截住更小的塑膠微粒。雖然本研究為求實驗穩定性，以保麗龍球開展實驗，但實際水道中的塑膠微粒密度分布範圍廣大，可能散佈於整體水流中，因此水流截面的氣泡牆的連續變化更尤為重要。

不過氣泡牆的產生為連續動力過程，產生的氣泡也會互相干擾影響，使得氣泡牆的性質非線性變化。若後續能針對此問題更深入探究，將對攔截機制與塑膠微粒攔截系統的設計提供更深刻的想法。

四、氣泡攔截裝置運用於淨水廠的可能性

目前自來水廠採用的淨水流程包含混凝、沉澱、過濾與消毒，主要目的為清除水中雜質與細菌[25]。明礬(即硫酸鋁鉀 $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$)為常見的混凝劑，當水中加入明礬後，其水解過程會產生白色膠狀的氫氧化鋁，以吸附水中的雜質與微粒。當吸附團愈大，最終會沉澱至池底，以達到淨水的目的。接著利用緻密的砂層進行過濾，可去除殘餘的顆粒甚至是大腸桿菌等微生物。而最後的消毒步驟，依法令加入氯來去除其他有害之細菌。

過濾池的運作原理包括物理性的濾除與吸附性去除。粒徑較大的粒子可直接透過濾網過濾。而當水中微粒粒徑太小時，可讓微粒在多孔隙的濾床中移動，產生的靜電作用使粒子附著在濾料上，以進一步去除。[26] 過濾池使用的濾料主要為無煙煤與石英砂，有效過濾粒徑分別為 1 與 0.5mm，淨水過程為間歇性的運作，有時會因濾床阻塞導致過濾速率減慢與水頭損失，以至於需要進一步反沖洗，而這個循環的過程容易造成過濾材料的損失。[27] 另外，以澄清湖的淨水廠為例，快濾池過濾速率約為 $416 \text{ m}^3/\text{hr}$ [28]。

相較於上述的過濾池，以氣泡牆作為過濾水中雜質的手段，因無涉其他反沖洗過程，所以較能減少水頭損失。另外，可藉由動態改變氣泡牆的性質，包括氣泡的大小與密度來調控攔截微粒的粒徑範圍，此為固定濾料無法達到的優勢。以我們氣泡牆水箱的

實驗設計，在 30 秒內濾水體積約 11 公升，攔截實驗的過濾速率為 $1.32 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，雖然還遠小於上述的澄清湖水廠數據，但可藉由擴大氣泡管的長度達到更大的攔截速率。

柒、結論

一、我們透過建置簡易氣泡牆攔截系統，可實踐聯合國所發布的永續發展目標 (SDGs) 其中的「提高全球水資源回收率與安全再利用率」與「預防及大幅減少各類型的海洋汙染」。

二、透過改變氣泡管的參數(孔徑及出氣孔間距)並探討其偏差值可得知：當出氣孔排列越緊密、孔徑愈小，可產出愈緻密的氣泡，提高小微粒的攔截率；反之，則可針對粒徑較大的微粒進行攔截。此趨勢在出氣孔徑 1.0 mm 以下較明顯，未來以此為門檻標準，以進一步探討粒徑篩選的設計。

三、整體攔截效率以氣孔間隔 1.5 cm、孔徑 1.0 mm 為最佳。推測與本實驗以體積作為攔截率之計算有關，此結論亦符合第二點中所述之參數變化趨勢。

四、隨著水中介面活性劑之濃度上升，攔截率漸升。顯示介面活性劑能使氣泡所具之引導與攔截能力提升。若調配比例適當，可幫助緻密氣泡生成以提升整體的攔截率。

五、本研究為以保麗龍球開展實驗，但實際水道中的塑膠微粒可能散佈於整體水流中，這讓水流截面的氣泡牆之連續變化更顯其重要。不過氣泡牆的產生為連續動力過程，氣泡之間也會互相干擾影響，使其性質並非線性變化。若後續能深究此問題，將對氣泡牆攔截機制與塑膠微粒攔截系統的設計提供更深刻的想法。

六、以本研究與淨水廠現行之過濾設施進行比較，主要優勢有二：其一，現行濾床之阻塞問題需要倚仗反沖洗流程解決，其過程容易造成濾材耗損與水頭損失，而氣泡牆的系統無此問題。其二，相較物理過濾池，我們可藉由動態調整氣泡牆性質，包括氣泡的大小與密度來調控攔截微粒的粒徑範圍，使後續之淨水流程得以更加精密化，此為固定濾料無法達到的優勢。

捌、參考資料及其他

[1] 河面垃圾攔除, 2023, March 22, 行政院環境保護署水質保護網.

https://water.epa.gov.tw/Public/CHT/WaterEnv/garbage_removal.aspx

[2] 胡介申, 2019, 海廢快篩-如何統計全台灣海岸的垃圾? 荒野保護協會

<https://www.sow.org.tw/blog/20190514/6719>

[3] Laurent et al., 2017, Jun, River Plastic Emissions to the World's Oceans, *Nature Communications*, 8-15611

[4] Brahney et al., April 12, 2021, Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle, *PNAS*, Vol. 118 | No. 16

[5] Brown et al., May 2023, The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness, *Journal of Hazardous Materials Advances*, Volume 10, 100309

[6] Zhang et al., 1 April 2021, Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review, *Environmental Pollution*, Volume 274, 116554

[7] Julien Boucher, Damien Friot, 2017, Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources, IUCN

[8] Antonio Ragusa et al., 2021 Jan, Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta, *Environ Int.*;146:106274

[9] Antonio Ragusa et al., 2022 Sep 14, Deeply in Plasticenta: Presence of Microplastics in the Intracellular Compartment of Human Placentas, *Int J Environ Res Public Health*;19(18)

[10] Leslie et al., May 2022, Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood, *Environment International*, Volume 163, 107199

[11] Amato-Lourenço et al., 2021 Aug 15, Presence of airborne microplastics in human lung tissue, *J Hazard Mater.*, 416:126124

[12] Luo, Yongming; Tu, Chen. Beat plastic pollution from the micro aspect: Towards sustainable development of researches in environmental microplastics. *Chinese Science Bulletin*. 2021-05-01, 66 (13): 1544 - 1546.

[13] Micro-PC 點點塑環保科技股份有限公司

<https://micropctw.com/>

[14] 陳璋玲、林家儀、郭馥禎, 108年4月, 保麗龍漁業廢棄物與管理措施之探討, 海巡雙月刊, No.98, P54-58

[15] Wikipedia-Foam

<https://en.wikipedia.org/wiki/Foam>

[16] 徐麦容、刘成云，Nov. 2008, 水中浮升氣泡的半徑和速度變化，大學物理 College Physics，第 27 卷第 11 期

[17] Drag (Physics)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics))

[18] Reynolds number

https://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number

[19] Würsig a, Greene & Jefferson, 2000 Feb, Development of an Air Bubble Curtain to Reduce Underwater Noise of Percussive Piling, Marine Environmental Research, Volume 49, Issue 1, Pages 79-93

[20] Lucke et al., 2011 Nov, The use of an air bubble curtain to reduce the received sound levels for harbor porpoises, J Acoust Soc Am, 130, 3406 – 3412

[21] Christina benjaminsen, 2011, Nov. 1, Fighting Oil Spills with Bubbles, Norwegian SciTech News

<https://norwegianscitechnews.com/2011/11/fighting-oil-spills-with-bubbles-2/>

[22] The Great Bubble Barrier

<https://thegreatbubblebarrier.com/>

[23] Senay Boztas, 2022, August 5, ‘Incredibly Promising’ : The Bubble Barrier Extracting Plastic from a Dutch River, The Guardian

<https://www.theguardian.com/environment/2022/aug/05/incredibly-promising-bubble-barrier-extracts-plastic-from-netherlands-river>

[24] 白努力定律

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E4%BC%AF%E5%8A%AA%E5%88%A9%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

[25] 自來水到我家：取水、導水、淨水、送(配)水。

<https://www.water.gov.tw/ch/Subject/Detail/1396?nodeId=776>

[26] 淨水處理系統原理

<https://waterexam.hk.edu.tw/file/K060802/operating/1.pdf>

[27] 經濟部水利署，100 年 12 月，公共給水現代化淨水操作監控及知識化資訊管理之示範建置計畫(3/3)

[28] 澄清湖淨水廠處理流程

<http://www.ecotek.com.tw/cclake/now-7.htm>

【評語】 052610

本研究參考荷蘭的河道氣泡牆設計，建立一循環水箱並搭配出氣管，藉由調整出氣管參數以產生不同性質的氣泡牆，以探討對微小保麗龍球(<5mm)的攔截效果與微觀機制期能解決在自然環境中降解所產生大小不一的塑膠微粒問題。本研究發現，氣泡牆愈緻密能攔截到的微粒粒徑愈小，且整體攔截率落於 65%至 100%間。比較氣泡牆攔截設計與淨水廠的汙水處理流程，此系統能減少過濾材料耗損與水頭損失，且可由動態調整氣泡牆性質來調控攔截微粒的粒徑範圍，使後續之淨水流程得以更精密化。

整體研究概念可行，實驗設計考慮佳並有豐富的實驗成果與討論，建議未來實際應用應考慮其他影響處理效能的因子，如其他粒狀物等，以及與目前市面上其他類似功能處理設備的比較與經濟效益評估。本作品設置一循環水箱並搭配出氣管，藉由調整出氣管參數以產生不同性質的氣泡牆，來探討對微小保麗龍球(<5mm)的攔截效果與微觀機制。研究之理論探討與實驗設計均佳，但題目針對「塑膠微粒」，內容卻是用保麗龍球代替，兩種性質差異甚多。

本研究觀察大間隔與大孔徑出氣孔，攔截粒徑有偏差且效果不彰；並推估大於 1.0 mm 出氣孔產生的氣泡牆性質(氣泡半徑 4.6 mm、上升速度 35.8 cm/s)，可能無法擷取特定粒徑粒子。建議以物理學及流體力學的觀點，加以討論此現象，將更具科學意義。

本研究為以保麗龍球開展實驗，與實際水道中的塑膠微粒可能散佈於整體水流中，在粒徑及分布屬性皆有極大差異。建議解釋此差異，對實驗可能造成的影響。

作品海報

氣·塑

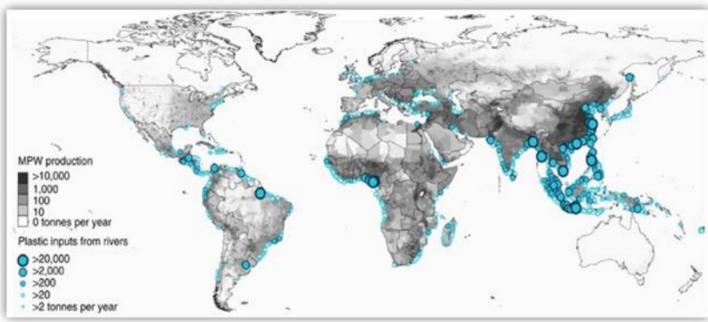
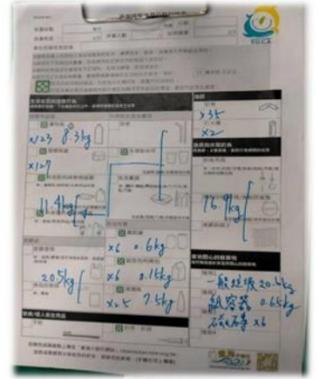
氣泡牆對塑膠微粒攔截機制的探究

壹、摘要

人類文明高速發展下，對石化產品的依賴導致塑膠垃圾激增。若垃圾未能有效回收處理，而在自然環境中降解、產生大小不一的塑膠微粒(Microplastics)，將提高回收難度，對自然環境也會造成巨量的傷害。尤其台灣為海島型國家，塑膠汙染的危害更易反饋至生活循環，影響人體健康。為了解決這個問題，我們參考荷蘭的河道氣泡牆設計[1]，建立一循環水箱並搭配出氣管，藉由調整出氣管參數以產生不同性質的氣泡牆，探討對微小保麗龍球 (< 5 mm) 的攔截效果與微觀機制。由本研究發現：氣泡牆愈緻密，能攔截到的微粒粒徑愈小，且整體攔截率落於65%至100%間。最後，我們比較氣泡牆攔截設計與淨水廠的汙水處理流程，此系統能減少過濾材料耗損與水頭損失，且可由動態調整氣泡牆性質來調控攔截微粒的粒徑範圍，使後續之淨水流程更精緻化。

貳、研究動機

人類生活重度仰賴便利的一次性塑膠產品，相關趨勢可由本校志工服務社於2022年在竹圍漁港進行之半日淨灘成果統計看出(右圖)。在廢棄物中，寶特瓶數量位居榜首，而諸多塑膠或紙製輕型容器亦是大宗。根據聯合國環境署(UNEP)的數據，海洋垃圾分別來自海上與陸上的人類活動，尤以後者為甚。當塑膠製品未被有效回收處理，流入溪流大海的過程中，會因降解而成體積更小的塑膠微粒而更不易清除。參考美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)定義，塑膠微粒尺寸小於5 mm，因數量龐大且不易察覺，常在不知覺中進入食物鏈中，不僅危害人體健康，更會造成環境的惡性循環。



根據發表於Nature Communication的研究[2]：全球每年約有115至241萬公噸的塑膠垃圾從河川流入海洋，如左圖示。綜合實際淨灘記錄與上述統計資料，我們決定從源頭著手，期望降低廢棄物自河流入海的比例，以氣泡牆作為攔截手段，透過引導與攔截做到減少輕型廢棄物與塑膠微粒入海的比例。最後思考本研究在SDGs的意義，為世界的環保議題盡一份心力。

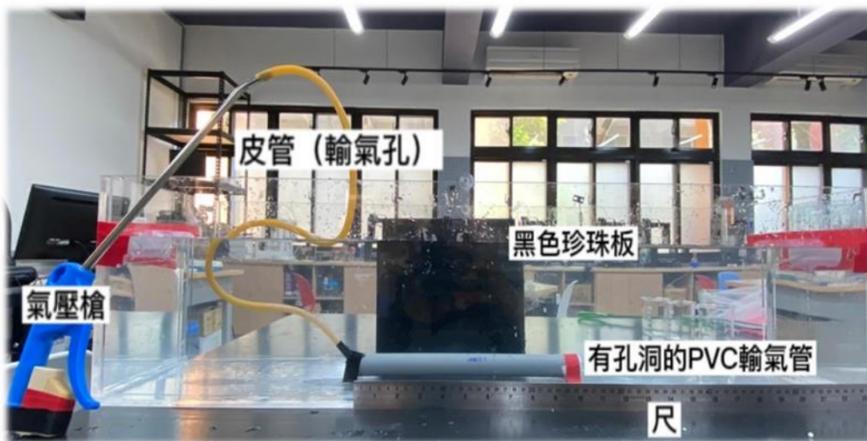


參、研究目的

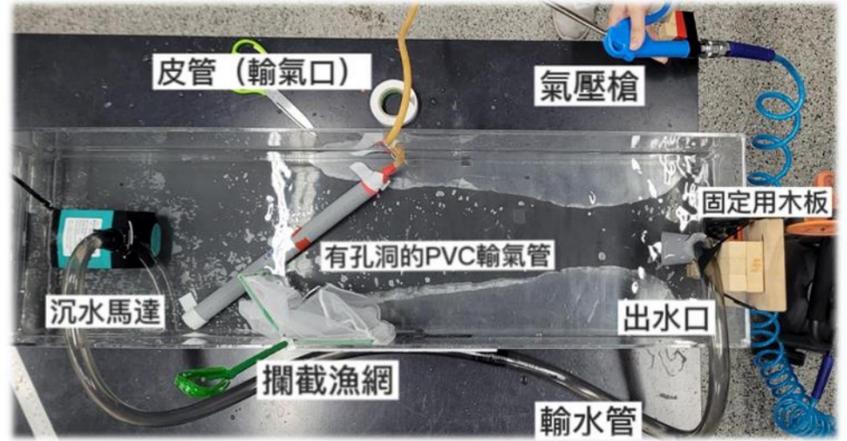
- 一、探討塑膠微粒的特徵與影響層面
- 二、自製氣泡牆並探討其性質
- 三、建置氣泡牆攔截塑膠微粒系統，找出最佳的攔截參數
- 四、討論攔截裝置應用於自來水廠淨水設施的可能性

肆、實驗器材與裝置

一、觀察氣泡牆性質之實驗裝置



二、塑膠微粒攔截水箱之裝置



伍、研究流程與方法

一、研究流程與架構

因塑膠微粒體積太小，容易滲透在生活的每個階層，本研究提出以氣泡牆作為攔截過濾主體，探究以此去除液體中塑膠微粒的機制。我們採取粒徑落在0.2 ~ 5 mm之間的保麗龍球作為測試樣品，並建置循環水箱與氣泡牆系統，探究不同氣泡管的變因下，產生之氣泡牆的性質，以及對保麗龍球的攔截效果。另外，我們嘗試在循環水中參雜介面活性劑，以改變水溶液的表面張力，討論對應之攔截效果的改變。最後，為將此系統落於實際生活，我們進一步討論氣泡牆在自來水廠的可能應用性。

- (一) 塑膠微粒與氣泡牆之文獻探討
- (二) 探究不同出氣管參數產生之氣泡的物理性質 (外觀、大小、速度)。
- (三) 取投擲樣品：粒徑約3 mm、1 mm、0.3 mm的保麗龍顆粒各200顆，共600顆，拍照以做後續分析。
- (四) 利用Nano Measurer分析樣品之照片，做粒徑與數量關係的分析。
- (五) 架設循環水箱與氣泡牆系統，作為氣泡牆對塑膠微粒的攔截實驗裝置。
- (六) 分別改變「出氣管孔徑大小」、「出氣孔密度」、「加入介面活性劑」，探究氣泡牆攔截率與粒徑分布的變化。
- (七) 建立模型，探討氣泡牆對塑膠微粒攔截的微觀機制。
- (八) 自來水廠的實際應用探討。



二、理論基礎

(一) 塑膠微粒的產生與影響

1. 產生方式包含人為(輪胎耗損[3]與回收過程造成之粉塵[4])與自然(風化、紫外線照射與生物分解等[5])。
2. 透過大氣環流遍布世界各處，遠至高山、極地，甚至馬尼拉海溝皆可找到。
3. 可透過霧霾散佈至空氣，被吸入肺中。也可經由水循環，被水中生物攝食而進入人類的食物鏈中。
4. 科學家已於人類的肺部[6]、血液[7]與胎盤[8]中發現不同種類，奈米至微米等級的塑膠微粒。

(二) 氣泡牆的物理性質

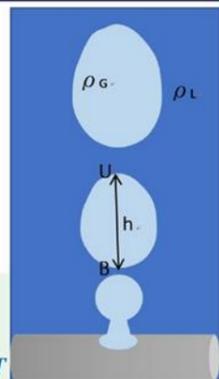
1. 氣泡脫離氣泡管的條件
 浮力與重力的差值 $F_b - F_w = V(\rho_L - \rho_G)g$
 氣泡管口的表面張力 $F_s = 2\pi r\gamma$
 產生氣泡脫離管口的條件 $F_b - F_w \geq F_s$
 可推得初出氣泡大小 $R = \left[\frac{3r\gamma}{2g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/3}$

2. 氣泡上升的動力分析

重力、浮力和液體阻力 D 外力合為
 $F = F_w + F_b + D = \frac{4}{3}\pi R^3(\rho_L - \rho_G)g - 6\pi\mu Rv$
 若上升時氣泡半徑 R 變化不大，可解得氣泡上升速率
 $v = \left[v_0 - \frac{2(\rho_L - \rho_G)gR^2}{9\mu} \right] \exp\left(-\frac{9\mu}{2\rho_G R^2}t\right) + \frac{2(\rho_L - \rho_G)gR^2}{9\mu}$
 當 $t \rightarrow \infty$ ，氣泡等速上升， $v = \frac{2(\rho_L - \rho_G)gR^2}{9\mu}$

3. 氣泡上升時的半徑改變

(1) 氣泡內壓力為 $P = P_0 + \rho_L gz + \frac{2\gamma}{R}$
 由理想氣體方程式 $\left(P_0 + \rho_L gz + \frac{2\gamma}{R}\right) \times \frac{4}{3}\pi R^3 = nRT$
 當液溫 T 固定，氣泡上升，深度 z 變小，氣泡半徑 R 變大。
 (2) 當氣泡大小與移動距離尺度相近時，需進一步考量氣泡的靜水壓(hydrostatic pressure)差 $\Delta P = (\rho_L - \rho_G)gh$
 且兩點間的毛細管壓力(capillary pressure)差為 $P_c = 2\gamma\left(\frac{1}{R_U} - \frac{1}{R_B}\right)$
 當達平衡時， $\Delta P = P_c \cdot (\rho_L - \rho_G)gh = 2\gamma\left(\frac{1}{R_U} - \frac{1}{R_B}\right)$



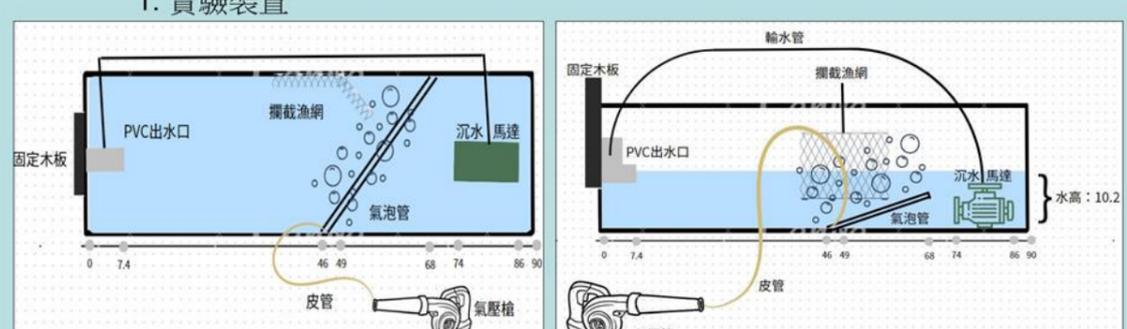
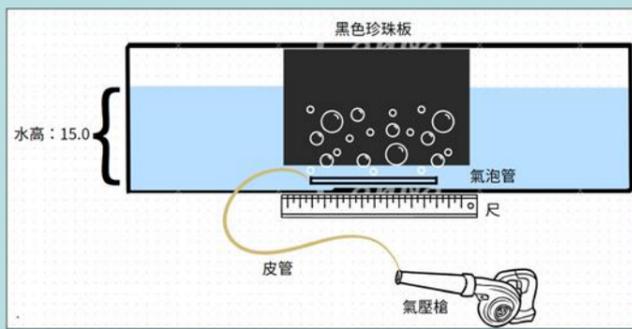
(三) 氣泡牆系統的已知應用：降低海上施工噪音[9]、減少漏油與油污擴散[10]、收集海洋垃圾[11]。

三、研究方法

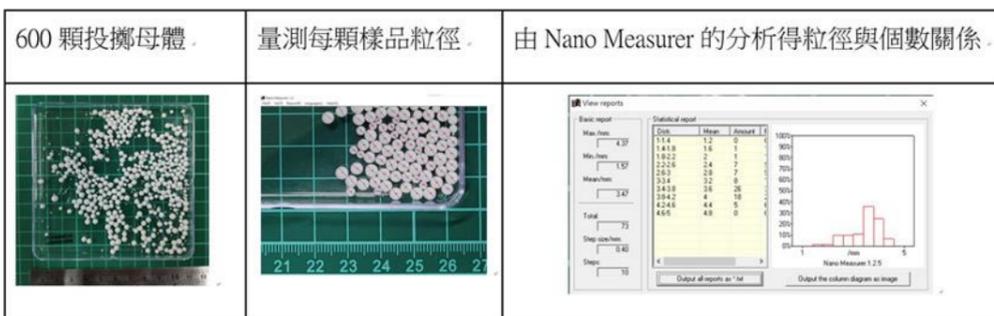
(一) 氣泡牆性質的探究

(二) 氣泡牆攔截裝置之實驗

1. 實驗裝置



2. 樣品選擇與粒徑分布



3. 【實驗一】

出氣管出氣孔徑對攔截率與攔截粒徑分布的影響

4. 【實驗二】

出氣管出氣孔密度對攔截率與攔截粒徑分布的影響

5. 【實驗三】

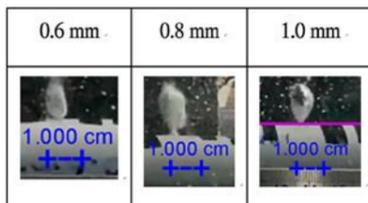
加入介面活性劑之氣泡牆對攔截率與攔截粒徑分布的影響

陸、研究結果

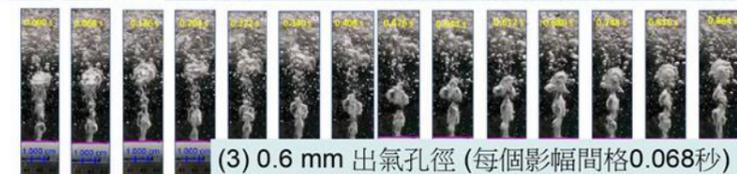
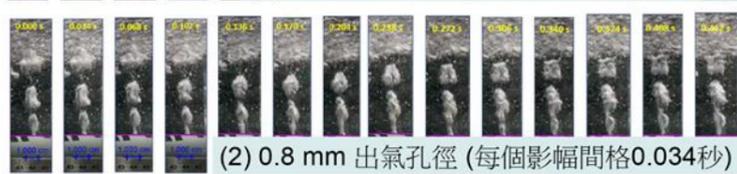
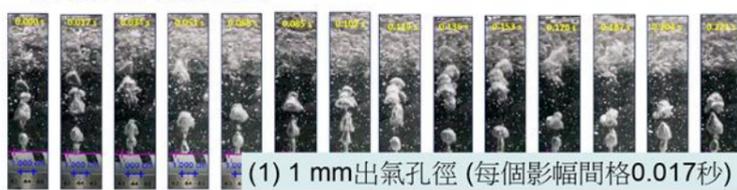
一、氣泡牆性質的探究

(一) 氣泡的外觀變化分析

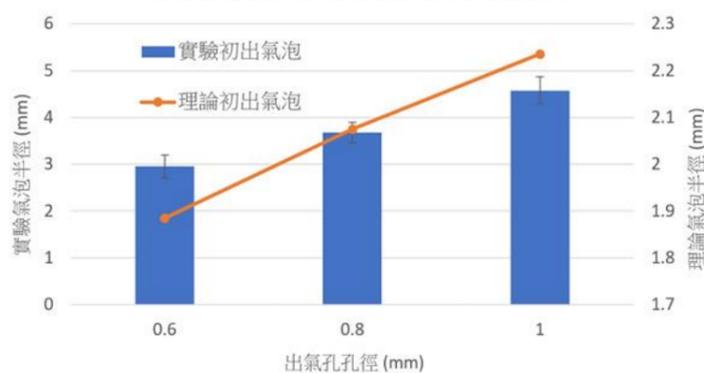
1. 初出氣管的氣泡大小



2. 氣泡外觀的變化

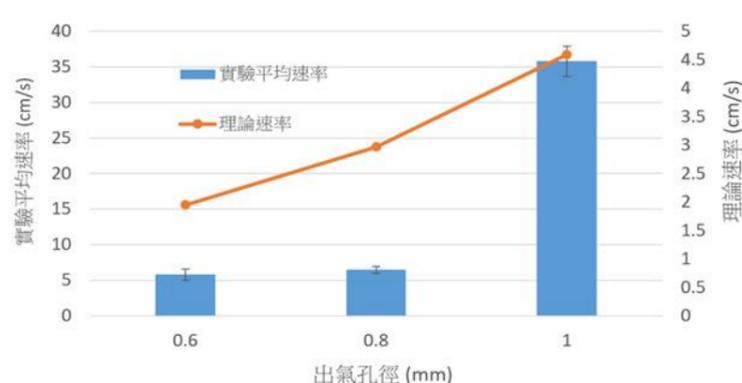


出氣孔孔徑與初出氣泡大小之關係



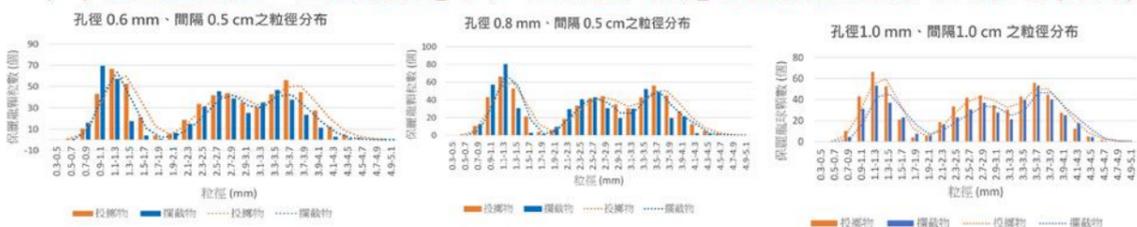
(二) 氣泡的動力分析

出氣孔徑與氣泡上升速率的關係

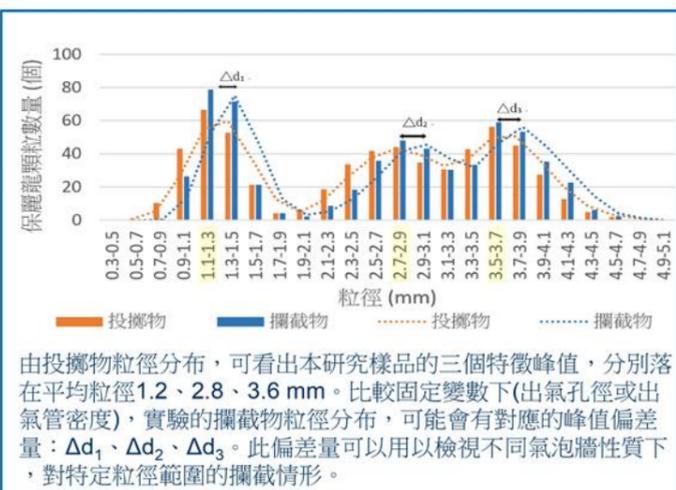
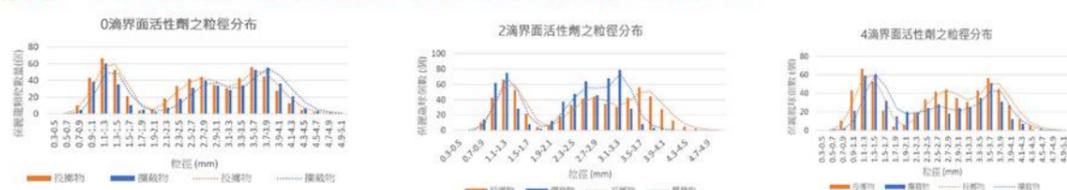


二、氣泡牆攔截裝置之實驗

(一) 改變出氣管「出氣孔徑」與「出氣孔間隔」對攔截粒徑分布的影響(節錄)



(二) 「介面活性劑溶液濃度」對攔截粒徑分布的影響



柒、討論

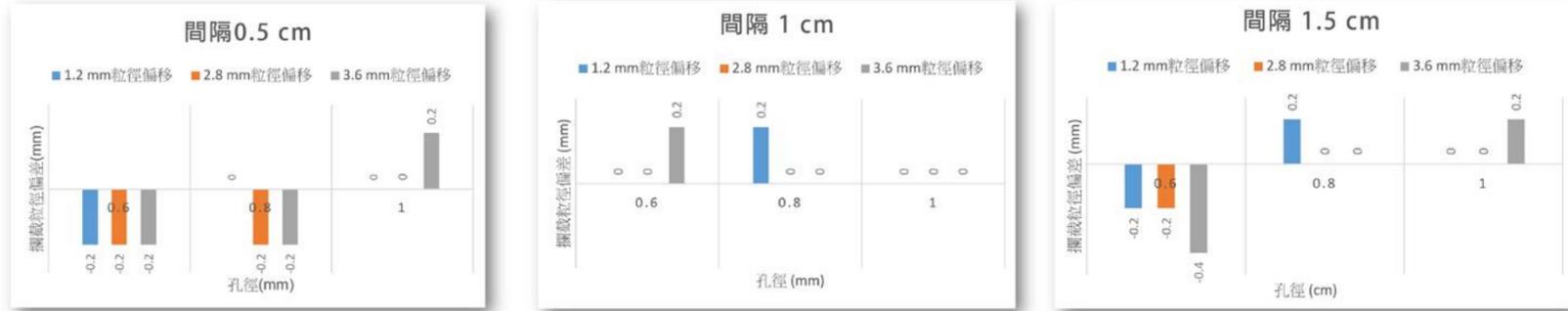
一、氣泡牆性質的探究

- (一) 出氣管孔徑愈小，形成的氣泡愈小，易碎裂成小氣泡團。
- (二) 出氣孔徑大小與氣泡上升速率呈正相關。兩者變化趨勢與理論預測符合。但實驗值為理論值的2~7倍，可能原因為產生氣泡過程非準靜態，而有系統性偏移。
- (三) 由右圖，氣泡牆位於氣泡管正上方，約5~6倍的出氣管寬(約10 cm)。因有限的實驗水道，部分區域產生小渦流。如在濾網前，約有5%的測試樣品因此無法被攔截。
- (四) 總結實驗：較小的出氣孔，在水流經過的截面上，會產生較緻密的氣泡幕，能有效阻攔經過氣泡管上方水域的微粒，並將之帶至濾網中。



二、氣泡牆攔截裝置之實驗

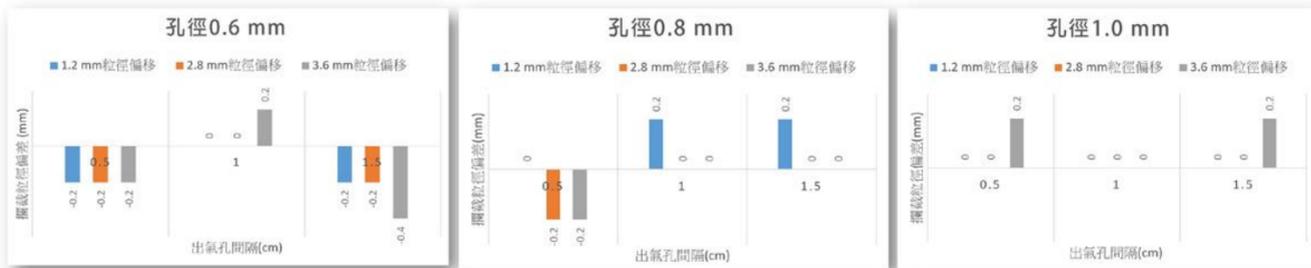
(一)「出氣管孔徑」與攔截粒徑的關係



1. 出氣孔間隔0.5 cm與1.5 cm時，出氣孔徑0.6 mm部分有明顯的負偏差，此表示產生的較小、較密的氣泡幕，能攔截較小粒徑的保麗龍微粒。
2. 在大間隔(1.0與1.5 cm)與大孔徑(0.8與1.0 mm)時，攔截粒徑有部分正偏差，但效果不明顯，尤其是在1.0 mm孔徑下，幾乎無明顯的偏差，暗示此參數的氣泡牆對攔截粒徑尺寸不具選擇性。
3. 未來若欲深入探討氣泡牆性質對攔截粒徑偏差的效應，應採取小於1.0 mm的出氣孔，才能觀察出對應的影響。

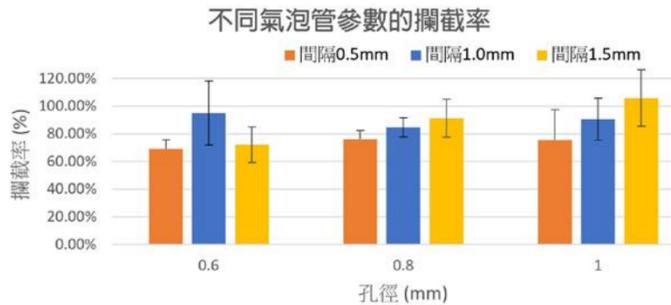
(二)「出氣管孔間隔(密度)」與攔截粒徑的關係

右圖為上段落的再整理，可以看出類似趨勢：間隔小的出氣孔產生較密的氣泡牆，偏向攔截液體中的較小微粒；相對的，間隔大的出氣孔產生之氣泡牆較鬆散，偏向攔截液體中的較大微粒。此效應，在孔徑1 mm時，並不明顯。



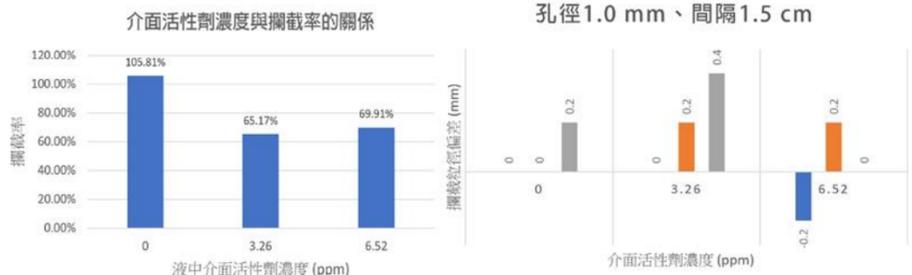
(三) 出氣管「出氣孔徑」與「出氣孔間隔」對攔截率的影響

1. 除了出氣管孔徑0.6 mm之外，攔截率隨著出氣孔間隔上升而變大，表示在此實驗設計下，較鬆散的氣泡幕造成的氣泡堆反而較能攔截水流表面大部分的保麗龍微粒。
2. 在單一間隔下(0.5 mm或1.0 mm)，孔徑大小與攔截率變化關係不明顯，但在間隔1.5 mm時，隨著孔徑變大，攔截率隨之上升，推測此應為本實驗由體積計算攔截率有關。
3. 整體攔截率皆在65%以上，表示氣泡牆能做為水中微粒的攔截手段，若能精準控制對應之產生氣泡參數，能提高攔截率至90%以上。

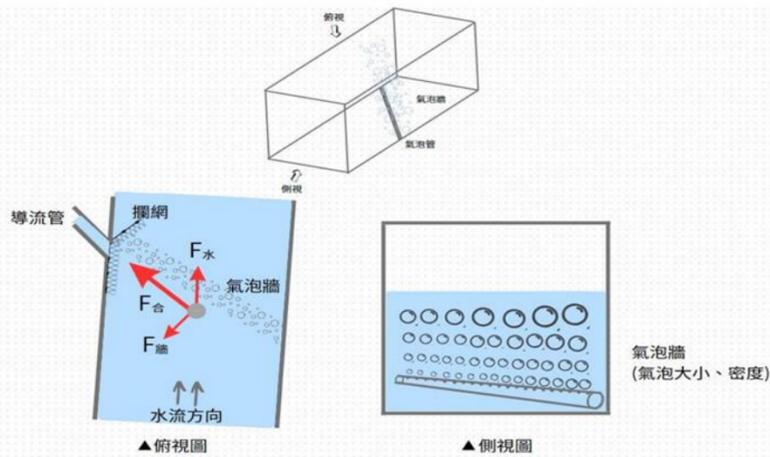


(四) 液中「介面活性劑濃度」與攔截粒徑、攔截率的關係

1. 隨濃度上升，攔截率漸升。表示產生之持久穩定的氣泡，能將水中微粒雜質導引至攔截網。
2. 若以濃度大於16.3 ppm的水溶液進行實驗，會產生過量的氣泡並堆積於濾網前，使得保麗龍微粒無法被攔截。
3. 在低濃度(3.26 ppm)時，攔截粒徑有明顯正偏差，表示因介面活性劑加入額外產生的泡沫，能攔截住較大粒徑的微粒，這可由實驗觀察到的大氣泡證實。然而，此趨勢在濃度上升後消失，粒徑偏差正負皆有，無特定偏向。



三、氣泡牆攔截水中微粒的機制探討



- (一) 在固定水流下，微粒同時受到水流推力 $F_{水}$ 與氣泡牆給予之正向力 $F_{牆}$ 作用，兩力之合為 $F_{合}$ ，若將攔截網放置於此，便可攔截住水中的雜質微粒。
- (二) 若將此裝置設置於淨水廠的濾水系統內，可於濾網後設置引流管，以減少濾網前渦流的產生。
- (三) 氣泡牆的設立，可以攔截水道中大部分的大型固體垃圾，而若想攔截小於5 mm的塑膠微粒，氣泡牆性質的調控就相對重要。
- (四) 因氣泡牆生成為連續動力過程，氣泡間也會互相干擾影響，使得氣泡牆的性質非線性變化。若後續能針對此問題更深入探究，將對攔截機制與塑膠微粒攔截系統的設計提供更深刻的想法。

四、氣泡攔截裝置運用於淨水廠的可能性

- (一) 自來水廠採用的淨水流程中，會利用過濾池做物理性的濾除與吸附性去除。粒徑大的粒子可直接透過濾網過濾。而當微粒粒徑太小時，可使其在多孔隙的濾床中移動，以產生靜電並附著在濾料上。[12] 一般使用的濾料為無煙煤與石英砂，有效過濾粒徑分別為1與0.5 mm。因淨水過程為間歇性的運作，有時濾床阻塞會導致過濾速率減慢與水頭損失，以至於需要進一步反沖洗，而這個循環的過程容易造成過濾材料的損失。[13]
- (二) 以氣泡牆作為去除水中雜質，因無涉及反沖洗過程，較能減少水頭損失。另外，可藉由動態改變氣泡牆的性質，包括氣泡的大小與密度來調控攔截微粒的粒徑範圍，此為固定濾料無法達到的優勢。以我們氣泡牆水箱的實驗設計，在30秒內濾水體積約11公升，攔截實驗的過濾速率為1.32 m³/hr，日後可藉由擴大氣泡管的長度達到更大的攔截速率。

捌、結論

- 一、此系統可實踐聯合國所發布的永續發展目標(SDGs)中的「提高全球水資源回收率與安全再利用率」與「預防及大幅減少各類型的海洋汙染」。
- 二、透過改變氣泡管的參數(孔徑及出氣孔間距)並探討其偏差值可得知：當出氣孔排列越緊密、孔徑愈小，可產出愈緻密的氣泡，提高小微粒的攔截率；反之，則可針對粒徑較大的微粒進行攔截。此趨勢在出氣孔徑1.0 mm以下較明顯，未來將以此為門檻標準，以進一步探討粒徑篩選的設計。
- 三、介面活性劑之濃度上升，攔截率漸升。顯示此能提升氣泡所具之引導與攔截能力。若比例調配適當，可幫助緻密氣泡生成以提升整體的攔截率。
- 四、本研究以保麗龍球開展實驗，但實際水道中的塑膠微粒可能散佈於整體水流中，因而水流截面的氣泡牆之連續變化更顯重要。不過氣泡牆的產生為連續動力過程，其性質並非線性變化。後續將深究此問題，以更了解氣泡牆攔截機制與改善微粒攔截系統的設計。
- 五、比較淨水廠現行過濾設施，本研究有二優勢：其一，現行濾床之阻塞問題需要倚仗反沖洗流程解決，其過程容易造成濾材耗損與水頭損失，而氣泡牆的系統無此問題。其二，藉由動態調整氣泡牆性質，包括氣泡的大小與密度來調控攔截微粒的粒徑範圍，使後續之淨水流程得以更加精密化，此為固定濾料無法達到的優勢。

玖、參考資料及其他

[1] The Great Bubble Barrier <https://thegreatbubblebarrier.com/>
[2] Laurent et al., 2017 Jun, Nature Communications, 8-15611
[3] Brahney et al., April 12, 2021, PNAS, Vol. 118 | No. 16
[4] Brown et al., May 2023, J Hazard Mater. Adv., Volume 10, 100309

[5] Zhang et al., 1 April 2021, Environmental Pollution, Volume 274, 116554
[6] Amato-Laurenco et al., 2021 Aug 15, J Hazard Mater., 416: 126124
[7] Leslie et al., May 2022, Environment International, Volume 163, 107199
[8] Antonio Ragusa et al., 2021 Jan, Environ Int., 146:106274

[9] Lucke et al., 2011 Nov, J Acoust Soc Am, 130, 3406-3412
[10] Christina benjaminsen, 2011, Nov. 1, Norwegian SciTech News
[11] Senay Boztas, 2022, August 5, The Guardian
[12] 淨水處理系統原理 <https://waterexam.hk.edu.tw/file/K060802/operating/1.pdf>
[13] 經濟部水利署，100年12月，公共給水現代化淨水操作監控及知識化資訊管理之示範建置計畫(3/3)