

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理與天文學科

051804

「蝕」破天驚~超聲波場中空蝕效應之破壞情形
分析

學校名稱：國立中央大學附屬中壢高級中學

作者： 高二 程貫恆 高二 蔡承圻 高二 簡敬倫	指導老師： 林欣達
---	------------------

關鍵詞：空蝕現象、超聲波、駐波

摘要

本實驗使用超聲波洗淨機為主體，將鋁箔紙放入腔內振盪，引起腔內液體產生空蝕現象並損壞鋁箔紙。我們使用分析軟體研究不同液體條件對鋁箔破壞的影響，以找出最佳清洗效果。

研究結果顯示，黏度越大的液體造成的破壞面積較小。這結果可以從 Brabec 和 Mornstein (2007) 的實驗中解釋，因為黏度增加會使空蝕閾值提高，也就是發生空蝕現象的條件變得更苛刻。溫度低下破壞程度較嚴重。

通過實驗和壓力感測器，我們發現超聲波在洗淨槽中以駐波形式產生空蝕現象，且破壞最嚴重的地方位於壓力變化最大的節點處。然而，由於超聲波洗淨機不是封閉系統且邊界條件複雜，無法精確推測表面情況。因此，我們希望透過建立數學模型來完善實驗。

壹、前言

一、研究動機

我們曾在閱讀東野圭吾的推理小說《偵探伽利略》中對犯人利用超音波技術行兇的過程感到不可思議，在我們認知中超音波在生活應用乃至生物上多用來定位，對於超音波於液體介質中竟然可以有這麼大的破壞力感到非常懷疑，在進一步了解相關資料後，我們發現如此強大的破壞力是由超音波的空蝕現象所造成的，於是我們決定利用實驗，觀察超音波產生空蝕現象的機制，以及使空蝕現象產生最大破壞力的條件。

二、研究目的

- (一) 鋁箔紙在超聲波空蝕場中破壞效應及規律
- (二) 分析空蝕現象於不同高度液體中之破壞情形
- (三) 分析空蝕現象於不同黏度液體中之破壞情形
- (四) 分析空蝕現象於不同溫度液體中之破壞情形
- (五) 利用壓力感測器量測洗淨槽中壓力與破壞情形之關係

三、文獻回顧

(一) 空蝕效應

當液體的壓力小於環境飽和蒸汽壓時，液體沸騰進而產生極小無液體的空間(氣泡或空穴)，當外界水壓力大於氣泡內部空氣壓力時，造成氣泡向內塌縮，進而產生向氣泡中心的射流對物體表面產生破壞，在 Liu, Y., & Peng, Y. (2021) 中的研究明確指出了氣泡於空蝕場中成長於破裂之情形，如圖 (一) 所示圖中 (a) 為氣泡於空蝕場中之破裂情形，(b) 為實驗擬合出的理論模型。

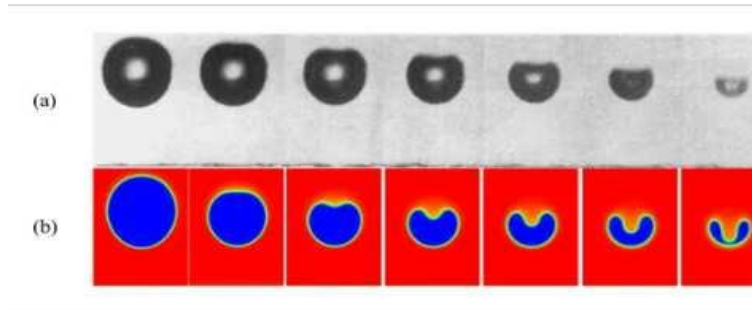


圖 (一) Liu, Y., & Peng, Y. (2021)

(二) Bjerknes force

Bjerknes force 為聲場中所受到的平移力，由聲波和傳遞路徑所放置的物體交互作用形成，在 Leighton, T. G., Walton, A. J., & Pickworth, M. J. W. (1990) 的研究結果中指出當氣泡的共振頻率 (Minnaert resonance) 大於聲學驅動頻率 (acoustic driving frequency) 時，氣泡會沿著壓力梯度上升，而當氣泡的共振頻率 (Minnaert resonance) 較小時，氣泡則會沿著壓力梯度向下傳播，而當氣泡處於駐波 (standing wave) 時，小氣泡會聚集於節點處，大氣泡聚集於腹點處。

(三) 動力粘度 (Viscosity)

黏度的定義為當液體受到剪應力時，流體剪應力和流體單位速度差的比值，在本次實驗利用旋轉式黏度計轉子測出溶液之黏度。

(四)透過應崇福在民國 79 年提出的論文我們得知超音波會受到介質影響而導致衰減的現象，如式(一)

$$\alpha = \frac{8\mu\pi^2 f_s^2}{3\rho c^3}$$

α 為衰減係數； μ 為黏滯係數； f_s 為頻率； ρ 為液體密度； c 為聲速

貳、研究設備與器材

一、實驗器材

編號	器材名稱	用途	圖示
1	鋁箔紙 (10*5 (cm))	觀測破壞情形	
2	15mm 長尾夾	夾於鋁箔下方當重物使用	
3	長桿	將鋁箔紙黏於此上	
4	雙面膠	黏貼鋁箔紙	
5	溫度計	量測溶液溫度	
6	超聲波洗淨機 (40KHz、60W)	產生空蝕效應	

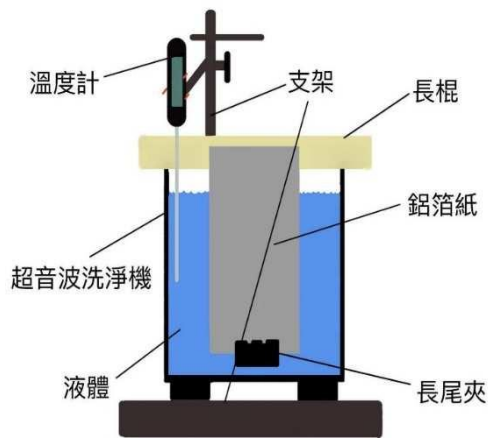
7	支架	固定溫度計、 放置超聲波洗淨機	
8	樹薯粉	增加水的黏度	
9	電子秤	量測水、樹薯粉重量	
10	量筒	藉由體積變化 測量樹薯粉溶液密度	
11	玻棒	攪拌溶液	
12	燒杯	盛裝容液	
13	加熱板	加熱樹薯粉溶液使其糊化	

14	旋轉式黏度計	量測溶液黏度	
15	自製充電線	供給電源給壓力感測器	
16	壓力感測器	感測出超音波洗淨積水中的壓力	
17	麵包板	連接電路	
18	Arduinio 板	將壓力感測器所計算出的數據傳回電腦	
19	杜邦線、電線	連接電路	
20	焊槍	解焊、焊接電路	

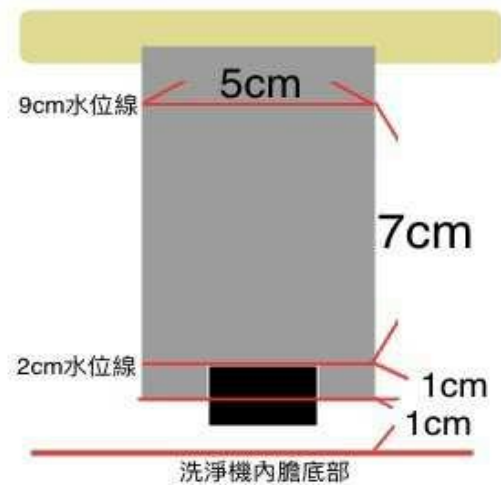
21	手機	拍攝鋁箔紙照片	
22	分析軟體:ImageJ	使用色相分析計算破壞面積	
23	分析軟體:Arduinio	利用程式碼將壓力測量	
24	分析軟體: PLX-DAQ-v2- PowerDemos	將 Arduinio 的數據匯入 Excel 繪製成圖	

二、實驗裝置

(一) 基本實驗架設



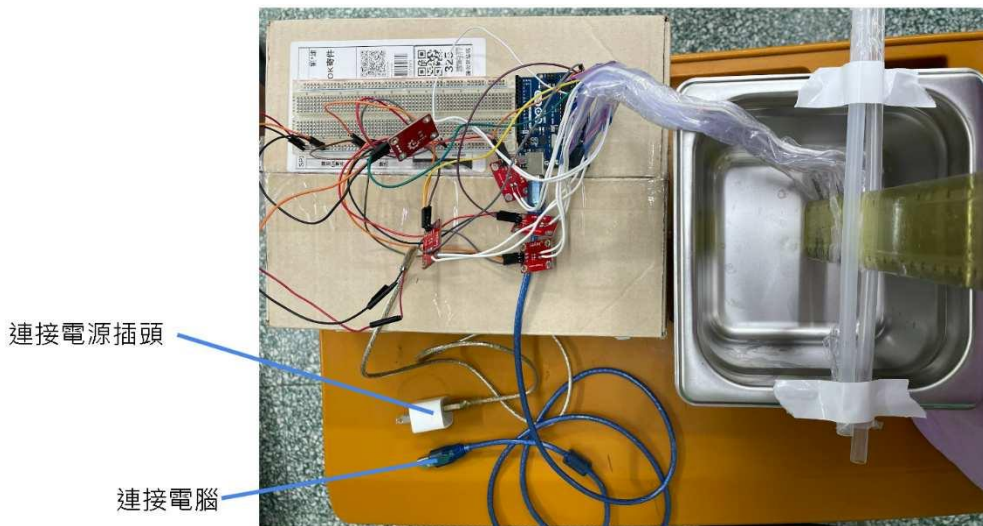
圖(二)



圖(三)

註: 2 cm 水位線至 9 cm 水位線為觀測範圍，面積共 $5 \times 7 = 35$ (cm²)

(二) 壓力感測實驗的架設



(三) 樹薯粉溶液表(溫度設定 35℃)

	水對樹薯粉重量比	動力黏度(mPa·S)
樹薯粉溶液 (a)	總重 2000 g (樹薯粉重:水重=1:40)	515.0
樹薯粉溶液 (b)	溶液(a)加 100 毫升的水	318.5
樹薯粉溶液 (c)	溶液(b)加 100 毫升的水	259.0
樹薯粉溶液 (d)	溶液(c)加 100 毫升的水	195.0
樹薯粉溶液 (e)	溶液(d)加 50 毫升的水	112.0

參、研究過程與方法

一、研究過程

(一) 鋁箔紙在超聲波空蝕場中破壞效應及規律

- 1.完成圖(二)、(三)的實驗架設
- 2.加入 RO 水至水深 9 cm
- 3.設定超音波洗淨機時間 100 秒，放入鋁箔紙，啟動超音波洗淨機
- 4.每 20 秒關閉超聲波洗淨機，取出鋁箔紙並取下長尾夾，拍照紀錄後再將鋁箔紙放回超聲波洗淨機中繼續洗淨（鋁箔紙在超聲波洗淨機中總共 100 秒）
- 6.將照片匯入 ImageJ，使用色相分析的功能分析破壞面積
- 7.準備一高黏度溶液及低黏度溶液進行步驟 2~4

(二) 分析空蝕現象於不同高度液體中之破壞情形

- 1.完成圖(二)、(三)的實驗架設
- 2.加入 RO 水至水深 9 cm
- 3.設定超音波洗淨機時間 30 秒，放入鋁箔紙，啟動超音波洗淨機
- 4.取出鋁箔紙並取下長尾夾，拍照紀錄
- 5.倒出原 RO 水，加 RO 水至水深 7.5 cm，進行步驟 2~3
- 6.倒出原 RO 水，加 RO 水至水深 6 cm，進行步驟 2~3

7.倒出原 RO 水，加 RO 水至水深 4 cm，進行步驟 2~3

8.分析組間破壞位置的差異

(三) 分析空蝕現象於不同黏度液體中之破壞情形

1.完成圖 (二)、(三) 的實驗架設

2.加入樹薯粉水溶液(a)至水深 9 cm

3.設定超音波洗淨機時間 100 秒，放入鋁箔紙，啟動超音波洗淨機

4.每 20 秒關閉超聲波洗淨機，取出鋁箔紙後取下長尾夾，拍照紀錄後再將鋁箔紙和長尾夾放回超聲波洗淨機中繼續洗淨 (鋁箔紙在超聲波洗淨機中總共 100 秒)

6.倒出原溶液，加入樹薯粉溶液 (b) 至水深 9 cm，進行步驟 3~4

7.倒出原溶液，加入樹薯粉溶液 (c) 至水深 9 cm，進行步驟 3~4

8.倒出原溶液，加入樹薯粉溶液 (d) 至水深 9 cm，進行步驟 3~4

9.倒出原溶液，加入樹薯粉溶液 (e) 至水深 9 cm，進行步驟 3~4

10.將所有照片匯入 ImageJ，使用色相分析的功能分析破壞面積

(四) 分析空蝕現象於不同溫度液體中之破壞情形

1.完成圖 (二)、(三) 的實驗架設

2.加入 50°C 的 RO 水至水深 9 cm

3.設定超音波洗淨機時間 100 秒，放入鋁箔紙，啟動超音波洗淨機

4.取出鋁箔紙後取下長尾夾，拍照紀錄

5.倒出 RO 水，加入 45 °C 的 RO 水至水深 9 cm，進行步驟 3~4

6.倒出 RO 水，加入 40 °C 的 RO 水，進行步驟 3~4

7.倒出 RO 水，加入 35 °C 的 RO 水，進行步驟 3~4

8.倒出 RO 水，加入 30 °C 的 RO 水，進行步驟 3~4

9.將所有照片匯入 ImageJ，使用色相分析的功能分析破壞面積

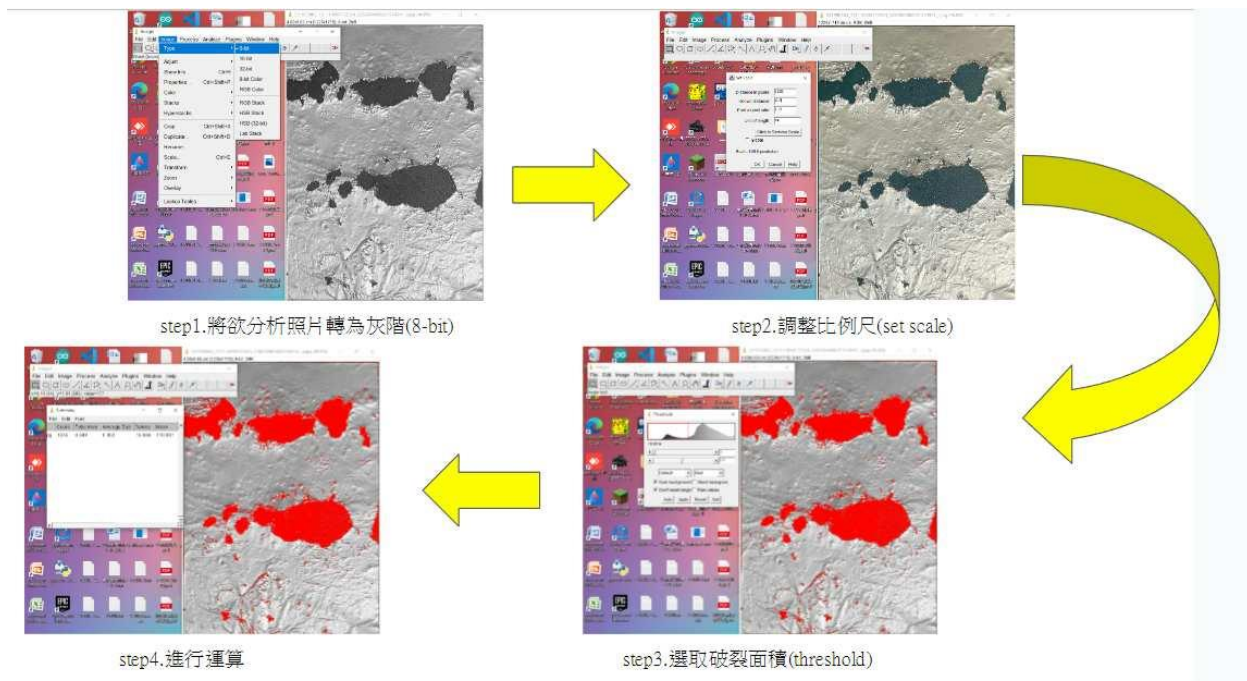
(五) 利用壓力感測器量測洗淨槽中壓力與破壞情形之關係

- 1.將壓力感測器做好防水處理後放入超音波洗淨機，分別固定在水下 1.25 cm 、2.5 cm 、3.75 cm 、5 cm 、6.25 cm 處
- 2.將壓力感測器連接 Arduino 版
- 3.開啟超音波洗精機，待其穩定
- 4.執行程式，將數據回傳至電腦
- 5.利用 PLX-DAQ-v2-PowerDemos 輸出至 Excel 繪製成圖

下圖為程式碼:

```
1 int fsrData;
2 const int fsrPin = A3;
3 void setup()
4 {
5   Serial.begin(9600);
6   Serial.println("CLEARDATA");
7   Serial.println("LABEL,TIMER,FSR,");
8 }
9 void loop()
10 {
11   fsrData = analogRead(fsrPin); // 將讀取到的數值轉為 0~1023 之間的數字
12   Serial.print("DATA, TIMER,");
13   Serial.println(fsrData);
14   delay(100);
15 }
```

二、分析軟體 ImageJ 的使用

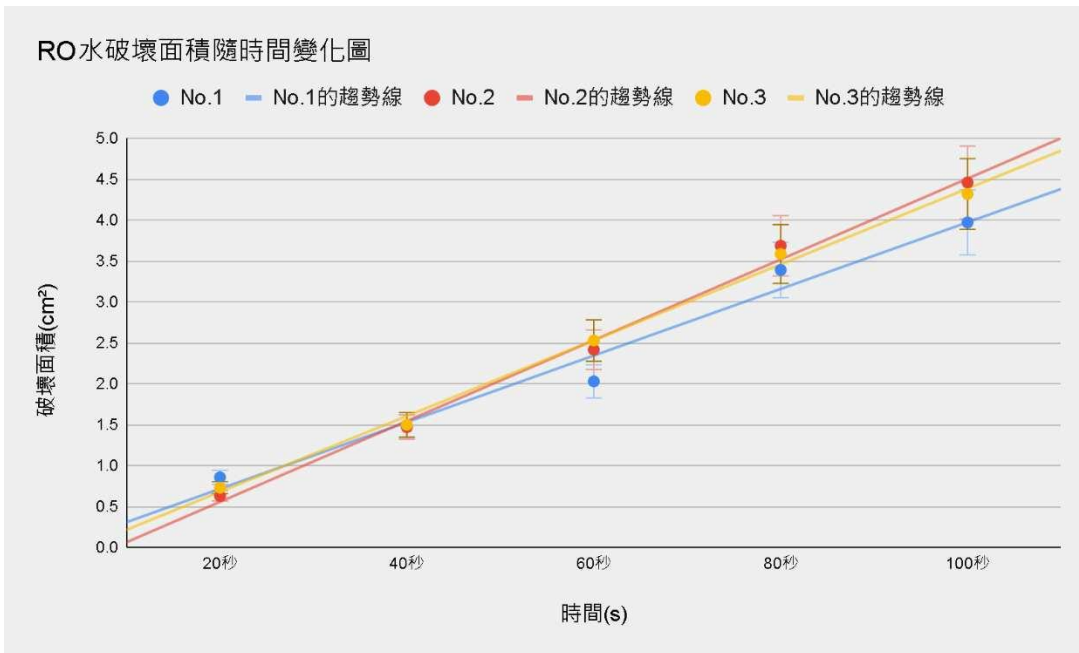


肆、研究結果

一、鋁箔紙在超聲波空蝕場中破壞效應及規律

(一) 鋁箔紙在 RO 水中的破壞面積隨時間變化圖

圖 (四)








	No.1	No.2	No.3
20 秒	0.859 cm ²	0.632 cm ²	0.732 cm ²
40 秒	1.477 cm ²	1.471 cm ²	1.5 cm ²
60 秒	2.031 cm ²	2.418 cm ²	2.53 cm ²
80 秒	3.392 cm ²	3.688 cm ²	3.588 cm ²
100 秒	3.973 cm ²	4.461 cm ²	4.321 cm ²

我們重覆了三次實驗 (No.1、2、3) 得出圖表，發現破壞面積與時間為正相關的關係。

(二) 鋁箔破壞照片

圖(五)


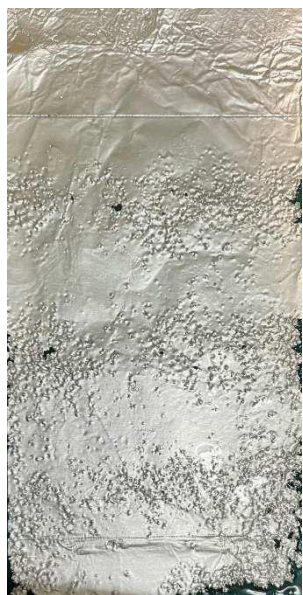
時間	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒	100 秒
照片					
破壞面積	0.859 (cm ²)	1.477 (cm ²)	2.031 (cm ²)	3.392 (cm ²)	3.973 (cm ²)

透過圖(五)發現破壞隨著初始破裂的形狀變大，而且有規律的三條破裂面分布在鋁箔上。

(三) 破壞位置的規律

當黏度升高時如圖(六)所示，對比兩個溶液在前 20 秒的破壞分布，會發現黏度太高時無法造成太嚴重的破壞，但是相較於水的破壞圖顯得更為平均分布。

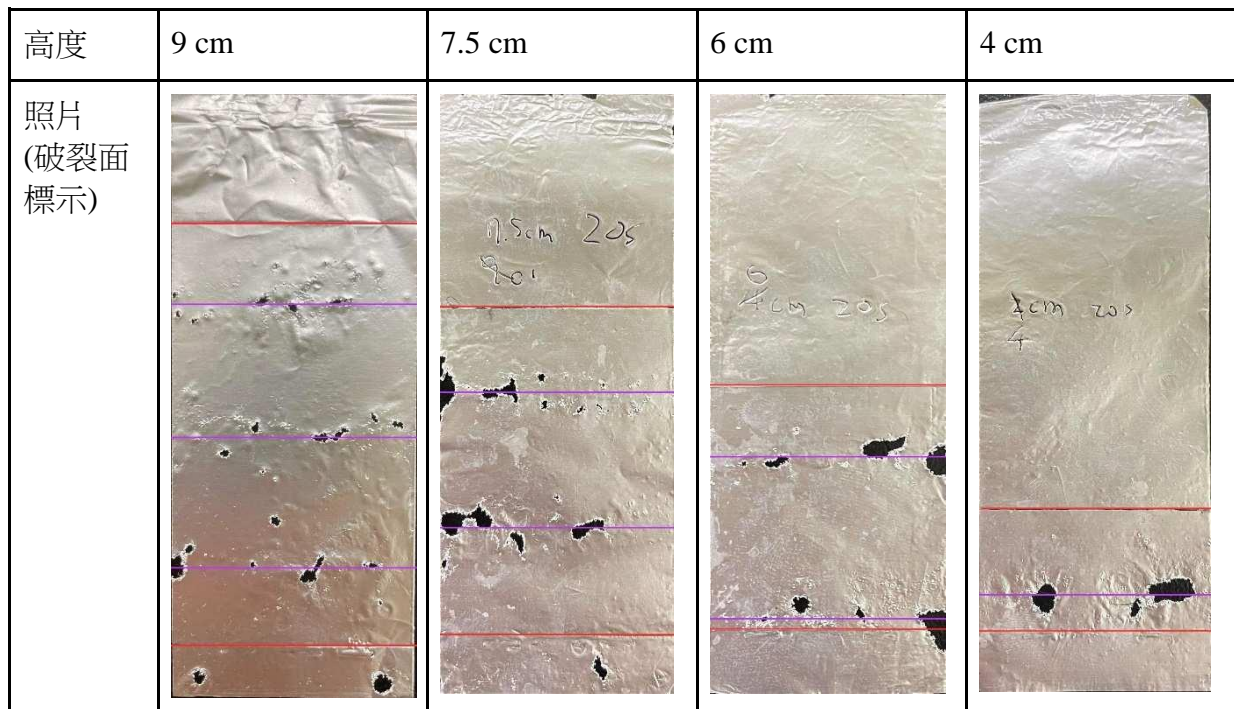
圖(六)

水	高黏度樹薯粉溶液
	

二、分析空蝕現象不同高度液體之破壞情形

(一) 鋁箔破壞照片 (上方線為最高水位線，下方線為 2 cm 水位線)

圖 (七)



從圖 (七) 發現水位會控制最嚴重破裂面的位置，當加入不同水位，會從水面下 1.25 cm 開始產生破裂，又有每隔近 2.5 cm 產生下個破裂面。

三、分析空蝕現象不同黏度液體之破壞情形

(一) 鋁箔紙破壞照片






1. 黏度 515 mPa·S

圖 (八)

時間	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒	100 秒
照片	趨近 0，量測值太小	趨近 0，量測值太小			
破壞面積	0	0	0.031 (cm ²)	0.083 (cm ²)	0.096 (cm ²)






2.黏度 318.5 mPa·S

圖(九)

時間	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒	100 秒
照片					
破壞面積	0.206 (cm ²)	0.242 (cm ²)	0.42 (cm ²)	0.647 (cm ²)	0.955 (cm ²)





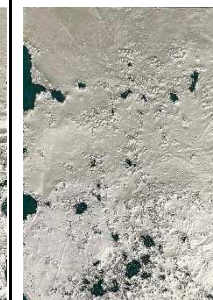
3.黏度 259 mPa·S

圖(十)

時間	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒	100 秒
照片					
破壞面積	0.146 (cm ²)	0.458 (cm ²)	0.939 (cm ²)	1.037 (cm ²)	2.725 (cm ²)






4.黏度 195 mPa·S

圖(十一)

時間	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒	100 秒
照片					
破壞面積	0.098 (cm ²)	0.411 (cm ²)	0.581 (cm ²)	1.351 (cm ²)	2.845 (cm ²)

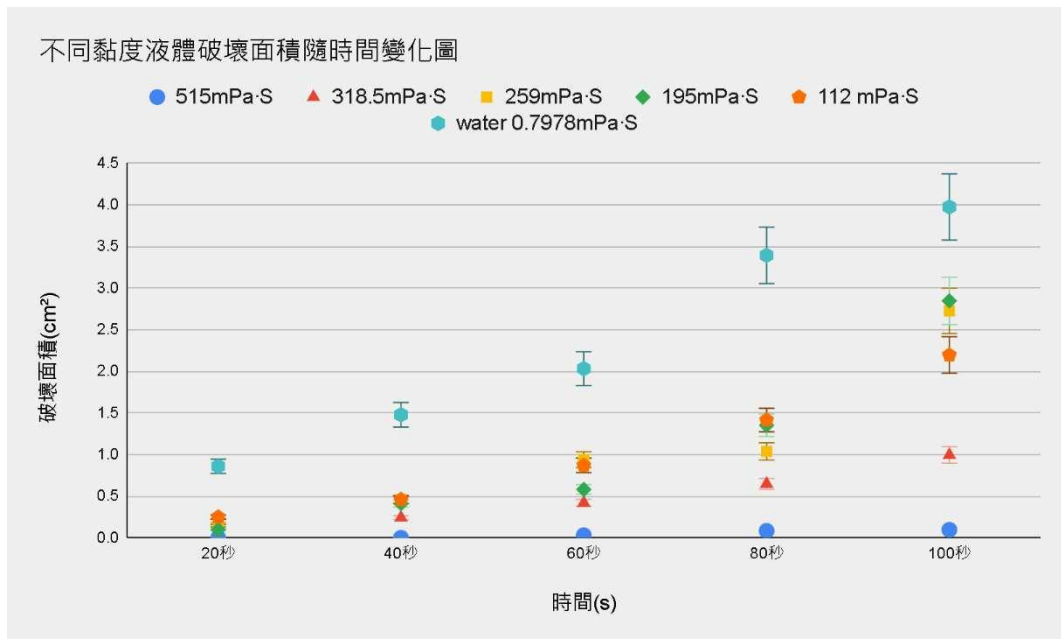
5.黏度 112 mPa·S

圖(十二)

時間	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒	100 秒
照片					
破壞面積	0.249 (cm ²)	0.459 (cm ²)	0.870 (cm ²)	1.414 (cm ²)	2.195 (cm ²)

(二) 不同黏度液體破壞面積隨時間變化圖

圖 (十三)



	515 mPa·S	318.5 mPa·S	259 mPa·S	195 mPa·S	112 mPa·S	water
20 秒	0	0.206 cm ²	0.146 cm ²	0.098 cm ²	0.249 cm ²	0.859 cm ²
40 秒	0	0.242 cm ²	0.458 cm ²	0.411 cm ²	0.459 cm ²	1.477 cm ²
60 秒	0.031 cm ²	0.42 cm ²	0.939 cm ²	0.581 cm ²	0.87 cm ²	2.031 cm ²
80 秒	0.083 cm ²	0.647 cm ²	1.037 cm ²	1.351 cm ²	1.414 cm ²	3.392 cm ²
100 秒	0.096 cm ²	0.995 cm ²	2.725 cm ²	2.845 cm ²	2.195 cm ²	3.973 cm ²

從圖 (十三) 可知黏度與破壞面積的關係大致呈現黏度越小破壞面積越大的趨勢。

(三) 不同黏度下破壞位置的分布情形

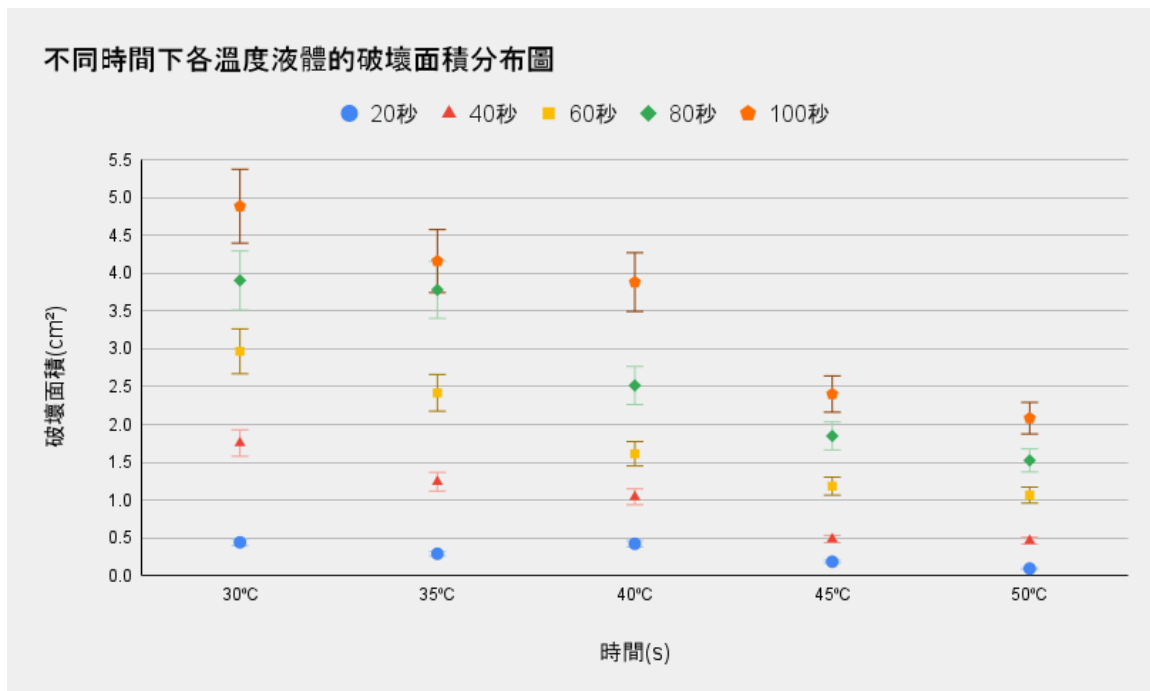
圖 (十四)



四、分析空蝕現象不同溫度液體之破壞情形

(一) 不同時間下各溫度液體的破壞面積分布圖

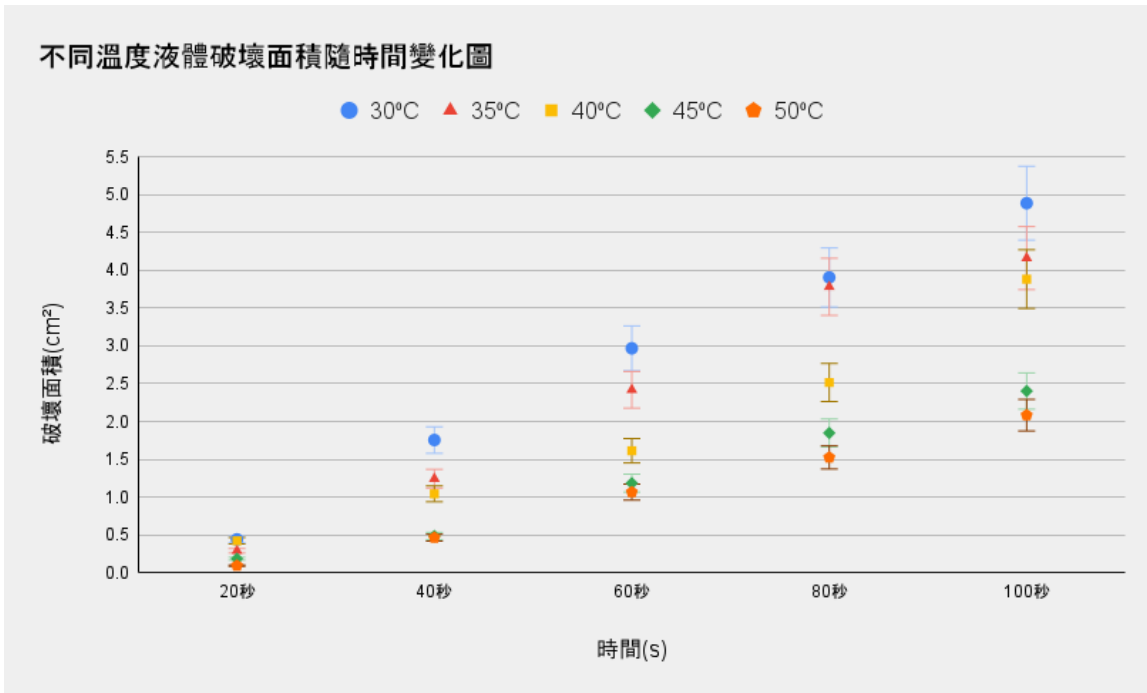
圖 (十五)



透過圖 (十五) 可知當溫度越高時破壞面積的增長幅度越小

(三) 不同溫度液體破壞面積隨時間變化圖

圖 (十六)



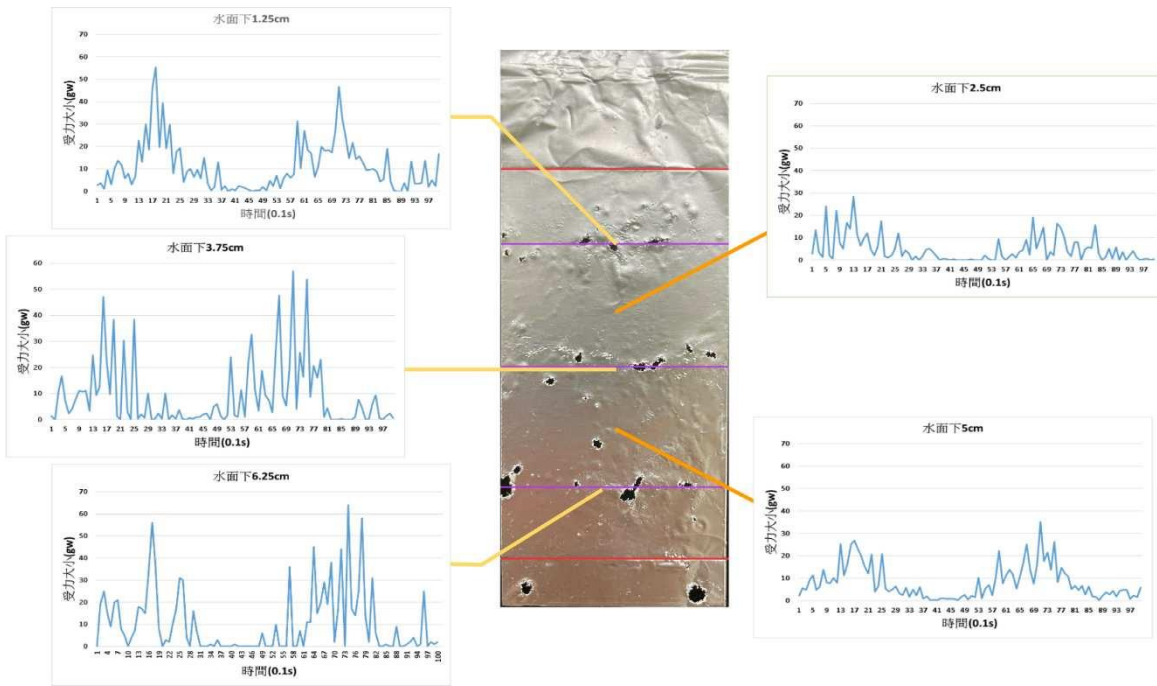
	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C
20 秒	0.441	0.29	0.422	0.185	0.094
40 秒	1.755	1.243	1.043	0.485	0.464
60 秒	2.968	2.419	1.612	1.184	1.066
80 秒	3.906	3.782	2.516	1.848	1.525
100 秒	4.888	4.162	3.883	2.403	2.084

從圖 (十六) 發現當溫度越高總破壞面積越小

五、利用壓力感測器量測洗淨槽中壓力與破壞情形之關係

(一) 水下不同位置的壓力隨時間變化圖(水下 1.25 cm 、 2.5 cm 、 3.75 cm 、 5 cm 、 6.25 cm)

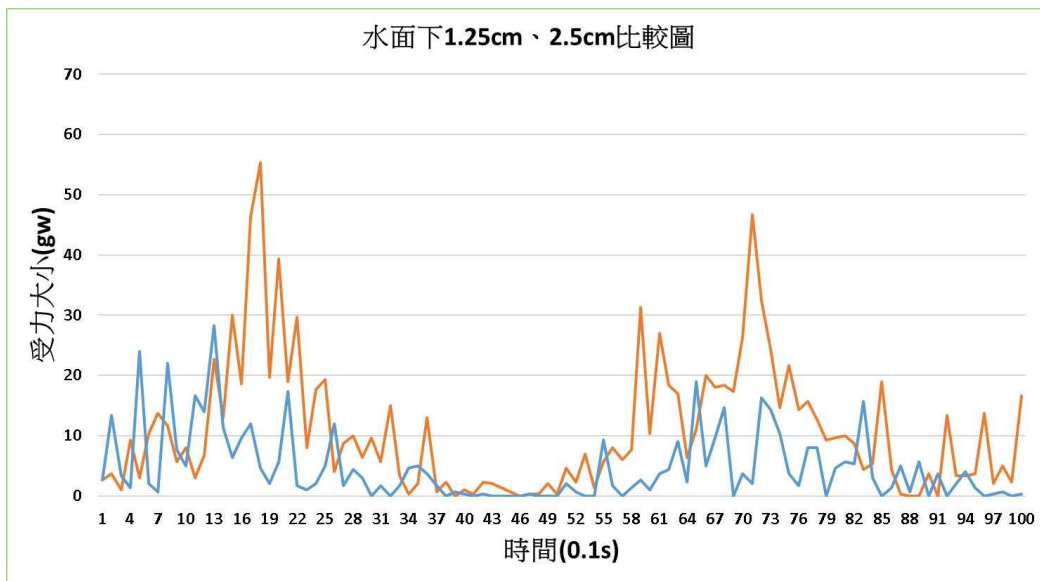
圖 (十七)



透過將壓力感測器得到的數值從 Arduino 透過 PLX-DAQ-v2-PowerDemos 輸出至 Excel 繪製受力隨時間的變化圖，因為感測器受力表面積固定故可以將圖表中的力視為壓力。

(二) 水面下 1.25 cm 、 2.5 cm 比較圖

圖 (十八)



透過水面下 1.25 cm 和 2.5 cm 的壓力比較可以發現破裂面的壓力會較破裂面之間來得更大

伍、討論

一、鋁箔紙在超聲波空蝕場中破壞效應及規律

在鋁箔紙置於 RO 水隨時間破壞的面積如圖 (四) 所示，我們經過多次實驗發現鋁箔紙上的破裂位置會有規律的分布，其位置基本上集中成一條一條的破裂線，相鄰破裂線の間距大約為 2.5 cm，我們認為是超聲波在槽中形成駐波，氣泡在壓力不斷變化的節點處生成並破裂，當節點壓力最低時，低於飽和蒸汽壓時使液體產生氣泡，而隨後當節點到達壓力最大值時，當外圍環境壓力大於氣泡壓力內部時，造成了空蝕效應，使得鋁箔紙發上破裂。在 Mitome, H. (2003, September). Action of ultrasound on particles and cavitation bubbles. In *Proc. World Congress on Ultrasonics, Paris* (Vol. 2342). 中說明駐波場中導致氣泡移動的作用力稱為 Bjerknes force，導致氣泡分別聚集於腹點和節點。但於本實驗並未發現腹點處有明顯的破壞情形，我們認為這種現象跟氣泡表面附著的傾向有很大的關係，在 Zhou, S., Bu, X., Wang, X., Ni, C., Ma, G., Sun, Y., ... & Chelgani, S. C. (2022). 提到氣泡傾向於附著在粗糙的表面，因此一旦節點處大量氣泡破裂產生破洞時，相較於光滑的平面，氣泡更傾向於聚集在更為粗糙的破洞，導致節點處越來越嚴重，只有少量氣泡移動到腹點處。但如圖 (六) 在黏度較高的液體中雖然還是出現了三條破裂面的現象，但是破壞的痕跡相較於在水中的分布更為平均。物體放在不同位置所造成的破壞效果也不盡然相同，可能在位置的擺放有些許誤差導致同樣的實驗兩次結果差異過大。

本次實驗中使用鋁箔紙的主因是其較薄且方便觀察，但同時一旦破裂面過大導致鋁箔紙部分歪斜，破壞面積會更加嚴重。

未來希望能透過物理建模研究三維駐波模型在不同位置的破壞情形，並且找出黏度與氣泡分布位置的關係，同時也希望將波速變化的比例與波長變化的比例量化，進而更有信心地確立駐波模型。

二、分析空蝕現象在不同高度液體之破壞情形

如圖(八)所示，為了研究超聲波於聲場中的駐波效應，我們試者改變不同液面的高度觀察是否會有差異，結果發現線與線之間的距離沒有改變，且最上面的破裂線距離水面的高度也沒有改變，依照鋁箔紙上破裂的痕跡，能推測出破裂面為節點，進一步證明超聲波在槽中為駐波形式傳遞，以下是我們推測此駐波的波形(如下圖)

高度	9 cm	7.5 cm	6 cm	4.5 cm
照片 (駐波推測)				

三、分析空蝕現象不同黏度液體之破壞情形

如圖(十三)所示，我們發現不同黏度的液體在 0 到 60 秒時，破壞的面積差異並不大，但在 80 到 100 秒的區間時，不同黏度的液體破壞面積差異開始變大，根據圖(十三)可發現當黏度越小時，破壞面積隨時間增長的幅度越大，這樣的實驗結果和 Saleh, B., Ezz El-Deen, A., & Ahmed, S. M. (2011)中研究不同黏度液體中質量因空蝕效應所損失情形的結論符合。由 Brabec, K., & Mornstein, V. (2007)的實驗中可知空蝕閾值 (cavitation threshold intensity) 的強度隨著黏度越來越大而上升，當閾值越低時，越容易發生空蝕效應，反之閾值越高，發生空蝕效應條件相對苛刻。當我們認為黏度越高的環境時不利於氣泡的成長，導致前面 0 到 40 秒時破壞面積幾乎為 0，在於氣泡於高黏度的液體時尺度較小，導致破壞所產生的射流強度較弱，透過圖(八)、圖(十二)在第 60 秒時，在黏度的對比中，我們發現氣泡產生的密集程度在高黏度中相較於低黏度更低，同時從鋁箔紙上氣泡破壞的痕跡驗證 Brabec, K., & Mornstein, V. (2007)空蝕閾值強度 (cavitation threshold intensity) 和黏度關係的正確性。

在黏度為 515mPa·S 時，我們發現如圖(八) 氣泡多集中於下方，從實驗二結果可推論超聲波於槽中應為駐波的形式，由式(1)可知當黏度越高時超聲波強度的衰減程度越大，會導致超聲波無法傳遞至液體表面，只能在下方產生空蝕效應，導致上方的氣泡數極少。如圖(十

四) 可以觀察到水和高黏度樹薯粉溶液 (黏度 195 mPa·S) 破壞的分布有差異性，可以觀察到在高黏度樹薯粉溶液破壞的位置多位於下半部，而水卻明顯的呈現三條破裂面的規律分布，在應崇福，超聲學，科學出版社，民國 79 年提到黏滯係數越大會導致振幅衰減程度越大，但並未明確指出衰減係數和振幅的關係。圖 (十四) 驗證了黏度越大的液體使振幅衰減導致波傳遞至上半部分時因為振幅衰減而破壞減弱，水則因為振幅幾乎沒衰減而呈現規律的三條破裂面。

如圖 (十一)、(十二) 中，我們發現 112 mPa·S 的液體比黏度 195 mPa·S 的面積來得小，我們推測跟鋁箔紙初始氣泡的面積有關，如圖 (五) 我們發現氣泡會沿著破裂面持續破壞的特性，從圖 (十一)、(十二) 可以看出來黏度為 112 mPa·S 時在第 40 秒時破洞的面積較為分散，而在黏度為 195 mPa·S 時破洞面積較為密集，我們觀察到當相鄰的破洞離得越近，兩個破洞會傾向於結合並形成更大的洞，所以當起始破洞面積越集中時，有可能造成大面積破壞，導致高黏度液體破壞面積大於低黏度液體。

我們希望未來能透過統計的方式研究出氣泡於鋁箔紙上破壞的分布機率，增加我們在不同黏度的液體中破壞的準確度，同時希望可以測量不同黏度液體中超聲波衰減幅度，進而驗證式 (一) 的正確性。

四、分析空蝕現象不同溫度液體之破壞情形

我們發現當溫度下降時，破壞的面積有越來越大的趨勢如圖 (十六) 且隨著溫度越高破壞面積的幅度逐漸變小如圖 (十五)，我們認為可能的原因是在溫度較高的液體中，蒸發速率較快，其中液體分子吸收液體和空蝕所產生氣泡中氣體的热量轉換為氣體分子，而高溫時因為蒸發量較多導致氣泡內部氣體溫度的下降量增加，最終造成氣泡內壓力降低，使破壞力減弱，而這項結論跟 Kim, J., & Song, S. J. (2016). Measurement of temperature effects on cavitation in a turbopump inducer. *Journal of Fluids Engineering*, 138(1)的實驗結果相符合。

在進行溫度實驗時，我們於每個數據點分別測量了五次，但其中少部分的數據差異過大，我們認為跟初始破壞面積有關，希望透過統計的方式能修正誤差，並刪去可信度較低的數據。

五、利用壓力感測器量測洗淨槽中壓力與破壞情形之關係

我們利用壓力感測器量測鋁箔紙的破裂面之間的壓力，如圖 (十七) 和圖 (十八) 我們發現在破裂面的壓力會較破裂面間的位置來得更大，可以得知壓力強度和破壞程度有著正相關的

關係也進一步驗證了破裂面為節點的推測，並且我們發現了五個感測器的壓力有著規律性的變化如圖(十七)，我們認為這是因為超聲波於槽中形成駐波所造成的結果。

陸、結論

在黏度高的液體時空蝕效應會因為不易形成氣泡而不明顯，在溫度高的水中也有同樣的現象，但其中若環境條件未有太大的差異，氣泡初始出現於鋁箔紙上的機率分布，有可能會影響實驗的結果，例如出現黏度高的液體破壞面積大於黏度小的狀況。藉由不同的實驗，我們認為超聲波在洗淨槽中應呈現駐波的型態。在清洗不同物品甚至於精密電子元件時，有時候會希望降低或是提高空蝕強度，來達到最好的洗淨效果，如果想使洗淨程度降低，避免清洗物體的破壞，可以選擇黏度高的清洗液，或是提高液體的溫度；又或者若想提高洗淨程度，可改變被清洗的物體所放置的高度，以增加洗淨程度。

柒、參考文獻資料

- 一、應崇福，超聲學，科學出版社，民國 79 年
- 二、Chahine, G. L., Kapahi, A., Choi, J. K., & Hsiao, C. T. (2016). Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse. *Ultrasonics sonochemistry*, 29, 528-549..
- 三、Liu, Y., & Peng, Y. (2021). Study on the collapse process of cavitation bubbles including heat transfer by lattice Boltzmann method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 219
- 四、Brabec, K., & Mornstein, V. (2007). Detection of ultrasonic cavitation based on low-frequency analysis of acoustic signal. *Central European Journal of Biology*, 2, 213-221.
- 五、Mitome, H. (2003, September). Action of ultrasound on particles and cavitation bubbles. In *Proc. World Congress on Ultrasonics, Paris* (Vol. 2342).
- 六、Saleh, B., Ezz El-Deen, A., & Ahmed, S. M. (2011). Effect of liquid viscosity on cavitation damage based on analysis of erosion particles. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 39(2), 327-336.
- 七、Zhou, S., Bu, X., Wang, X., Ni, C., Ma, G., Sun, Y., ... & Chelgani, S. C. (2022). Effects of surface roughness on the hydrophilic particles-air bubble attachment. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 3884-3893.
- 八、Kim, J., & Song, S. J. (2016). Measurement of temperature effects on cavitation in a turbopump inducer. *Journal of Fluids Engineering*, 138(1).

【評語】 051804

此研究使用超聲波洗淨機，探討了空蝕現象對鋁箔紙的破壞情形，並分析了不同液體條件對破壞的影響。相較於過去相似的實驗，作者發現鋁箔紙遭破壞的位置有規律，因而猜測超聲波在洗淨槽中以駐波形式產生空蝕現象。此發現相當有趣，但由於鋁箔紙或許需要較強的破壞力才能造成破損，建議作者可進一步使用不同材質試驗，或其他方式更完整的驗證駐波模型。

作品海報

「蝕」破天驚~超聲波場中空蝕效應之破壞情形分析

摘要

本實驗使用超聲波洗淨機為主體，將鋁箔紙放入超音波洗淨槽中進行振盪，引起腔內液體產生空蝕現象並破壞鋁箔紙。再利用分析軟體研究不同液體條件對鋁箔紙破壞程度的影響，以找出最佳清洗效果。

研究結果顯示，黏度越大的液體造成的破壞面積較小。這項結果可以從Brabec和Mornstein（2007）的實驗中解釋，因為黏度增加會使空蝕閾值提高，也就是發生空蝕現象的條件變得更苛刻。此外，我們也發現在溫度高的環境下也會使破壞程度較不嚴重。

另外，我們利用壓力感測器進行超音波洗淨槽中的壓力分佈測試，我們發現超聲波在洗淨槽中以駐波形式產生空蝕現象，且破壞最嚴重的地方位於壓力變化最大的節點處。然而，由於超聲波洗淨機並非封閉系統且其邊界條件複雜，無法精確推測表面情況。因此，我們希望在為未來能夠透過建立數學模型來使實驗更為完善。

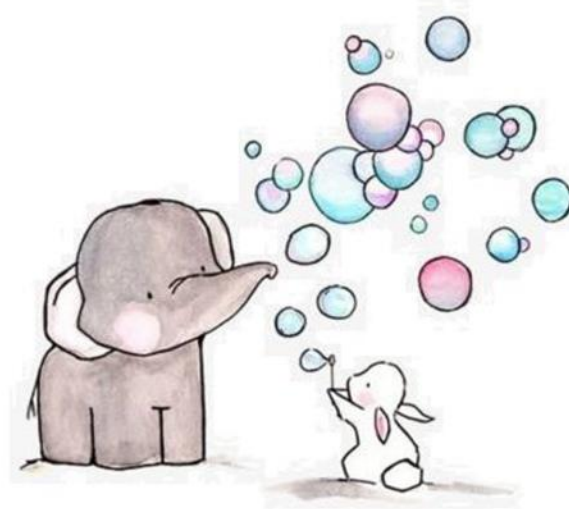
前言

一、研究動機

我們曾在閱讀東野圭吾的推理小說《偵探伽利略》中對犯人利用超音波技術行兇的過程感到不可思議，在我們認知中超音波在生活應用乃至生物上多用來定位，對於超音波於液體介質中竟然可以有這麼大的破壞力感到非常懷疑，在進一步了解相關資料後，我們發現如此強大的破壞力是由超音波的空蝕現象所造成的，於是我們決定嘗試利用實驗，觀察超音波產生空蝕現象的機制，以及使空蝕現象產生最大破壞力的條件。

二、研究目的

- (一) 鋁箔紙在超聲波空蝕場中破壞效應及規律
- (二) 分析空蝕現象於不同高度液體中之破壞情形
- (三) 分析空蝕現象於不同黏度液體中之破壞情形
- (四) 分析空蝕現象於不同溫度液體中之破壞情形
- (五) 利用壓力感測器量測洗淨槽中壓力與破壞情形之關係

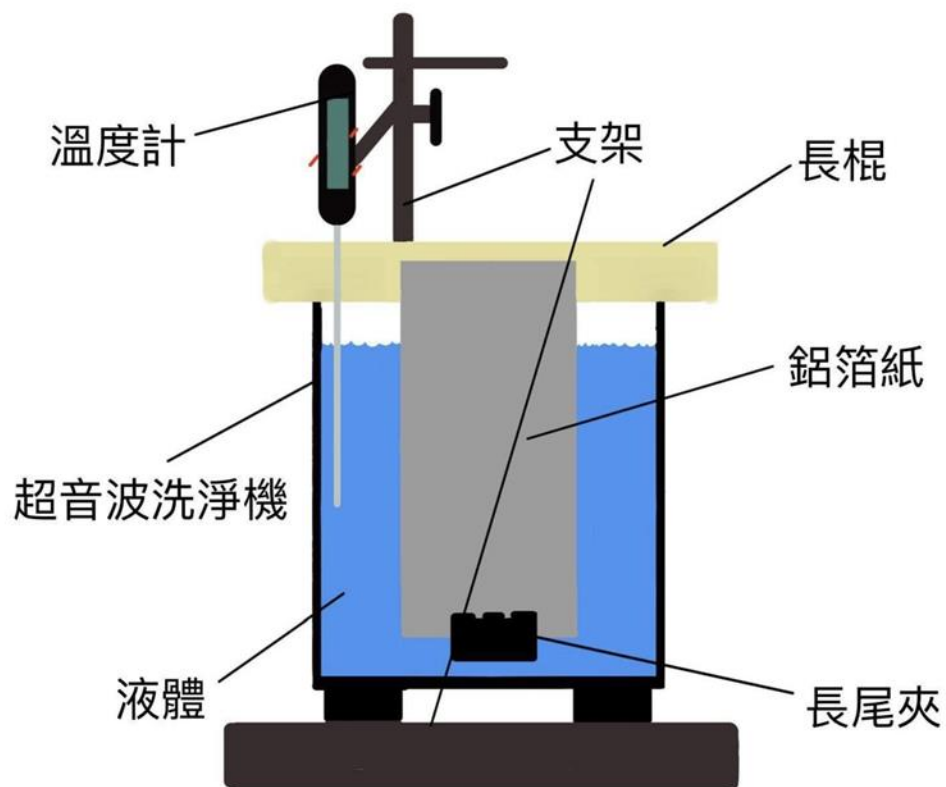


研究設備與器材

一、實驗器材

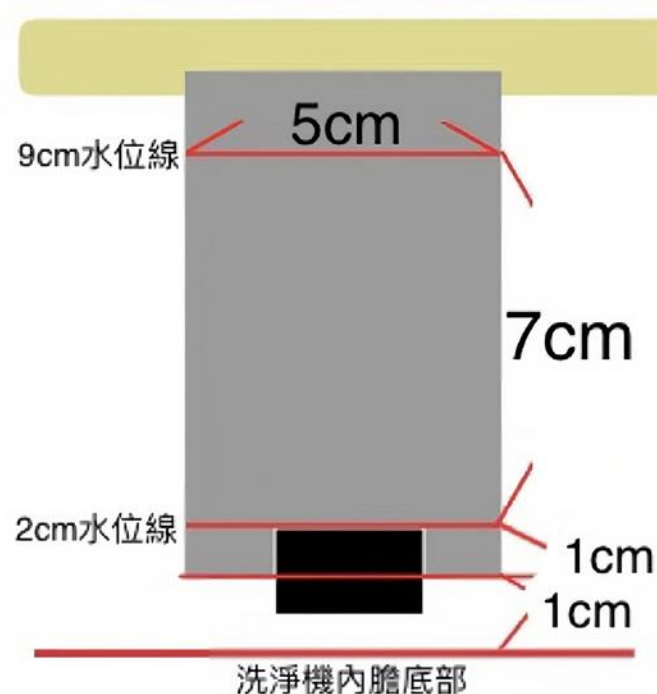
鋁箔紙(10*5(cm²))、15mm長尾夾、長桿、雙面膠、溫度計、超聲波洗淨機(40KHz、60W)、支架、樹薯粉、電子秤、量筒、玻棒、燒杯、加熱板、旋轉式黏度計、自製充電線、壓力感測器、麵包板、Arduinio板、杜邦線、電線、焊槍、手機、分析軟體: ImageJ、Arduinio、PLX-DAQ-v2-PowerDemos

二、實驗裝置



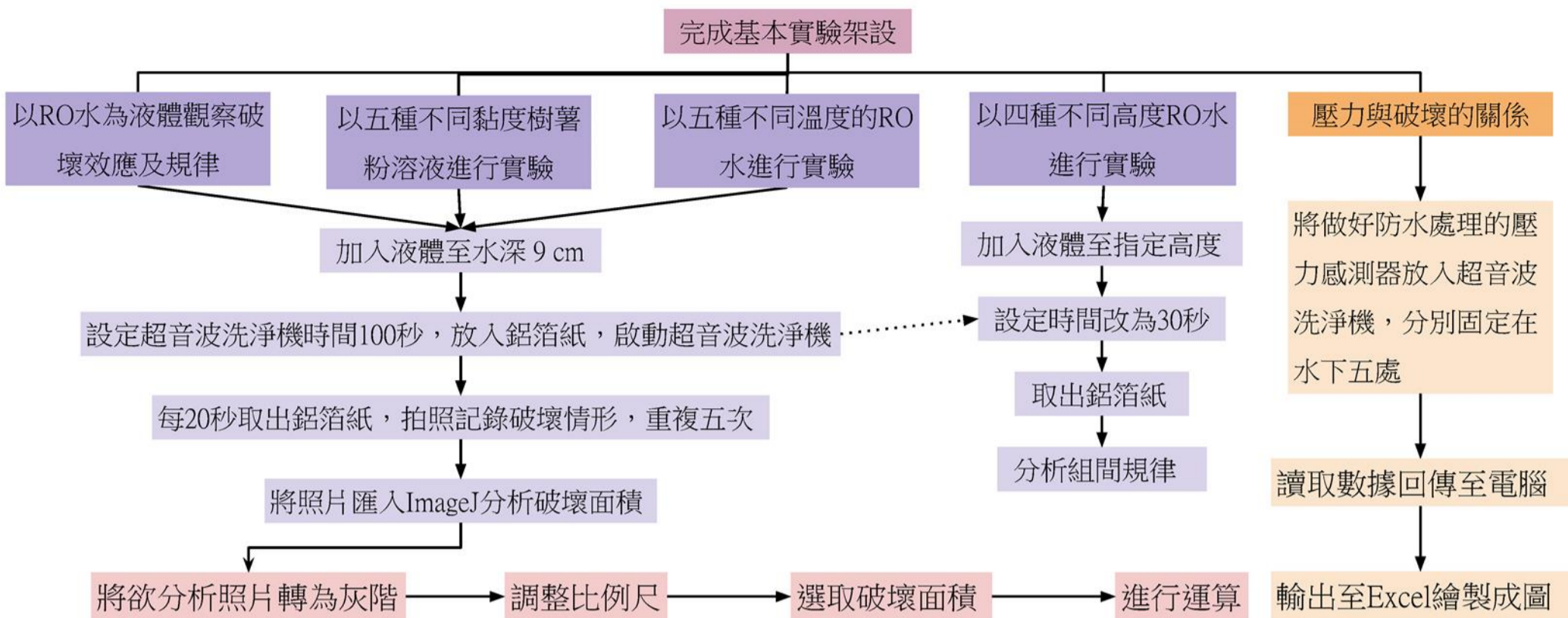
圖(一)

註:2cm水位線至9cm水位線為觀測範圍，面積共5×7=35 (cm²)



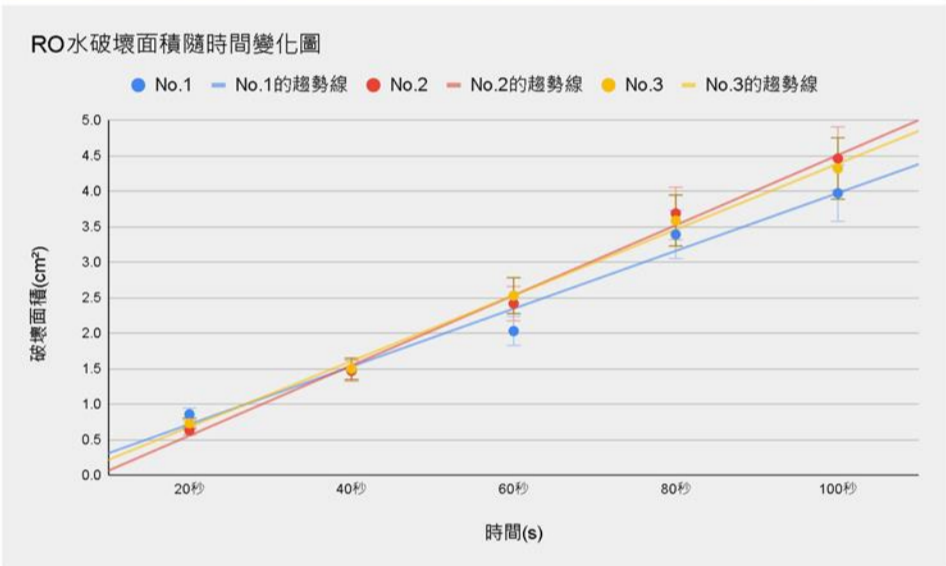
圖(二)

研究過程與方法



研究結果與討論

一、鋁箔紙在超聲波空蝕場中破壞效應及規律 圖(三)



我們重覆了三次實驗 (No.1、2、3) 得出圖表，發現破壞面積與時間有著正相關的關係。

圖(四)

時間	20秒	40秒	60秒	80秒	100秒
照片					
破壞面積	0.859 (cm²)	1.477 (cm²)	2.031 (cm²)	3.392 (cm²)	3.973 (cm²)

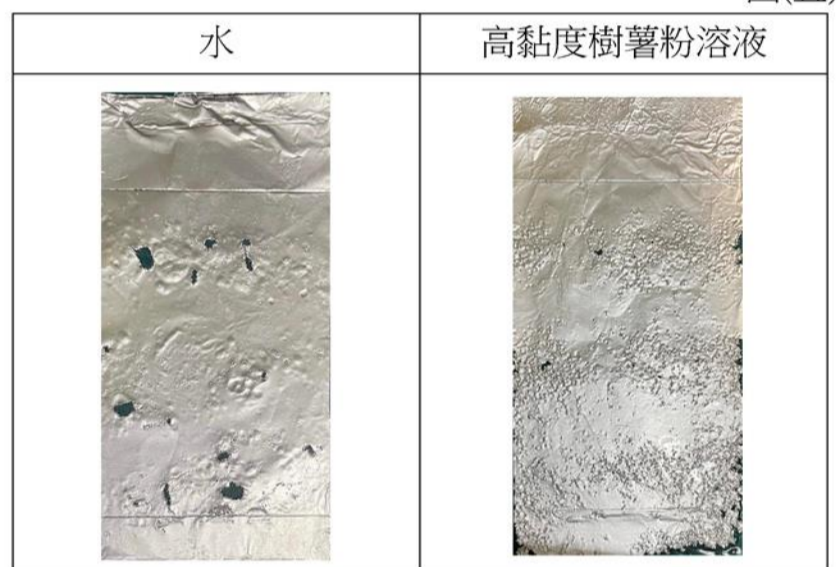
透過圖(四)發現破壞隨著初始破裂的面積變大，而且有規律的三條破裂面分布在鋁箔上。

二、分析空蝕現象不同高度液體中之破壞情形 圖(六)

高度	9 cm	7.5 cm	6 cm	4 cm
照片 (破裂面標示)				

從圖(六)發現水位會影響最嚴重破裂面的位置，當加入至不同水位，會從水面下1.25 cm處開始產生破裂，之後每隔約2.5 cm會產生下個破裂面。

圖(五)



圖(五)對比兩個溶液的破壞分布，黏度升高時無法造成嚴重破壞，但是破壞更為平均分布

超聲波槽中形成駐波，而當節點壓力最低並且低於飽和蒸汽壓時，會使液體產生氣泡；而當節點到達壓力最大值時，外圍的環境壓力大於氣泡壓力內部，造成了空蝕效應，使得鋁箔紙產生破裂。

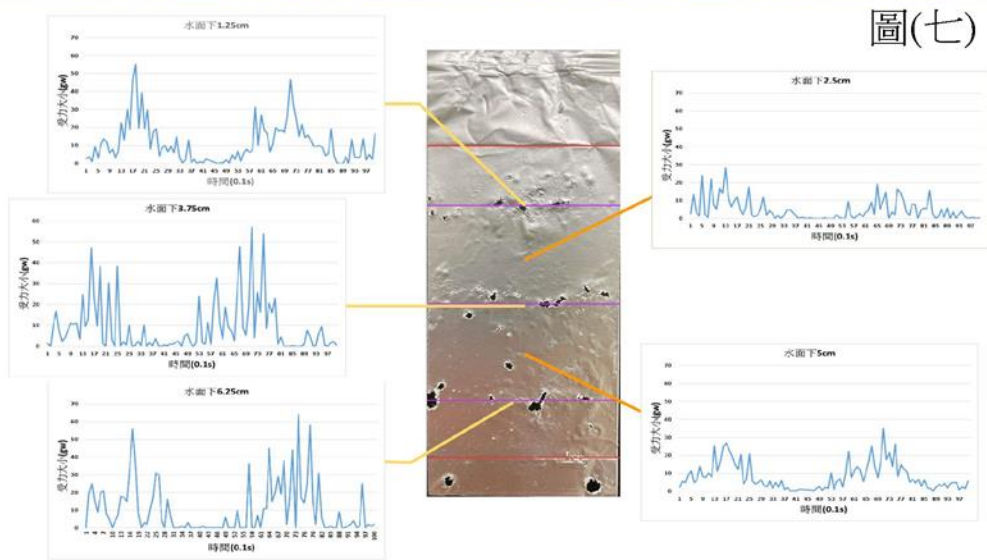
我們觀察到**氣泡傾向於附著在粗糙的表面**，因此一旦節點處產生的大量氣泡破裂產生破洞時，相較於光滑的平面，氣泡更傾向於聚集在更為粗糙的破洞，導致節點處破壞越來越嚴重，只有少量的氣泡移動到腹點處。

黏度較高的液體中雖然還是有形成三條破裂面，但是破壞的痕跡相較於水的分布更為平均。

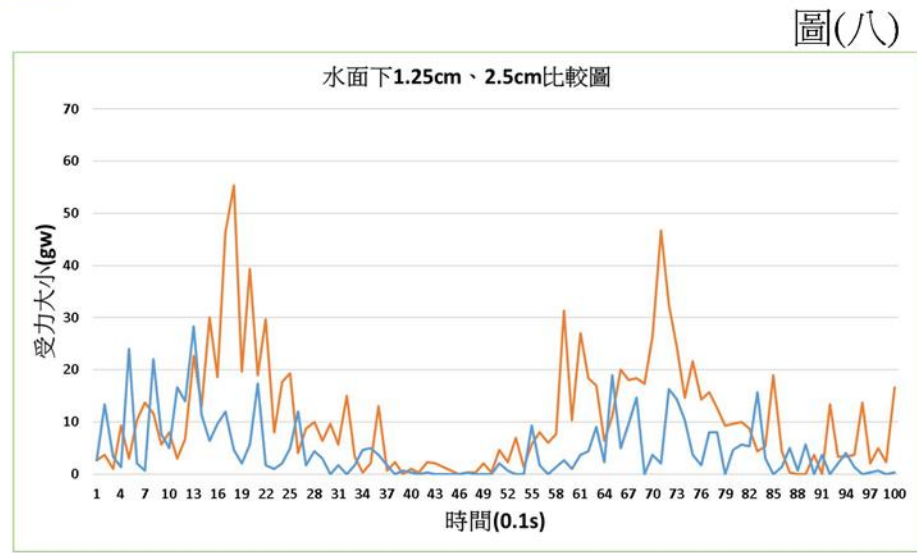
如圖(六)所示，為了研究超聲波於聲場中之駐波效應，我們試著改變不同液面的高度並觀察是否會有差異。結果發現**線與線之間的距離不變，並且最上面的破裂線距離水面的距離也沒有改變**，依照鋁箔紙上的破裂痕跡，我們推測此駐波應該為兩端開口的波形(如下圖)

高度	9 cm	7.5 cm	6 cm	4cm
照片 (駐波推測)				

三、利用壓力感測器量測洗淨槽中壓力與破壞情形之關係



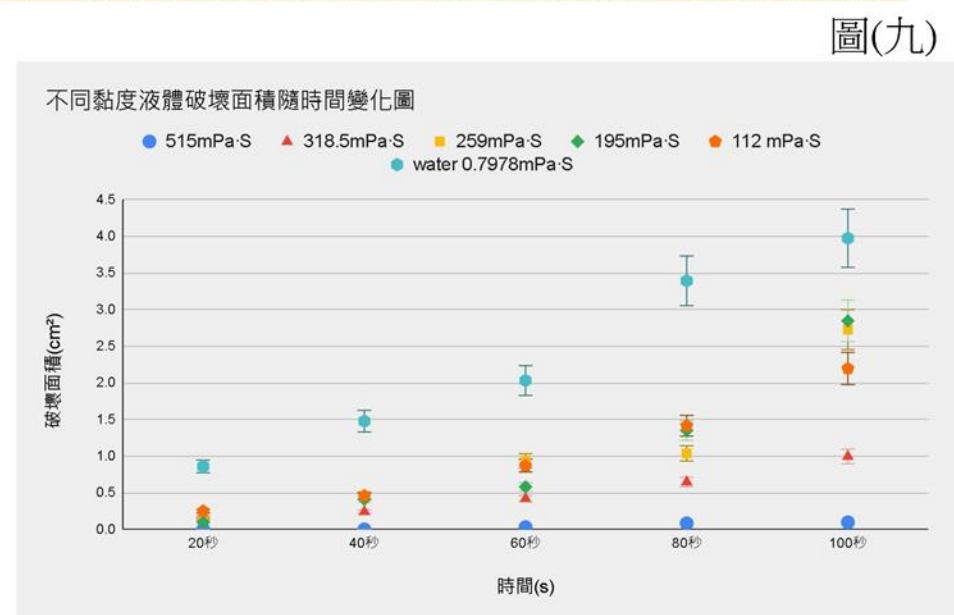
圖(七)中發現在破裂面的壓力會較破裂面間的壓力更大，並且五個感測器測出的壓力有著規律性的變化



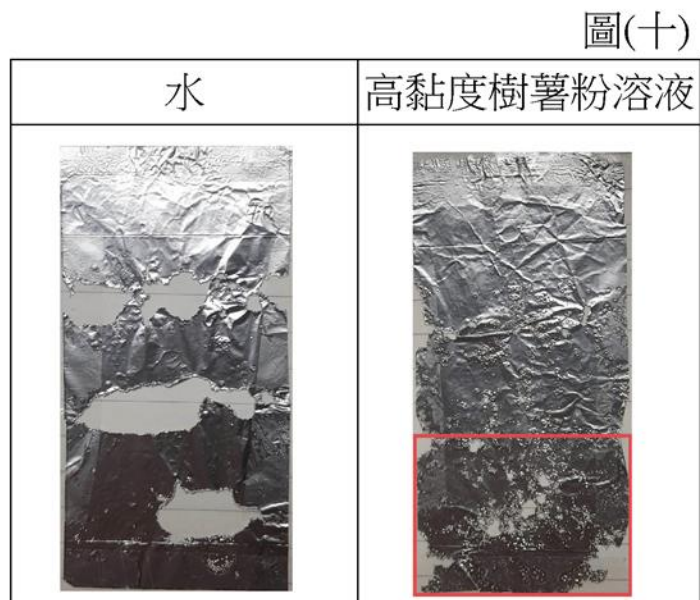
透過水面下1.25 cm 和 2.5 cm 處的壓力比較可以發現破裂面的壓力會較破裂面之間的壓力來得更大

我們發現在破裂面的壓力會較破裂面間的壓力來得更大，可以得知壓力強度和破壞程度有著正相關的關係也進一步驗證了破裂面為節點的推測，而壓力有著規律性的變化，我們認為這是因為超聲波於槽中形成駐波所造成的結果。

四、分析空蝕現象不同黏度液體中之破壞情形



從圖(九)可知黏度與破壞面積關係大致呈現黏度越小破壞面積越大的趨勢。



圖(十)中觀察到鋁箔紙在高黏度的樹薯粉溶液中，其破裂處多位於下半部；在水中卻明顯地呈現三條破裂面的規律分布。

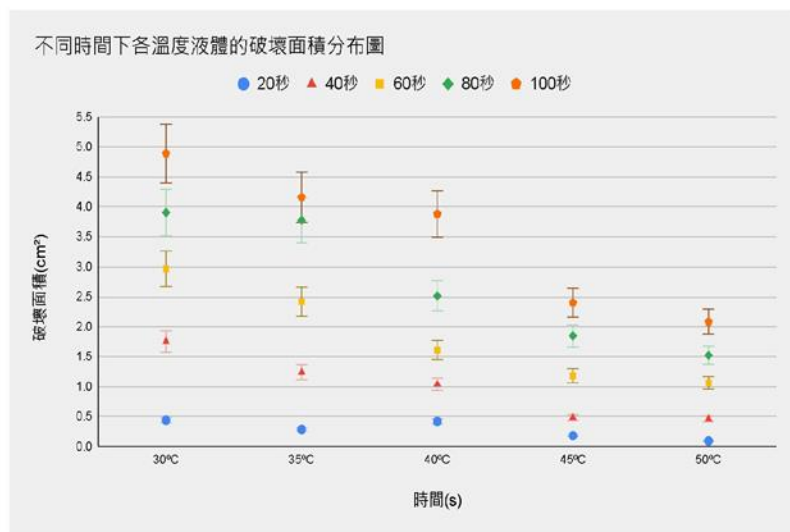
當液體黏度越高時，破壞面積會隨著時間變化，其增長幅度將會越大。我們認為黏度越高的環境時不利於氣泡的成長，產生的氣泡尺度較小，造成破壞的射流強度也較弱，導致鋁箔紙在高黏度的液體中，0到40秒時破壞面積趨近於0。

而圖(十)分布，我們認為是因為當液體黏度越高時超聲波強度的衰減程度越大，導致超聲波無法完全傳遞至液體表面。

五、分析空蝕現象不同溫度液體中之破壞情形



從圖(十一)發現當溫度越高總破壞面積越小



透過圖(十二)可知當溫度越高時破壞面積的增長幅度越小

在液體溫度為30度到50度的區間中，溫度較低時空蝕現象所造成的破壞程度較為嚴重。我們認為是在溫度較高的液體中空氣的溶解度降低，使空蝕現象較不明顯。

如圖(十二)我們發現隨著溫度升高破壞面積增長的幅度有越來越小的趨勢。表示隨著溫度升高，空蝕效應增長的幅度變小，因此產生於鋁箔紙上的總破壞面積變小。

結論

在黏度高、溫度高的液體空蝕效應會因為氣泡不易形成而不明顯，但若環境條件沒有過大的差異，氣泡於鋁箔紙上初始出現的機率分布，有可能會影響實驗的結果，例如：在黏較度高的液體中，鋁箔紙的破壞面積大於在黏度小的液體中的狀況。在清洗不同物品甚至精密電子元件時，有時候會希望改變空蝕強度，來達到最好的洗淨效果。若想使洗淨程度降低，避免清洗物體的破壞，可以選擇黏度高的清洗液，或是提高液體的溫度；反之，若想提高洗淨程度，則可以改變被清洗的物體放置的高度，以增加洗淨程度。

