

臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：物理學

作品名稱：超聲波在液體的探討

學校 / 作者：臺北市立麗山高級中學
臺北市立麗山高級中學

李哲安
駱頌揚

作者簡介



我叫李哲安，家住台北，今年 17 歲，就讀台北市立麗山高級中學。家中共有四位成員，父母親皆為老師，自幼在他們的教導下，對科學產生了濃厚的興趣，也打下了基礎。家中我排行老大，有一位弟弟，所以經常要幫忙解決問題，而在解決問題時也一起學習新的知識。在閒暇時，喜歡聽音樂及閱讀課外書，並藉此拓展視野以及陶冶心靈。

我喜歡做實驗，雖然在過程中遇到許多挫折也很辛苦，但卻可以學到很多課堂上不會教到的事情，更讓我確信「一分耕耘，一分收穫。」這句話。

My name is Andy lee. I am 17 years old, study in the Taipei municipal LiShan senior high school. There are four members in my family. My parents both are teachers in junior high school. In my childhood they often do some interesting experiments with me at home. It made me become interesting in science. I have one younger brother, so sometimes I have to help him to solve some problems. At the leisure, I like listening to the music, reading magazines to broaden my horizons of knowledge or enrich my inner life.

Though there are a lot of obstacles in the process of experiments, but by doing this I can learn the thing which will not be taught in class, furthermore it let me believe the proverb "No pains, no gains."

作者簡介



我叫駱頌揚，今年就讀麗山高中二年級，我的興趣是打桌球、籃球，且喜歡閱讀科學相關的書籍，雖然大家喜歡的科學都不同，有的是喜歡科學數學、有的是喜歡科學定理等等，但我之所以享受科學，是爲了更進一步的貼近大自然，更接近我們的生活，例如，運動學。而且這次很高興能夠參加這個科學展覽會，這會是一次非常特殊的經驗。

My name is Peter Luo, I study at second grade of Li Shan senior high school. I am interested in playing basketball and table tennis, and enjoy reading science books and magazines. Although everyone like different section of science, other likes the science math or science theory, but I would like to combine with the nature and our live that's why I enjoy nature science, for example, kinematics. And I am glad to attend this Taiwan International Science Fair, I consider that is a very special experience.

摘要

本實驗一開始主要探討超聲波在水中的基本性質，如：指向性、衰減性…等。實驗發現，超聲波的衰減會同時與其指向性以及衰減性有關。

接著希望利用超聲波在水中的物理性質，進一步測量超聲波在水中的聲速，實驗中則利用駐波以及聲光效應測量。在駐波法測量聲速的實驗中，用洗淨機當作聲源，內部放置量筒，量筒內盛水後放入木屑，並使聲波在其中產生駐波即聲浮現象，求出波長後反推聲速，測量出的聲速誤差值僅有 1.13%，而在使用聲光效應測量聲速的實驗中，使 1.65 MHz 的超聲波在自製的壓克力容器內部所裝的水中產生駐波後，以波長 650 nm 的紅光雷射通過，在遠處屏幕即產生似於光柵繞射現象，藉著屏幕上的繞射條紋反推該液體聲速，測量出聲速誤差均在 5% 以下。

在觀察聲光效應實驗中，發現過段時間後有氣泡產生，由文獻上，得知此現象為超聲空蝕現象(Acoustic cavitation)，就設計實驗測量聲場中聲壓分部，並利用蠟紙觀察氣泡的成長。實驗發現聲場中的聲壓強度以及液體的表面張力和蒸汽壓會影響到產生空蝕的臨界值及產生氣泡的數量。

Abstract

At the beginning this experiment explores the ultrasonic base in the water, including its velocity, the physics property of liquid, direction, and attenuation etc. . . .

At first, we use methods of standing wave to measure the velocity of sound under the water, using an ultrasonic cleaner as the sound source and putting some wooden powder in the water. As the standing wave accrues/produces, the powder will “stand still.” To measure the length between two grains of powder, in this way we can calculate sound velocity.

Another method we use is diffraction of optics. Put 1.65 MHz source and water in a transparent container; then using laser through it. At the board much diffraction light stripes are created. By this way, we can estimate the velocity. Following these ways can calculate velocity precisely.

In these experiments, some bubbles create in the container are discovered. We learn it is so-called “Acoustic Cavitation” based on the reference paper. Besides, we design experiment to know the bubbles’ growth and the number of the bubbles is connected to the physics property of liquid. We use different kinds of liquid with different vapor pressure and surface tension. Finally, we know when it has the smaller surface tension and bigger vapor pressure, the liquid makes bubble velocity grow faster and larger amount of bubbles are produced.

摘要.....	1
附圖目錄.....	5
附表目錄.....	7
公式目錄.....	8
符號注釋.....	9
第一章 概論.....	11
1-1 研究動機.....	11
1-2 研究目的.....	12
第二章 文獻回顧.....	12
2-1 聲波的衰減.....	12
2-2 駐波及共振.....	12
2-3 干涉.....	13
2-4 聲光效應.....	13
2-4-1 聲光效應原理.....	13
2-4-2 區分拉曼-納斯衍射布拉格衍射的定量標準.....	18
2-5 音壓.....	19
2-6 空蝕現象.....	20
2-6-1 空蝕現象原理.....	20
2-6-2 氣蝕數.....	22
2-6-3 空蝕氣泡噴流的壓力.....	22
2-6-4 空蝕現象臨界值.....	23
第三章 研究方法與過程.....	24
3-1 研究構思與流程.....	24
3-1-1 研究構思.....	24
3-1-2 流程圖.....	25
3-2 研究設備.....	26
3-2-1 超聲波洗淨機.....	26
3-2-2 超聲波霧化器.....	26
3-2-3 壓電晶片.....	27
3-3 實驗過程與方法.....	28
3-3-1 超聲波基礎性質測量.....	28
3-3-1-1 聲速測量.....	28
3-3-1-2 衰減性.....	29
3-3-2 聲光效應.....	30
3-3-3 探討影響超聲波因素.....	31
3-3-3-1 測量音壓.....	31
3-3-3-3 空蝕效應.....	32
第四章 研究結果與討論.....	33

4-1 聲速測量結果	33
4-2 衰減性測量結果	35
4-3 聲光效應結果	38
4-3-1 照片拍攝	38
4-3-2 實驗數據	40
4-3-3 條紋寬度與屏幕距離	41
水	41
酒精	42
水和酒精的比較	43
4-4 音壓測量結果	44
4-4-1 檢測聲壓聲場環境	44
4-4-2 探討影響超聲波的主要因素	45
4-4-2-1 不同水位對聲壓的影響	45
4-4-2-2 鋁薄侵蝕法測量音壓分佈	48
4-5 空蝕現象探討	49
4-5-1 空時現象臨界值	49
4-5-2 鋁薄的破壞性實驗	51
討論	54
第五章 結論	55
結論	55
參考文獻	56

附圖目錄

圖 1	管內共振示意圖	P13
圖 2	折射率變化示意圖	P14
圖 3	光平面波波前變化示意圖	P15
圖 4	聲光效應儀器示意圖	P16
圖 5	空蝕效應原理示意圖-1	P21
圖 6	空蝕效應原理示意圖-2	P21
圖 7	超聲波洗淨機	P26
圖 8	超聲波霧化器	P26
圖 9	壓電晶片	P27
圖 10	聲速測量儀器示意圖	P28
圖 11	衰檢性測量儀器示意圖	P29
圖 12	聲光效應儀器示意圖	P30
圖 13	音壓測量儀器示意圖-1	P31
圖 14	音壓測量儀器示意圖-2	P31
圖 15	測量鋁箔應力實驗裝置圖	P32
圖 16	氣泡成長觀察裝置示意圖	P32
圖 17	量筒中顆粒懸浮情形	P34
圖 18	駐波半波長長度測量數據圖	P35

圖 19	衰檢示意圖	P37
圖 20	聲波傳遞示意圖-高頻	P38
圖 21	聲波傳遞示意圖-低頻	P38
圖 22	雷射光點	P39
圖 23	聲光效應繞射圖案 管徑 4x4	P39
圖 24	聲光效應繞射圖案 管徑 5x5	P40
圖 25	通過圓管之雷射光點	P40
圖 26	水的兩暗紋間距與屏幕遠近比較	P42
圖 27	酒精的兩暗紋間距與屏幕遠近比較	P43
圖 28	水與酒精之兩暗紋間距比較	P44
圖 29	聲壓與位置關係	P45
圖 30	超聲波強度變化曲線 (水位高 3.6 cm $> \lambda/2$)	P46
圖 31	超聲波強度變化曲線 (水位高 1.5)cm $< \lambda/2$)	P47
圖 32	超聲波強度變化曲線 (酒精位高 1.8 cm $> \lambda/2$)	P48
圖 33	超聲波強度變化曲線 (酒精位高 1.25 cm $< \lambda/2$)	P48
圖 34	音壓與鋁箔破損位置對照圖	P49
圖 35	鋁箔破損情形對照圖	P50
圖 36	鋁箔破損壓力臨界值	P52
圖 37-1、2、3、4	超聲波震盪一~四分鐘	P53

附表目錄

表 1	液體-水 實驗數據	P40
表 2	液體-酒精 實驗數據	P40
表 3	水、酒精理論聲速	P40
表 4	液體-水 屏幕距離與條紋寬度比較	P41
表 5	液體-酒精 屏幕距離與條紋寬度比較	P42

公式目錄

式(1)	衰減係數公式
式(2)	聲光效應繞射角度公式
式(3)	光波繞射花紋亮暗紋寬度公式
式(4)	聲光效應繞射花紋亮暗紋寬度公式
式(5)	行波函數
式(6)	駐波函數
式(7)	聲光效應聲場內折射率
式(8)	液體中的折射率變化
式(9)	聲波在介質裝引起的彈性應變場
式(10)	式(8)結合式(9)
式(11)	聲場內的折射率變化
式(12)	聲光效應判別數
式(13)	音壓函數傅利葉級數
式(14)	音壓函數
式(15)	氣蝕數
式(16)	空蝕氣泡噴流壓力公式
式(17)	空蝕現象臨界值
式(18)	空蝕現象臨界值和黏滯係數之關係

符號注釋

λ_s	:	聲波波長
f_s	:	聲波頻率
k_s	:	聲波波向量
λ	:	入射光波長
k_i	:	入射光波向量
n	:	折射率
P	:	光彈係數
S	:	質改變的程度
ω	:	角頻率
d	:	狹縫寬度
y	:	條紋寬度
L	:	狹縫與屏幕間距
θ	:	入射光繞射角度
m	:	繞射級數
η	:	黏滯係數
P_c	:	空蝕產生臨界值
P_0	:	靜水壓
P_v	:	蒸氣壓

T	:	表面張力
R_0	:	氣泡初始半徑
α	:	衰減係數
ρ	:	液體密度
C	:	聲速
f_c	:	光波頻率
P_b	:	噴流壓力
ρ	:	液體密度
V_j	:	噴流速度
μ	:	黏滯係數

第一章 概論

1-1 研究動機

在日常生活中，聲音是無不在的，而在工業和科學實驗上，聲波也扮演著重要腳色。為了使用聲波達到相當的目的，就必須要對聲波的聲速、波長、頻率、衰減…等，這些物理性質作分析和觀察。

測量聲速的方法有許多種，在本實驗中希望能夠找出簡單、方便、精準，而且能夠把肉眼所看不到的聲音具體呈現的方法。如此一來若用在教學用途上，可以使學生在作實驗時，能夠對聲音有更深入的了解。

在光通訊工業上，聲光效應也有一定的發展潛能，從 1966 年起，聲光衍射理論，新聲光材料及聲光器件的設計和製造都得到迅速發展。1976 年後，因聲光技術的發展，聲光信號處理已成為光通訊的一個分支。聲光效應是因為超聲波在物質中產生折射率變化，光通過後會由於在折射率較大的物折中，光移動速度較慢，進而形成的相位差會使光產生干涉及繞射的現象。實驗中希望以自製的設備呈現出聲光效應，並希望能藉此實驗設備求出液體聲速。

當聲波打入液體中，若條件足夠，則空蝕現象就會發生，在生活中此現象大多是發生在船的螺旋槳處，而在工業上和商業上則是利用在洗淨方面，實驗中將會探討影響空蝕現象的因素，以及空時現象對

物體產生的現象。

1-2 研究目的

1. 探討超聲波的基本性質(例如：聲速、衰減性)。
2. 藉由光學繞射法觀察超聲波在介質中產生的現象。
3. 超聲波聲壓因素與空蝕現象的關係。

第二章 文獻回顧

2-1 聲波的衰減

由文獻[11] 超聲學中得知，超聲波的衰減與液體物理性質的關係：

$$\alpha = \frac{8\mu\pi^2 f_s^2}{3\rho c^3} \quad \text{式(1)}$$

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

2-2 駐波及共振

文獻[3]南一版高三物理參考書中寫到，駐波之形成，是因為兩個頻率、振幅、波長相同，但方向不同的波碰再一起時，所產生新的波形，其波腹、波節不動，而振幅為其原來兩倍。共振是具有某種內在自然振動頻率的物體，當外在相同頻率的振動傳到時，即會產生振

動而且產生極大的振幅振動之現象。當聲音在管子內發生共振及駐波的現象如下圖

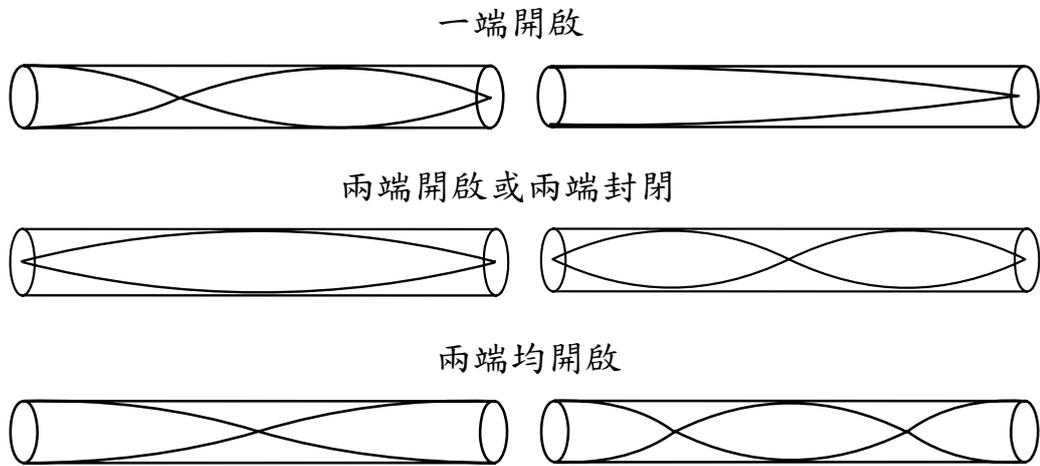


圖 1 管內共振示意圖

2-3 干涉

文獻[3]南一版高三物理參考書中寫到，當兩波交會時，兩波在會合處會互相干涉行成新的波形，若兩波相位相同，即會產生完全相長干涉，振動位移加強；反之，若兩波相位相反，則會產生完全相消性干涉，振動位移簡弱。

2-4 聲光效應

2-4-1 聲光效應原理

1922 年，L. N. 布里淵在理論上預言了聲光衍射；1932 年 P. J. W. 德拜和 F. W. 席爾斯以及 R. 盧卡斯和 P. 比夸特分別觀察到了聲光衍射

現象。從 1966 年到 1976 年期間，聲光衍射理論、新聲光材料及高性能聲光器件的設計和製造工藝都得到迅速發展。1970 年，實現了聲表面波對導光波的聲光衍射，並研製成功表面(或薄膜)聲光器件。1976 年後，隨著聲光技術的發展，聲光信號處理已成為光信號處理的一個分支。

文獻[7]光學原理中寫到，聲波在介質中傳播時，使介質產生疏密變化，因此，介質的折射率也隨著頻率產生週期性變化。超聲波的作用就如同光閘一般，光閘間距等於聲波波長 λ_s 。當光波透過此介質時，就會產生光的繞射。

超生波在介質中產生的疏密變化情形如下圖，其中深色部分表示介質受到壓縮，密度增大，折射率 n 也增大，而白色部分表示介質密度減小，折射率 n 也減小。

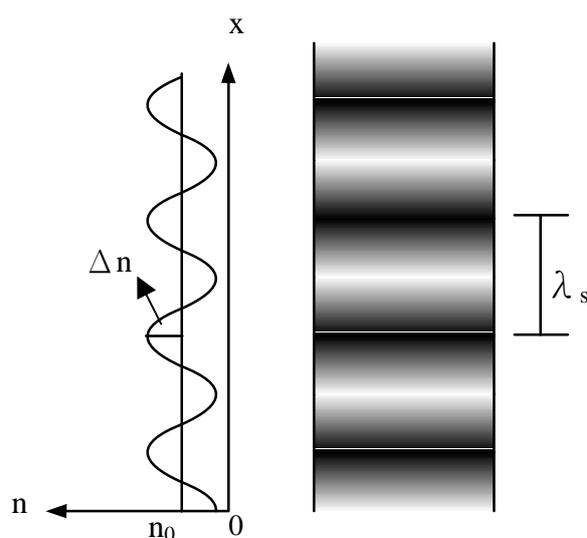


圖 2 折射率變化示意圖

按照聲波頻率的高低以及聲波和光波作用長度的不同，聲光效應可以分為拉曼-納斯繞射和布拉格繞射兩種類型。

當超音波頻率較低，光波垂直於聲場傳播方向，聲光互作用長度 L 較短時，產生拉曼-納斯衍射。由於聲速比光速小很多，故聲光介質可視為一個靜止的平面相位光柵。而且聲波長 λ_s 比光波長 λ 大得多，當光波平行透過介質時，幾乎不透過聲波面，因此只受到相位調製，即透過折射率大部分的光波波前將延遲，而透過折射率小部分的光波波前將超前，於是透過聲光介質的平面波波前出現凸凹現象，變成一個折皺曲面。通過介質的光波將發生相干作用，形成與入射方向對稱分佈的多級衍射光，這就是拉曼-納斯衍射。

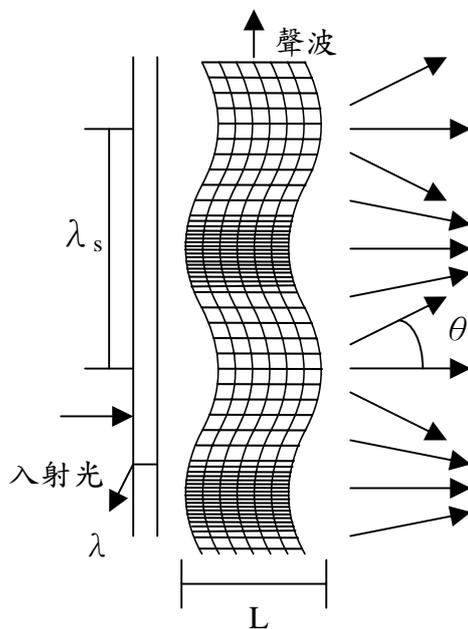


圖 3 光平面波波前變化示意圖

光的繞射角度可由以下公式算出

$$\sin \theta = m \frac{k_s}{k_i} = \frac{\lambda}{\lambda_s} \quad \text{式(2)}$$

而在屏幕上的條紋間距可以由光柵公式計算

y 為該條紋到中央亮紋的距離， m 為第幾級亮紋， d 為狹縫間距(在此即為超聲波波長)， L 為屏幕到狹縫的距離。

$$y = m \frac{\lambda L}{d} \quad \text{式(3)}$$

$$d \sin \theta = \frac{dy}{L}$$

$$\Rightarrow d \sin \theta = m\lambda (m = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\Rightarrow d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda_c (m = 1, 2, 3, \dots)$$

$$y = m \frac{\lambda L}{d}$$

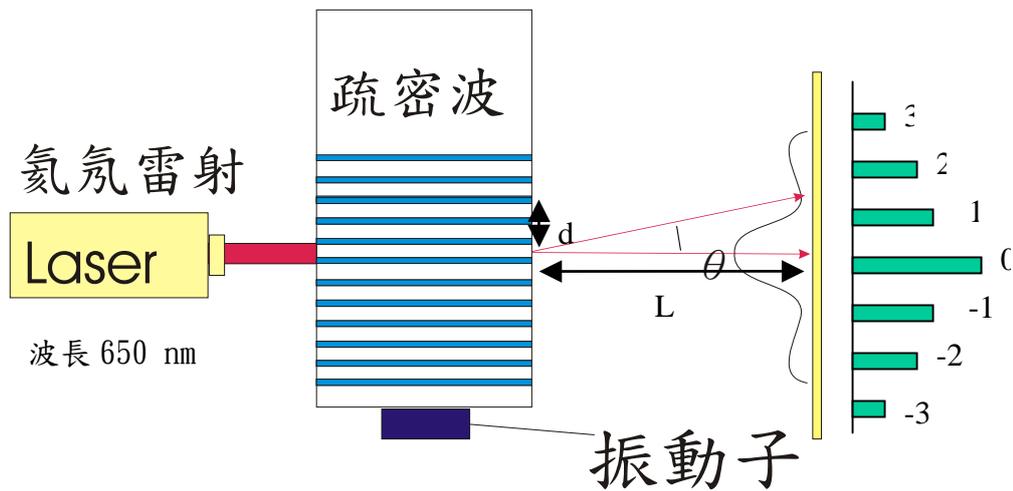


圖 4 聲光效應儀器示意圖

由文獻中可以了解，超聲波在水中形成的狹縫間距等於超聲波在水中的波長，又 $v = \lambda_s \cdot f$ 所以公式可改寫成。

$$y = m \frac{\lambda L}{\lambda_s} \quad \text{式(4)}$$

聲波的方程式為

$$a(x, t) = A \sin(\omega_s t - k_s x) \quad (\text{行波}) \quad \text{式(5)}$$

$$a(x, t) = 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda_s} \sin\left(\frac{2\pi}{T_s}\right) \quad (\text{駐波}) \quad \text{式(6)}$$

其中 a 為介質值點瞬間的位移， A 為質點位移的振幅

所以可近似的認為折射率變化正比於質點在 x 方向的位移

$$\text{即 } \Delta n(x, t) \propto \frac{da}{dx} = -k_s A \sin(\omega_s t - k_s x)$$

這裡 $\Delta n = -Ak_s$ ，所以聲場內折射率為：

$$n(x, t) = n_0 + \Delta n \cos(\omega_s t - k_s x) = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 PS [\cos(\omega_s t - k_s x)] \quad \text{式(7)}$$

此外在液體中的折射率變化可表示為

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 PS \quad \text{式(8)}$$

其中 P 為材料的光彈係數， S 為超聲波引起介質改變的程度

而聲波在介質裝引起的彈性應變場可表示為

$$S_1 = S_0 \sin(\omega_s t - k_x x) \quad \text{式(9)}$$

其中 k_s 為聲波的波向量， ω_s 為聲波的角頻率。所以結合

(8)(9)兩式，可寫成

$$\Delta n(x,t) = -\frac{1}{2}n_0^3 PS_0 \sin(\omega_s t - k_x x) = \Delta n \sin(\omega_s t - k_x x) \quad \text{式(10)}$$

則聲場內的折射率變化可表示為

$$n(x,t) = n_0 + \Delta n \sin(\omega_s t - k_x x) \quad \text{式(11)}$$

聲駐波在一個週期內，介質兩次出現疏密層，且在波節處密度保持不變，因而折射率每隔半個週期就在波腹處變化一次，由極大(或極小)變為極小(或極大)。在兩次變化的某一瞬間，介質各部分的折射率相同，相當於一個沒有聲場作用的均勻介質。若超聲頻率為 f_s ，那麼光閘極出現和消失的次數則為 $2f_s$ ，因而光波透過該介質後所得到的調製光的調製頻率將為聲頻率的兩倍。

2-4-2 區分拉曼-納斯衍射布拉格衍射的定量標準

拉曼-納斯衍射和布拉格衍射是在改變聲光衍射參數時出現的兩種極端情況。影響出現兩種衍射情況的主要參數是，聲波長 λ_s 、光波波長 λ 、光束入射角 θ_i 及聲光作用距離 L ， k_s 為聲波的波向量， k_i 為入射光的波向量。

$$G = k_s^2 L / k_i \cos \theta_i = 2\pi \lambda L / \lambda_s^2 \cos \theta_i \quad \text{式(12)}$$

當 L 小且 λ_s 大 ($G \ll 1$) 時，為拉曼—納斯衍射；而當 L 大且 λ_s 小 ($G \gg 1$) 時，為布拉格衍射。為了尋求一個實用的標準，即當 G 參數大

到一定值後，除 0 級和 1 級外，其他各級衍射光的強度都很小，可以忽略不計。達到這種情況時即可認為已進入布拉格繞射區。目前已普遍採用下列定量標準：

$G \geq 4\pi$ 布拉格繞射

$G < \pi$ 拉曼-納斯

本實驗所產生的現象為拉曼-納斯繞射

2-5 音壓

文獻[6]超音波工程學中談到，一般能持續產生一定聽覺的連續音，均有一定週期，且其音壓的變化 δ_p 可以以下的傅利葉級數表示：

$$\delta_p = \sum_{n=1}^{\infty} \delta_{pn} \sin(n\omega t + \theta_n) \quad \text{式(13)}$$

若頻率為 f_s 時，則 $\omega = 2\pi f_s$ ， $n \in Z$ 。

可將其評率視為 f_s 、 $2f_s$ 、 $3f_s$ 等純音合成音。 f_s 為基本頻率，其整倍數之波，稱之為高諧波或第 n 次諧波。

音壓定義如下：

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\delta_p)^2 dt} \quad [N/m^2] \quad \text{式(14)}$$

2-6 空蝕現象

2-6-1 空蝕現象原理

由文獻[6]中了解，欲在水中產生一個氣壓的音壓($\sim 10^5$)，需要約 $0.35 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 的功率，若頻率為 50kHz 時，換算為震盪位移可瞭解約為 $0.16 \mu\text{m}$ 。欲產生超過此強度的超聲波時，當其音壓在 1 氣壓以上，若使其壓力降為半週期時(負壓)，即為真空的期間，當達到此真空狀態期間，可使介質本身或以溶入的氣體汽化，因而產生大量的細小氣泡。如此使介質產生空洞的現象，即稱為空蝕效應。

其次，壓力升高至半週期時(正壓)，則其瞬間壓力超出靜壓的一倍以上，以氣化的小氣泡破裂產生強大的高壓(據計算有時可達到數百甚至數千大氣壓)。又因周圍的條件不同，在不致於破裂狀態下移動時，即匯聚在駐波的波節處，形成大氣泡而懸浮在液面上

空蝕現象開始發生時的液體壓力叫作空蝕現象臨限值，在強力超聲波應用上以發生肉眼看得見的氣泡時為空蝕現象發生點，由文獻中得知，若要形成空蝕現象，則周圍壓力就幾乎等於空蝕現象臨限值，即水壓為 1 大氣壓時，臨限值也約為 1 大氣壓。

空蝕現象

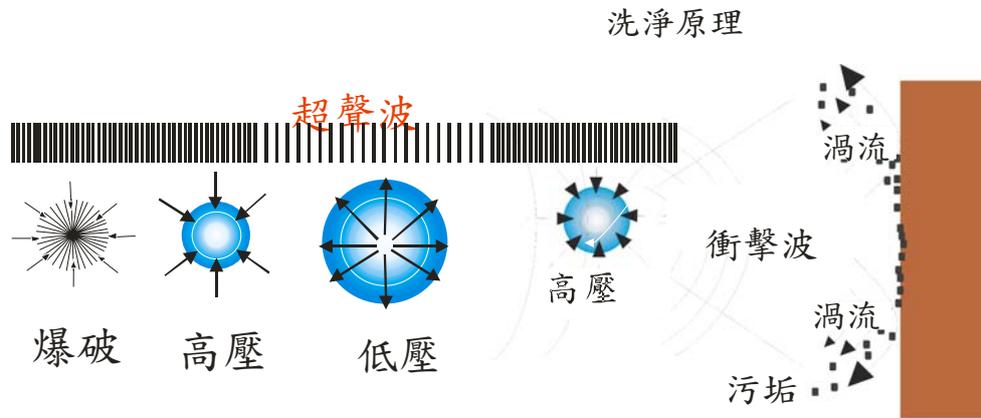


圖 5 空蝕效應原理示意圖-1

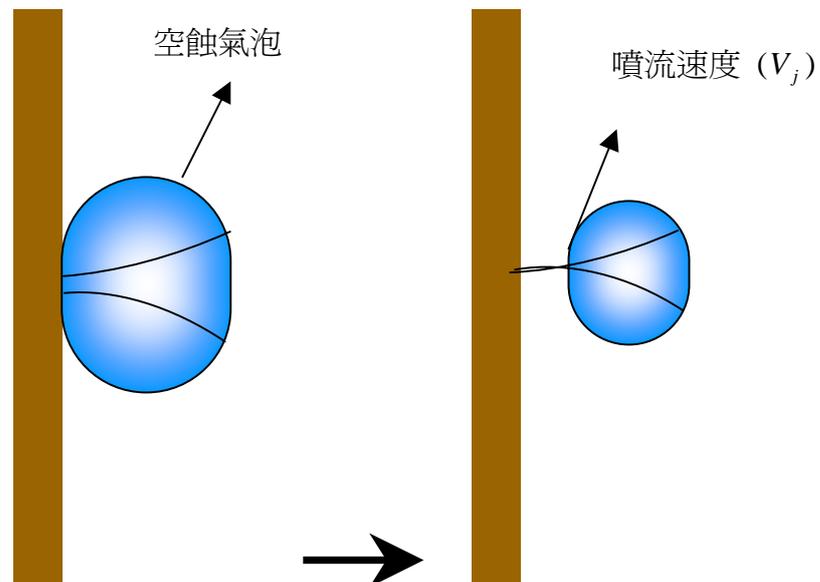


圖 6 空蝕效應原理示意圖-2

2-6-2 氣蝕數

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_v)}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad \text{式(15)}$$

σ 為一無因次數 (如雷諾數), P_0 , P_v , ρ , U_0 , 分別為靜水壓, 蒸氣壓, 流速。

$$\sigma = \sigma_i$$

$$\sigma = -C_{pm}$$

C_{pm} 為最小壓力係數

如果

$$\sigma < \sigma_i \quad \text{無空蝕效應}$$

$\sigma > \sigma_i$ 有空蝕產生並產生噪音、

2-6-3 空蝕氣泡噴流的壓力

壓力升高至半週期時(正壓)氣泡破裂伴隨著衝擊波(Shock waves)和噴流(Jet), 噴流壓力與液體的關係:

$$P_b = \rho c V_j \quad \text{式(16)}$$

P_b 為噴流壓力, ρ 為液體密度, c 為聲速, V_j 為噴流速度

2-6-4 空蝕現象臨界值

根據[11]超聲學，空蝕產生臨界值隨不同液體而有不同，對同一種液體而言溫度、壓力、汽泡初始半徑、氣體含量的不同都會影響

$$P_c = P_0 - P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{2T}{R_0}\right)^3} \left/ \left(P_0 - P_v + \frac{2T}{R_0}\right) \right. \quad \text{式(17)}$$

P_c 為空蝕產生臨界值， P_0 為靜水壓， P_v 為蒸氣壓， T 為表面張力， R_0 氣泡初始半徑。

空蝕產生臨界值與黏滯係數大致的關係可表為

$$P_c = 0.8(\log \eta + 5) \quad \text{式(18)}$$

η 為黏滯係數。

第三章 研究方法與過程

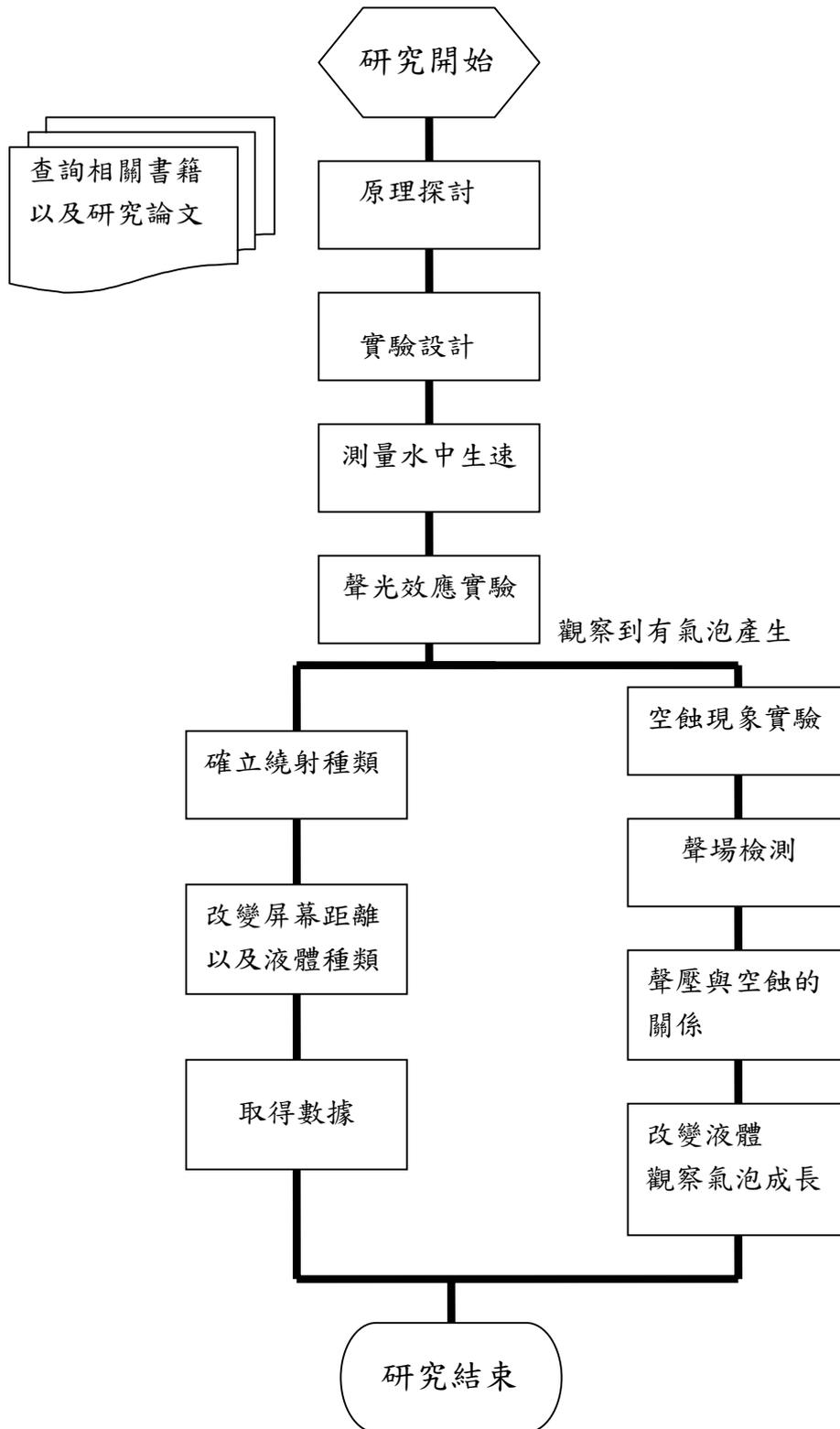
3-1 研究構思與流程

3-1-1 研究構思

聲波存在於我們生活週遭，但卻無法看見，而學校課本都以圖像來向學生們表示聲波是一疏密波。而聲波會產生駐波，在波腹振動位移會增加，而節點處為靜止，如果讓聲波產生駐波後，在容器內放入某些介質，利用此現象，讓介質因為受到振動大小的不同，而有不同的現象產生，可能就可以使無法看見聲音具體化。具體化後若可以辨別出節點以及腹點間的差異，就可知道半波長，並進一步求出聲速。

聲光效應為光通訊的一個分支，原理也是利用聲音在各位置的振動位移不同，使光產生繞射。而光的繞射條紋間的距離和狹縫有關，在聲光效應中，此狹縫大小就是聲音的波長，若如果知道聲音的頻率、的波長，就可以算出聲音在該介質中的波長，進一步推算聲音在該介質中的速度，而且若實驗成功，光繞射產生的條紋，也可以做為聲波是一疏密波的證明。

3-1-2 流程圖



3-2 研究設備

3-2-1 超聲波洗淨機



圖 7 超聲波洗淨機

頻率:43 kHz 功率:50 W

3-2-2 超聲波霧化器

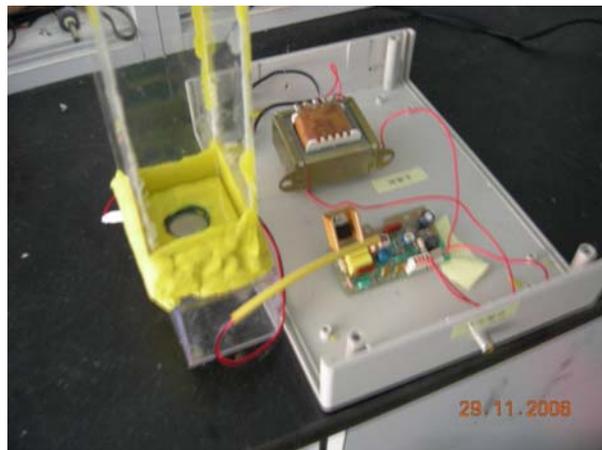


圖 8 超聲波霧化器

頻率:1.65 MHz

3-2-3 壓電晶片



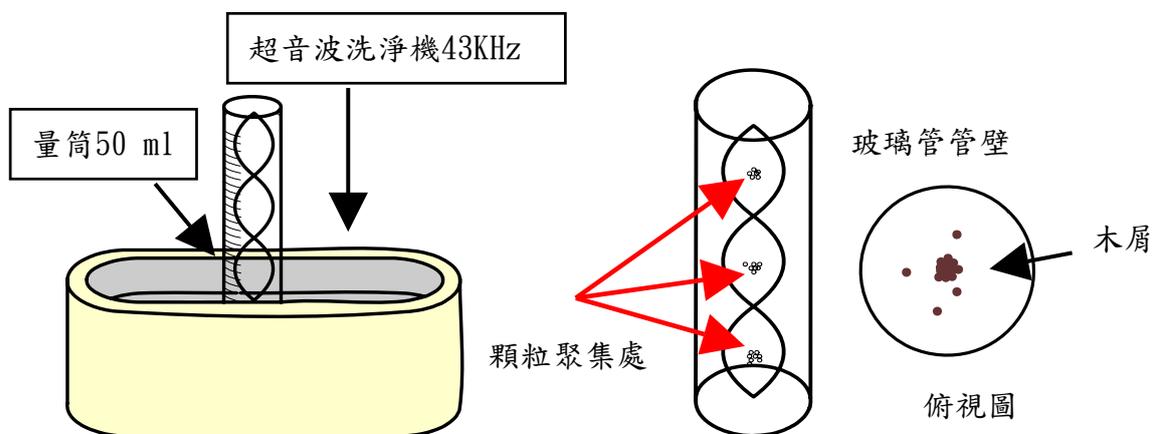
圖 9 壓電晶片

3-3 實驗過程與方法

3-3-1 超聲波基礎性質測量

3-3-1-1 聲速測量

以 43 kHz 的超聲波洗淨機當作超聲波發射源，取一量筒裝水後放入洗淨機內，在接觸部份以水做耦合，使聲波能藉著水傳導入量筒內，調整水柱高度達到共振，利用共振使內部物體因為聲浮現象在波腹的地方聚集且懸浮在水中，如此一來即可測量出聚集點的距離，並測量出聲速。



$$v = f \cdot \lambda_s$$

圖 10 聲速測量儀器示意圖

3-3-1-2 衰減性

用訊號產生器作為信號發射源，接到壓電晶片當作超聲波發射端，取另一個壓電晶片當作接收端，接到示波器上做觀察，壓電晶片後方以油黏土封好以防水後，放入水中變不同的頻率，增加發射端和接收端的距離，觀察不同頻率的聲波在水中的衰減情形。

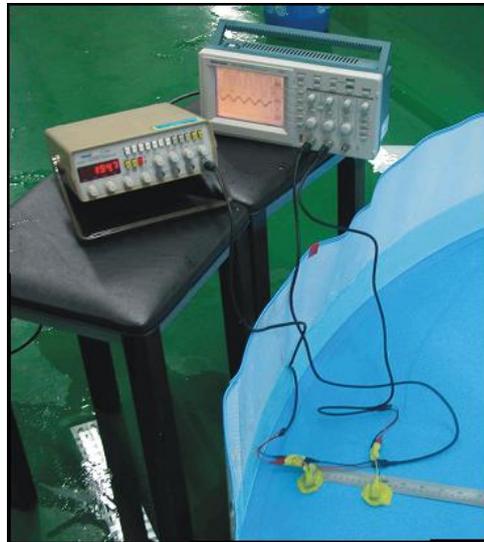


圖 11 衰檢性測量儀器示意圖

3-3-2 聲光效應

先以 0.3 mm 的壓克力板製作一個長 4 cm 寬 4 cm 高 36 cm 的壓克力管，下方裝 1.65 MHz 超聲波霧化機振動子，管內放置各種液體，讓聲波在液體中形成駐波後，用波長 650×10^{-9} m 的紅光雷射垂直管壁通過。當超聲波在水中形成駐波時，節點和腹點會因疏密的不同，折數率會產生週期性變化，就和移動光閘一樣，若以雷射通過，則會產生干涉及繞射條紋。實驗中所使用的振動子產生的並不是平面波，但在實驗中卻需要平面波才可進行，所以要讓這些雜亂的波在管內慢慢形成趨近於平面波的波形才可進行接下來的實驗，即雷射入射點要離振動子越遠越好，但礙於振動子功率有限，且管長加長，液壓會變高，進而壓迫振動子使震幅變弱，所以雷射入射點就設定在離振動子 30 公分處，雷射和液體間距為 1 m，液體與屏幕間距為 4.5 m。量得條紋間距後，再由公式反推液體中狹縫間距，算出聲速。

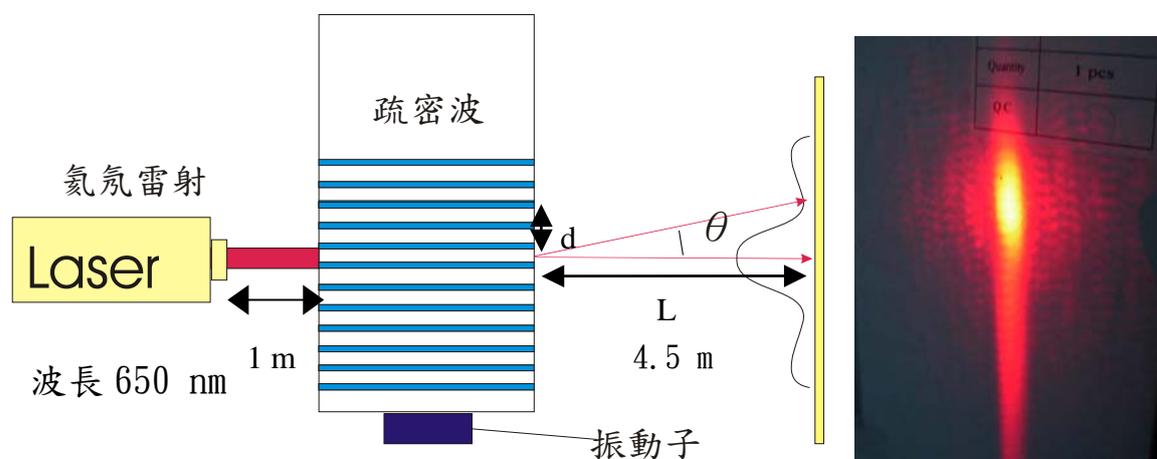


圖 12 聲光效應儀器示意圖

3-3-3 探討影響超聲波因素

3-3-3-1 測量音壓

方法一

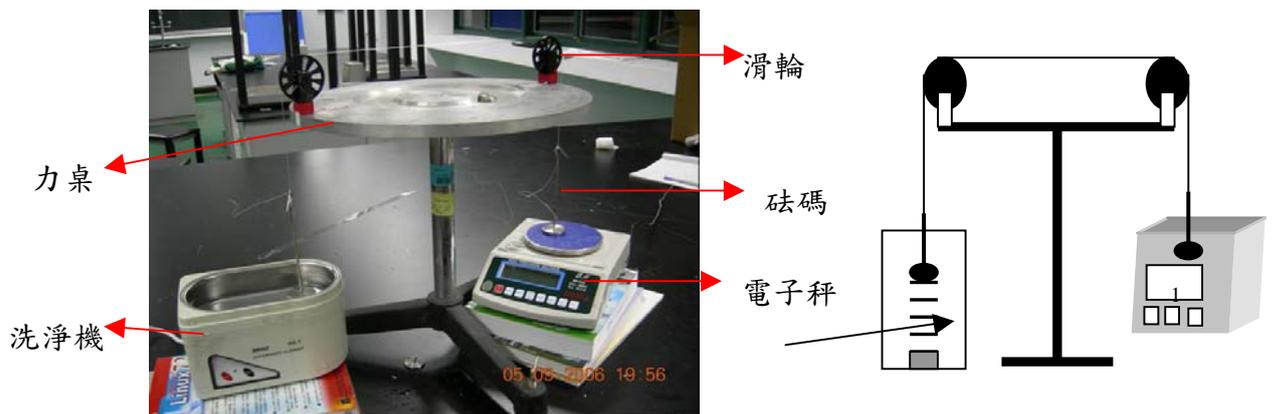


圖 13 音壓測量儀器示意圖-1

兩邊使用等重的砝碼，利用滑輪減少摩擦力，將砝碼分別放置在洗淨機和電子秤，量測變化的重量在除上砝碼截面積，固定好測量單位，對不同位置進行量測。

方法二

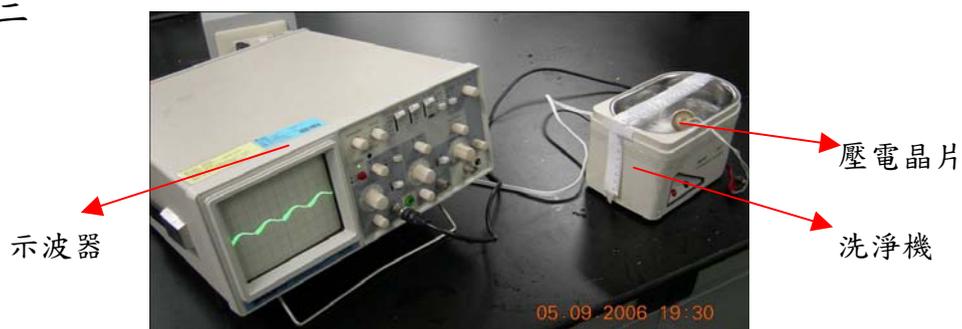


圖 14 音壓測量儀器示意圖-2

用壓電晶片接示波器觀察某一位置的訊號強度，並記錄，判別聲壓大小。

3-3-3-2 測量鋁箔應力

用大頭針下方用粘土當底座，放置於電子秤上，上方用不同厚度的鋁箔下壓，觀察刺穿時的電子秤刻度，就可知道刺穿鋁箔所需的最小力量。由這實驗就可推出，若要打破鋁箔所需的最少力量，就是空蝕效應打穿鋁箔的最小力量。

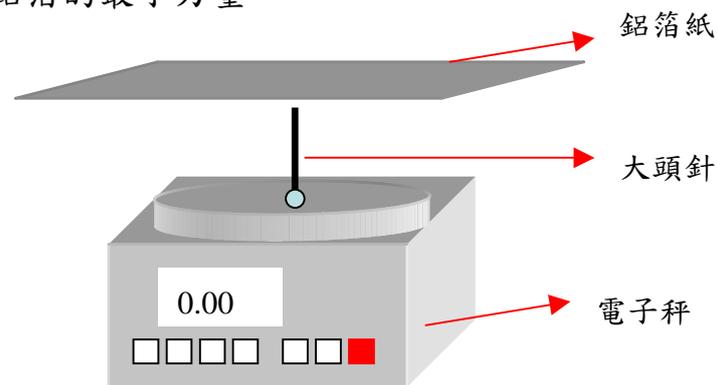


圖 15 測量鋁箔應力實驗裝置圖

3-3-3-3 空蝕效應

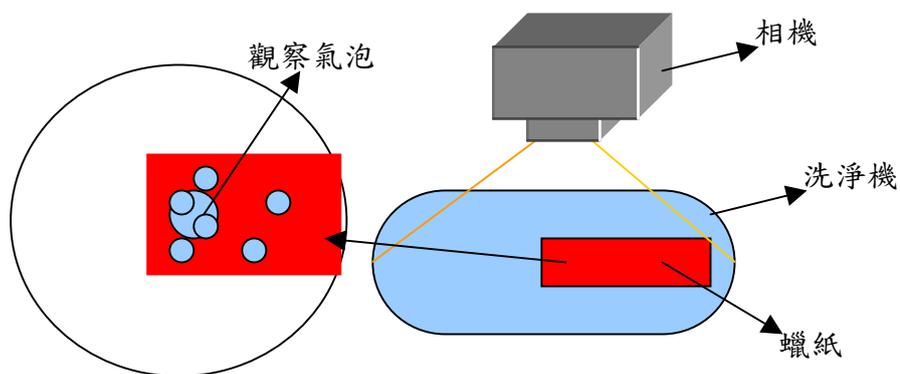


圖 16 氣泡成長觀察裝置示意圖

利用數位相機以固定時間拍攝氣泡在蠟紙上的成長，在更換液體的種類觀察氣泡成長的速度。

第四章 研究結果與討論

4-1 聲速測量結果

在實驗一開始是想在玻璃管內放螢光粉，希望可以在共振管內看到它的排列，但是卻發現螢光粉顆粒太小，看不到排列變化，而改試用粉筆灰，情形也是一樣。而後改滴入鋁粉混合洗潔劑，雖然可以看出有懸浮現象產生，但是鋁粉會反光，而且太重，停留在波腹的時間太短，並不好觀測。最後改用木屑，木屑在共振管內排列情況比之前2種材料都好，而且比較容易懸浮在水中。在用鋁粉和木屑做實驗的時候，我們發現這些顆粒都會呈現漩渦狀的運動，尤其是鋁粉，轉動的速度最快，而且這些顆粒的聚集處都是在量筒正中央，之後我們測量出這些顆粒的聚集點距離大約是1.72公分左右，由文獻中可得知，這些顆粒都是聚集在駐波的波腹，駐波的波腹距離為該駐波的 $1/2$ 波長，由公式可以得知當時聲音在液體中的速度大約是1479m/s



粉筆灰 $< 0.1\text{mm}$



螢光粉 $< 0.1\text{mm}$



木屑 約 $0.05\sim 0.1\text{cm}$

圖 17 量筒中顆粒懸浮情形

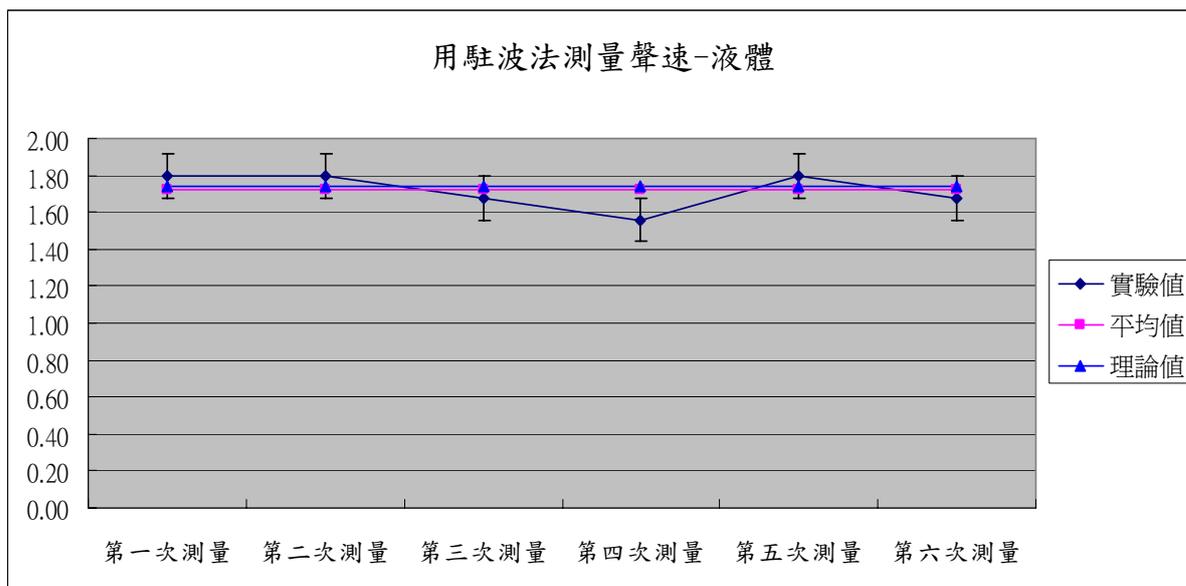


圖 18 駐波半波長長度測量數據圖

4-2 衰減性測量結果

由公式可以知道，頻率越高的聲波，衰減速度應該越快，但是由實驗畫出的圖表中卻發現，頻率越高的超聲波衰減速度越慢，和實驗理論不符。

之後利用 Crocodile Physics 軟體模擬高頻與低頻的衰減後，才發現之前引用的公式，只適用在點波源的情況，而在本實驗中使用的卻是面聲源，會有指向性產生。因為指向性的關係，越高頻的聲波指向性越強，能量越像前集中，導致衰減速度變慢。模擬程式中，黑線代表聲波，顏色越深表示振幅越大，由圖 和圖 的比較可以觀察出，高頻波源發出的的聲波衰減的較慢，低頻則反之。

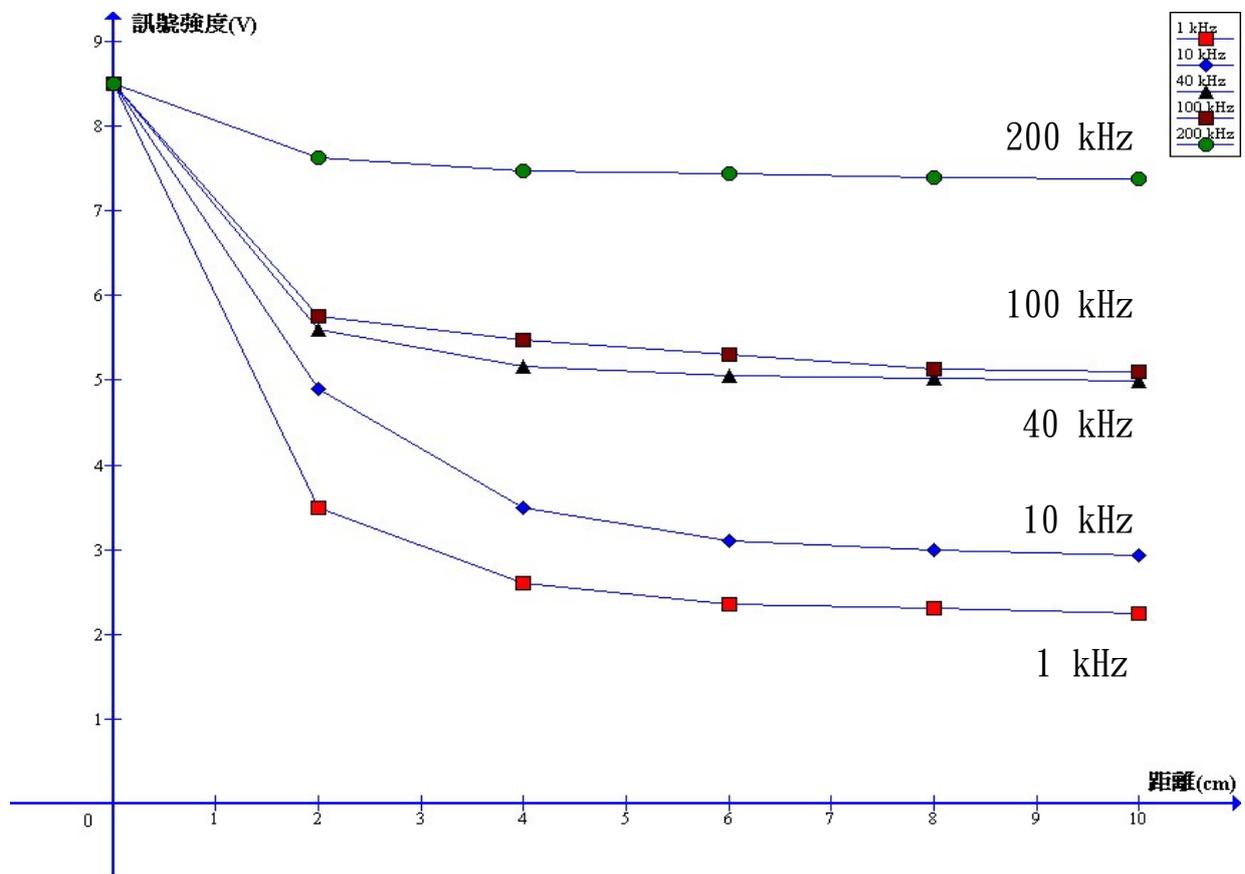


圖 19 衰檢示意圖

高頻超聲波

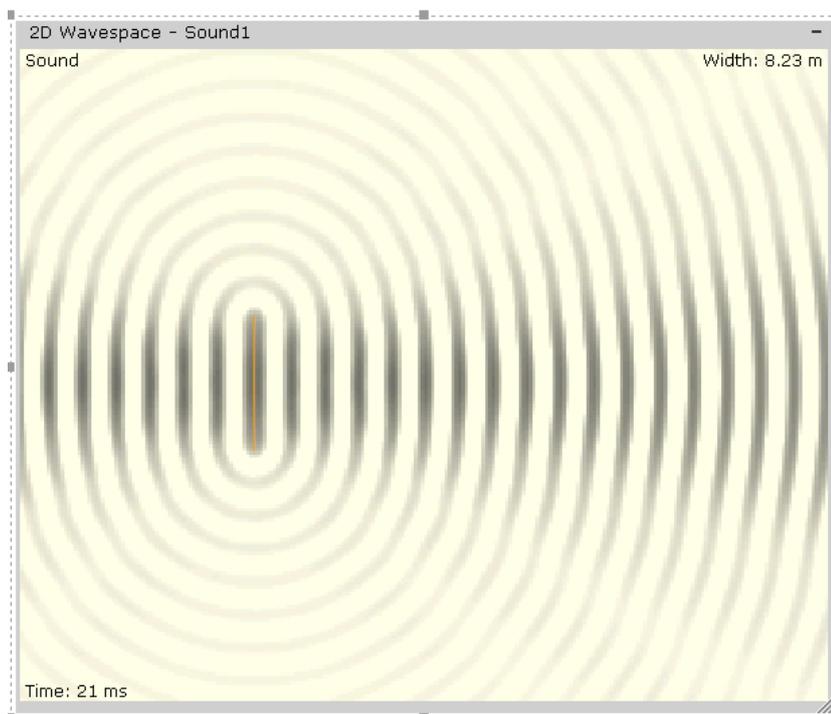


圖 20 聲波傳遞示意圖-高頻

低頻超聲波

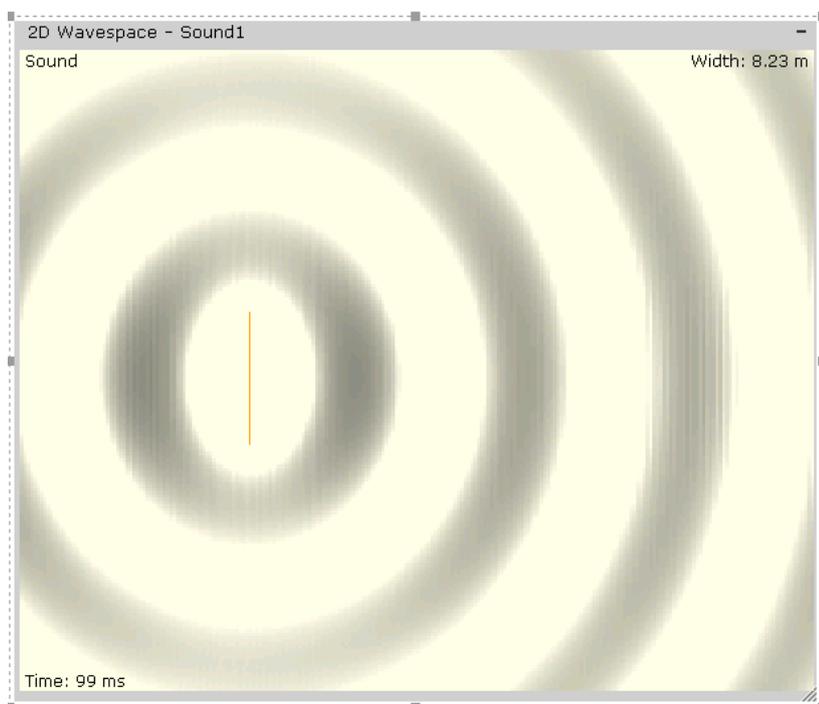


圖 21 聲波傳遞示意圖-低頻

4-3 聲光效應結果

4-3-1 照片拍攝

下圖是尚未啟動超聲波發射器時，雷射光通過液體後，在屏幕上所成的紅點。

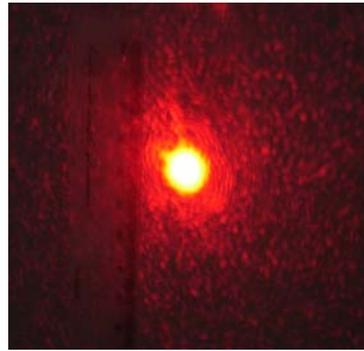


圖 22 雷射光點

原本儀器設計中用來盛裝液體的管子長 4 cm 寬 4 cm，但在屏幕上形成的條紋並不是很清楚(圖)，在經過多次實驗以及檢查後，推測可能是平面波形成的還並不是很完整的關係，而之後再做一個長 5 cm 寬 5 cm 的管子，發現屏幕上花紋變得更為清楚。

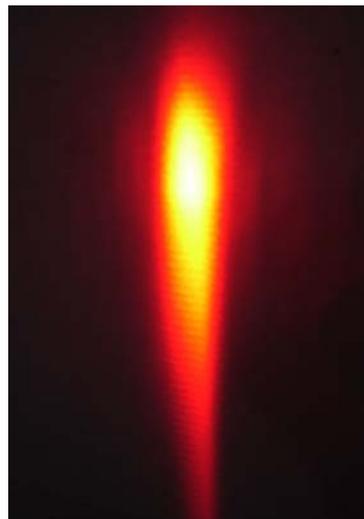


圖 23 聲光效應繞射圖案 管徑 4x4

啟動超聲波發射器後，所形成的繞射圖案便得更清楚，圖中可看出有橫向的條紋。若從直的來看，可以發現離中心點越遠的條紋亮度越小。在作測量時，則取其中 5 條亮紋的間距，再作平均，以減少單次測量的誤差。

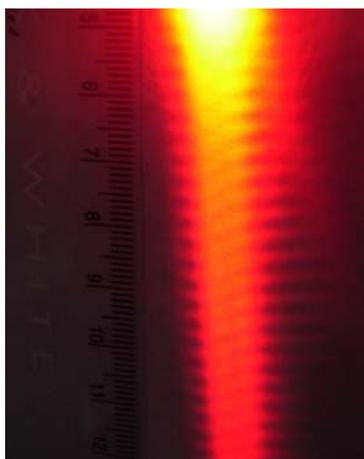


圖 24 聲光效應繞射圖案 管徑 5x5

在實驗中有想過把盛裝液體的容器改成圓管試試看，但光通過原管之後，原本只有一個紅點，變成一條橫線(圖)，雖然還是看的出效果，但是因太難觀測，所以放棄使用。

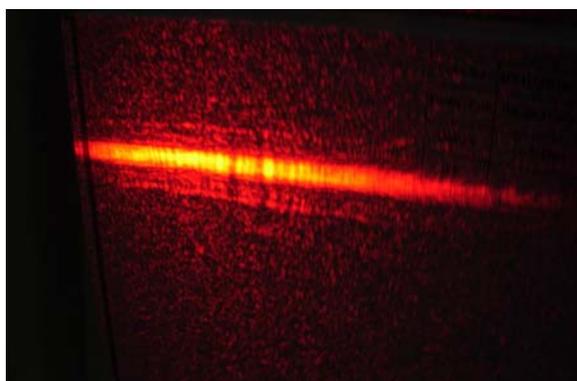


圖 25 通過圓管之雷射光點

4-3-2 實驗數據

水	狹縫理論值	狹縫實際值	花紋間距 理論值	花紋間距 實際值	聲速實際 值	誤差
1	0.898 mm	0.975 mm	3.25 mm	3.0 mm	1605 m/s	7.18 %
2	0.898 mm	0.943 mm	3.25 mm	3.1 mm	1553 m/s	4.70 %
3	0.898 mm	0.886 mm	3.25 mm	3.3 mm	1459 m/s	1.56 %
平均						4.48 %

表 1 液體-水 實驗數據

酒精	狹縫理論值	狹縫實際值	花紋間距 理論值	花紋間距 實際值	聲速實際 值	誤差
1	0.696 mm	0.692 mm	4.18 mm	4.2 mm	1141 m/s	0.47 %
2	0.696 mm	0.745 mm	4.18 mm	3.9 mm	1229 m/s	6.70 %
3	0.696 mm	0.727 mm	4.18 mm	4.0 mm	1199 m/s	4.31 %
平均						3.82 %

表 2 液體-酒精 實驗數據

液體種類	聲速理論質
水	1482 m/s
酒精	1150 m/s

表 3 水、酒精理論聲速

4-3-3 條紋寬度與屏幕距離

水

水	狹縫理論值 (mm)	第一次測量 (mm)	第二次測量 (mm)	第三次測量 (mm)	狹縫實際值 (平均) (mm)
150 m	1.08	0.9	1.2	1.1	1.06
300 m	2.16	2.2	2.4	2.6	2.4
450 m	3.25	3	3.1	3.3	3.13

表 4 液體-水 屏幕距離與條紋寬度比較

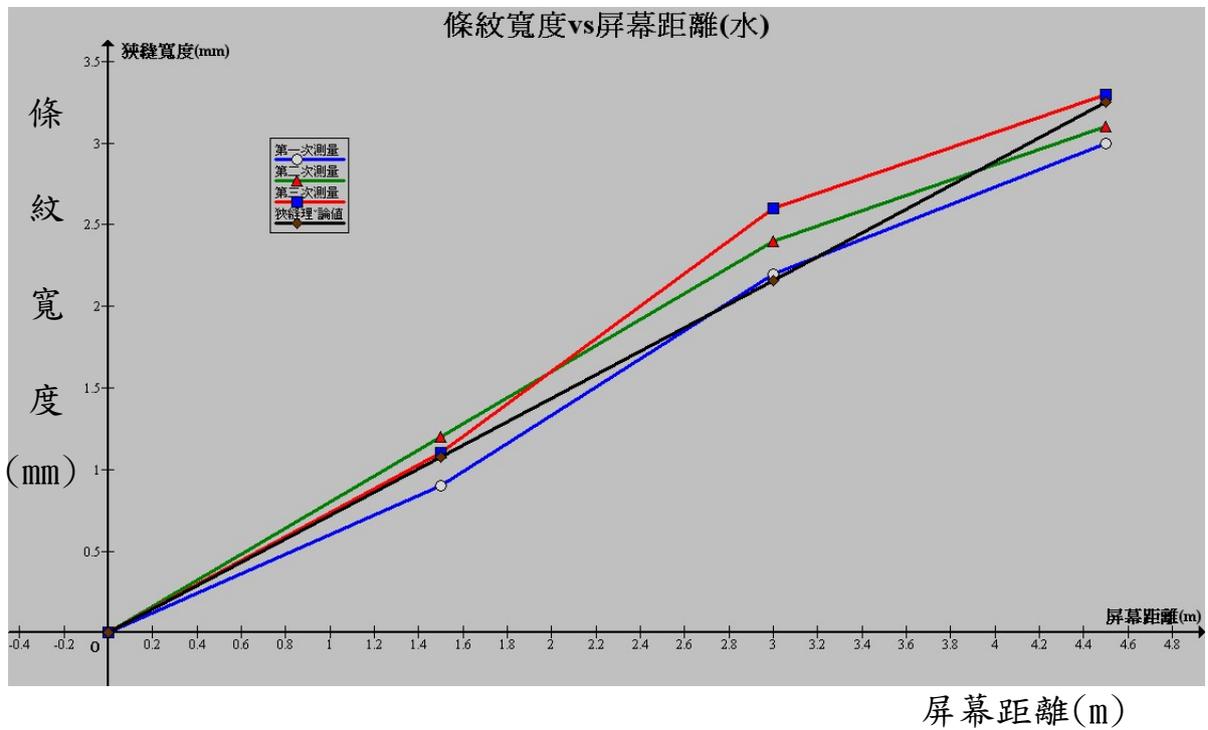


圖 26 水的兩暗紋間距與屏幕遠近比較

酒精

酒精	狹縫理論值 (mm)	第一次測量 (mm)	第二次測量 (mm)	第三次測量 (mm)	狹縫實際值 (平均) (mm)
150 m	1.39	1.4	1.6	1.4	1.46
300 m	2.78	2.6	2.8	2.9	2.76
450 m	4.18	4.2	3.9	4	4.03

表 5 液體-酒精 屏幕距離與條紋寬度比較

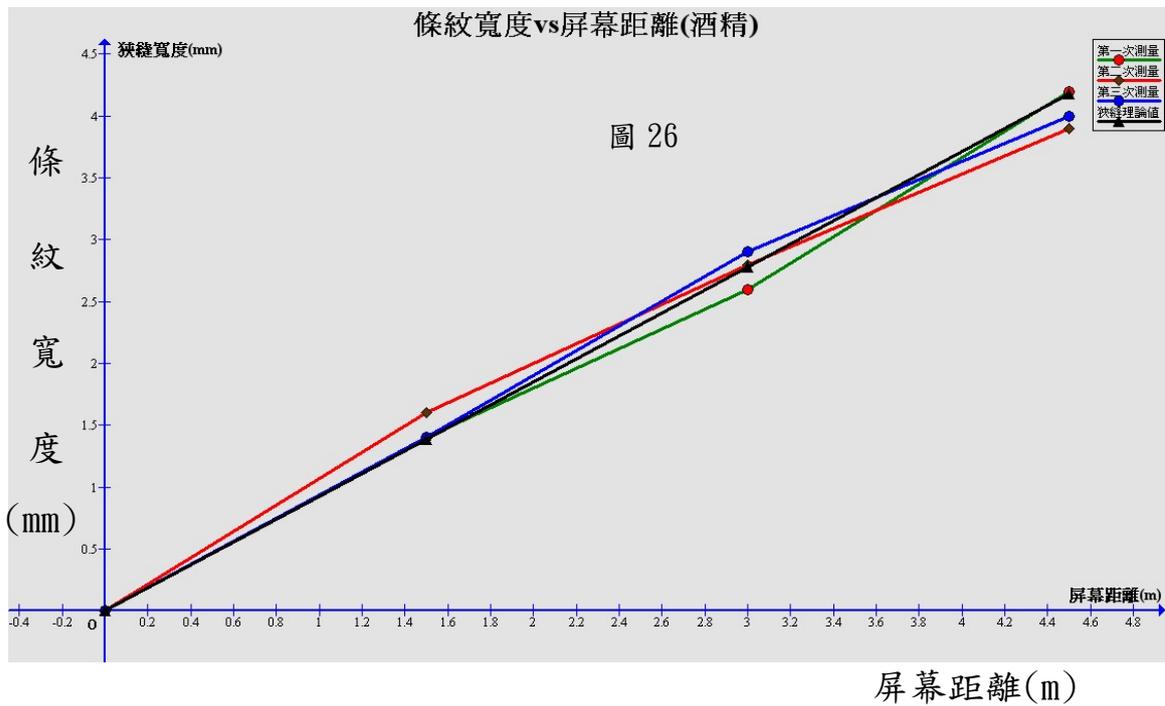


圖 27 酒精的兩暗紋間距與屏幕遠近比較

水和酒精的比較

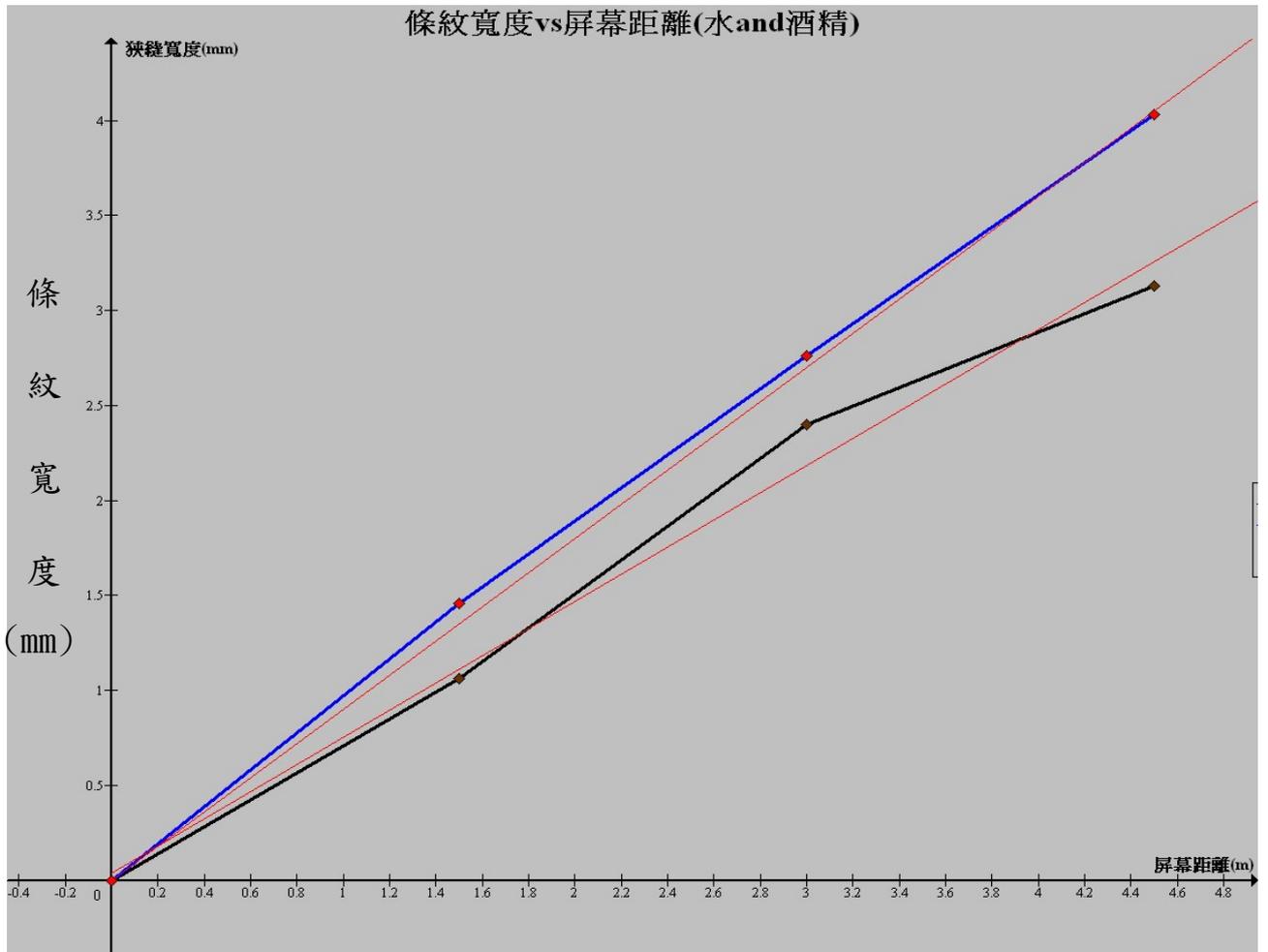


圖 28 水與酒精之兩暗紋間距比較

屏幕距離(m)

由上圖可看出條紋寬度和屏幕至狹縫的距離成正比，且因為聲音在酒精和水中的速度不一樣，所以打入同頻率的聲波時，波長也不一樣，所以繞射條紋寬度也不相同。

水的聲速比較大，當打入同頻聲波時波長也較大，而在聲光效應實驗中，光要通過的狹縫寬度就是液體波長長度，所以光通過水產生的條紋間距比酒精來的小。

4-4 音壓測量結果

4-4-1 檢測聲壓聲場環境

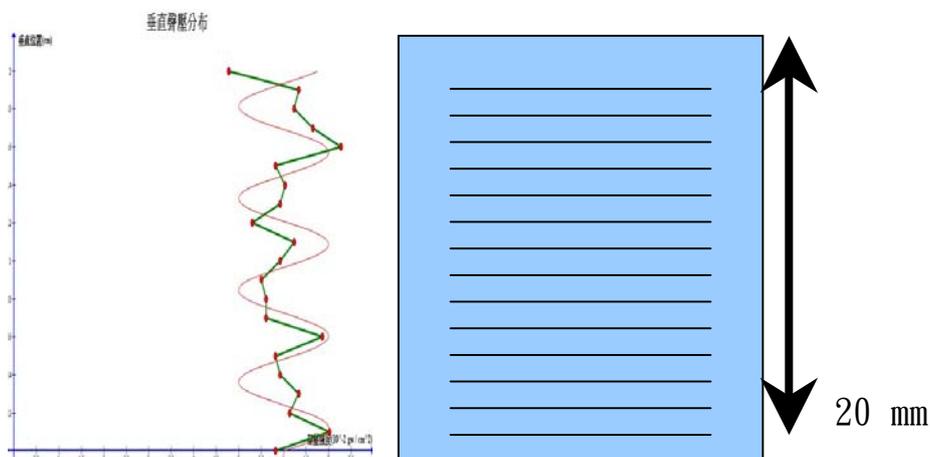


圖 29 聲壓與位置關係

首先我們先測量聲光效應儀器中的壓克力管內聲壓，由上圖表可約略看出在這 20 mm 中的聲壓有一周期性的變化，也可由此說明前面的聲光效應實驗，聲壓為一疏密物質波，物質遭受到擠壓會產生應變，應變的定義 $S = \frac{\Delta V}{V_0}$ ，且物質在此作週期性的變化，由文獻上得知：

圖 21 水與酒精之兩暗紋間距比較

$$S_1 = S_0 \sin(\omega_s t - k_x x)$$

$$\Delta n(x, t) = -\frac{1}{2} n_0^3 P S_0 \sin(\omega_s t - k_x x) = \Delta n \sin(\omega_s t - k_x x)$$

由上式可知，物質的折射率也作週期性的變化。

4-4-2 探討影響超聲波的主要因素

4-4-2-1 不同水位對聲壓的影響

水

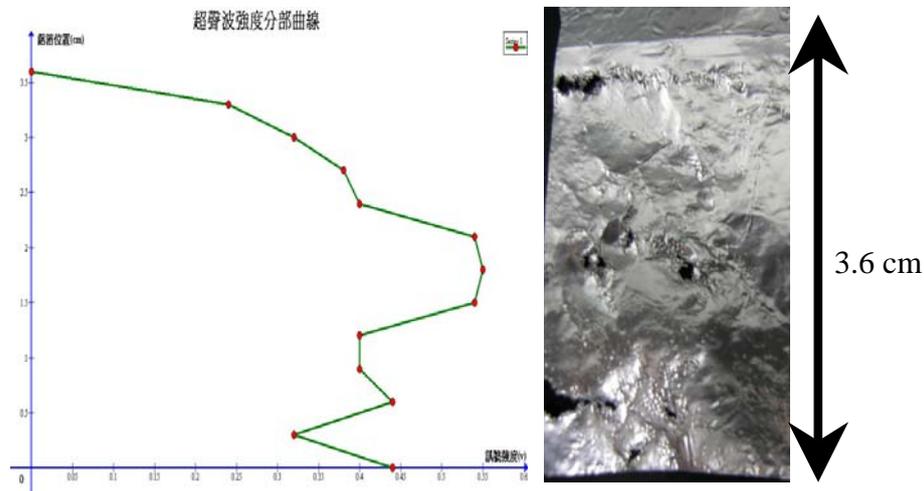


圖 30 超聲波強度變化曲線 (水位高 3.6 cm $> \lambda/2$)

水位高度超過 $\lambda/2$ 聲壓有明顯的強度變化，係因在此高度內形成駐波(Standing waves)，造成振幅加大，對照鋁箔上的破壞情形，可發覺聲壓變化的強弱與空蝕現象成正相關。

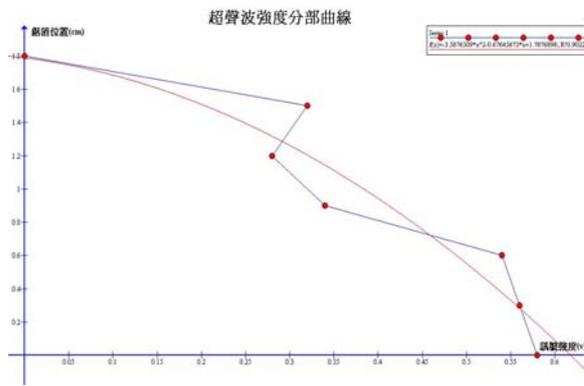
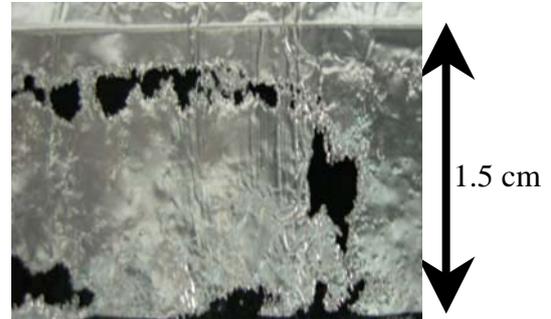


圖 31 超聲波強度變化曲線



(水位高 1.5)cm < $\lambda / 2$)

對照上圖可知水位高度小於 $\lambda / 2$ 因不易形成駐波，所以聲壓並沒有明顯的強度變化，。

酒精

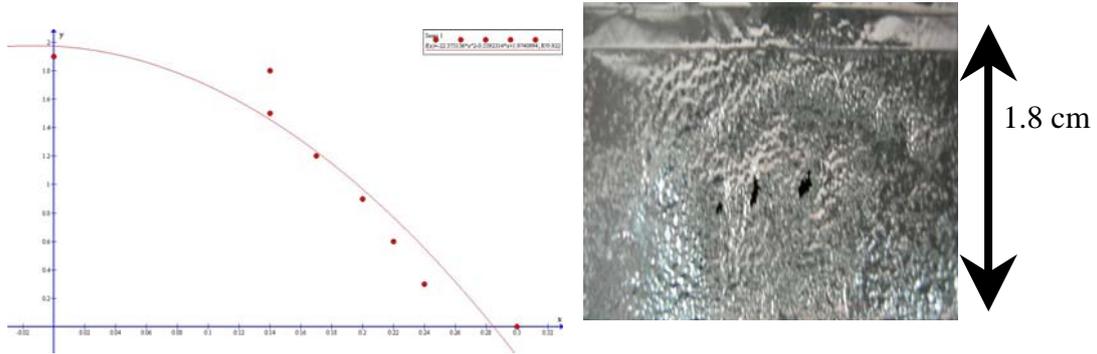


圖 32 超聲波強度變化曲線 (酒精位高 1.8 cm $> \lambda/2$)

雖然酒精液深大於 $\lambda/2$ ，聲壓上沒有明顯的變化，上下兩張圖互相比對，仍可觀察到大於 $\lambda/2$ 的空蝕現象較明顯

(酒精液深大於 $\lambda/2$ 時，鋁箔有破洞，小於 $\lambda/2$ 則無)



圖 33 超聲波強度變化曲線 (酒精位高 1.25 cm $< \lambda/2$)

酒精液身低於 $\lambda/2$ 時沒有形成駐波態空蝕現象不明顯在鋁箔上不易觀察但其上有非常多凹洞，是與水最大的不同。

4-4-2-2 鋁箔侵蝕法測量音壓分佈

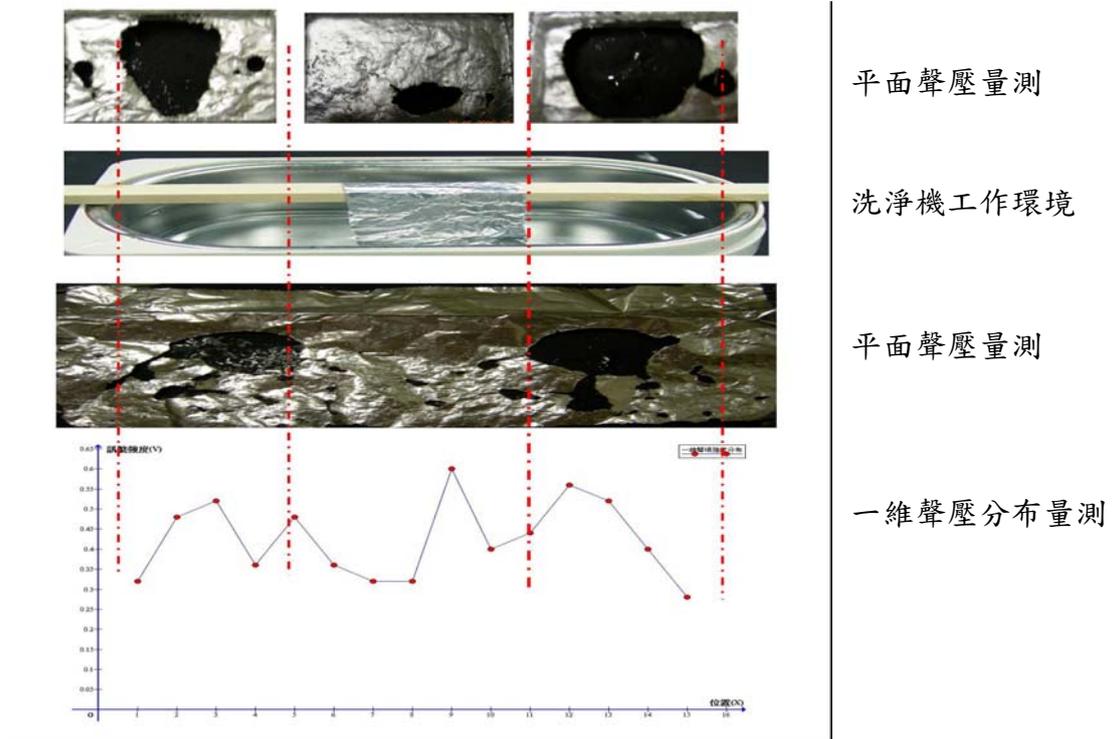


圖 34 音壓與鋁箔破損位置對照圖

由上圖整合鋁箔侵蝕法、洗淨機工作環境及一維聲壓量測的圖表，可相互對照。聲壓越強的位置鋁箔破損越嚴重，也就是說空蝕現象越明顯，也可間接說明聲場在工作環境中的分布，圖中鋁箔所破的兩個大洞為洗淨機中二振動子的位置，中間推測為二聲源形成駐波之位置，使其振幅加大。

4-5 空蝕現象探討

4-5-1 空蝕現象臨界值

$$P_c = P_0 - P_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{2T}{R_0}\right)^3} \left/ \left(P_0 - P_v + \frac{2T}{R_0}\right)\right.$$

P_c 為空蝕產生臨界值， P_0 為靜水壓， P_v 為蒸氣壓， T 為表面張力， R_0 氣泡初始半徑。



酒精

水

圖 35 鋁箔破損情形對照圖

由上式可得知在同溫同壓下擁有越大的蒸氣壓與越小的表面張力的液體越容易形成空蝕現象可由實驗上觀察到酒精會產生許多氣泡且在鋁箔上會打出許多的小凹洞但破損面積很小，而水則反之。

水在攝氏 20 度時 72.75 (達因/釐米)

酒精在攝氏 20 度時 22.55 (達因/釐米)

$$P_c = 0.8(\log \eta + 5)$$

酒精的黏滯係數在攝氏 25 度 1.873×10^{-3} [N*s/m²]

水的黏滯係數在攝氏 25 度 0.890×10^{-3} [N*s/m²]

照樣，由上式也可得相同的結論

4-5-2 鋁箔的破壞性實驗

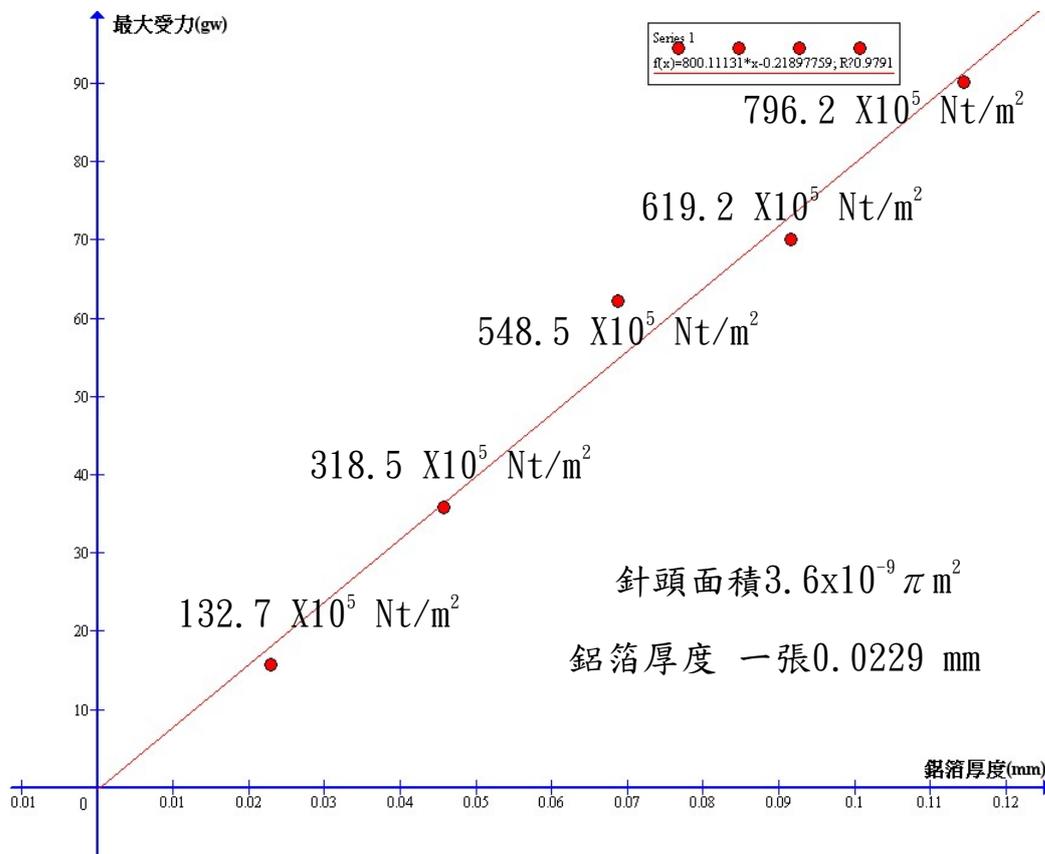


圖 36 鋁箔破損壓力臨界值

$$P = \rho c V_j$$

P 為噴流壓力， ρ 為液體密度， c 為聲速， V_j 為噴流速度

假設穿透鋁箔的壓力為 132.7×10^5 ，利用上式，

$$132.7 \times 10^5 = 1000 \times 1500 \times V_j$$

$$V_j = 8.84 \text{ m/s}$$

圖 26 音壓與鋁箔破損位置對照圖

由此就可約略推估噴流的速度及氣體的動能。

4-5-3 空蝕氣泡成長實驗

水中放置蠟紙固定一段時間觀察氣泡的成長

(水)

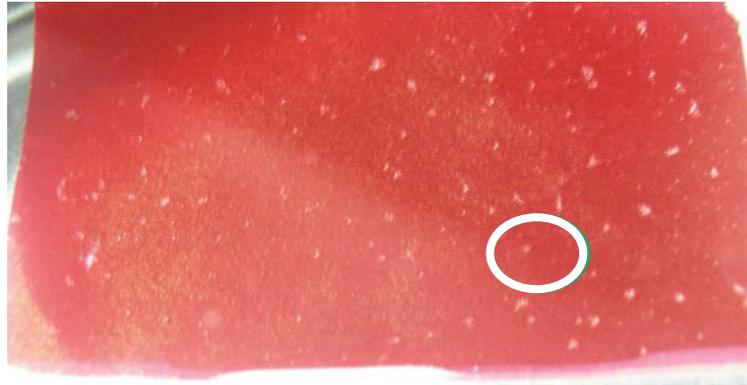


圖 37-1 超聲波震盪一分鐘

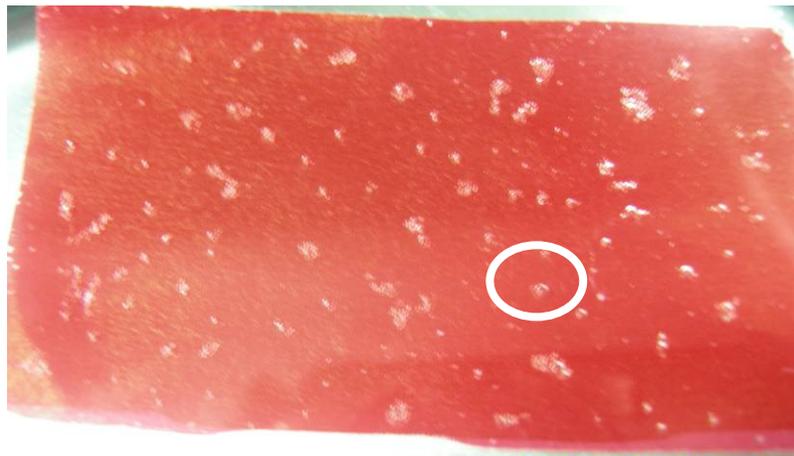


圖 37-2 超聲波震盪二分鐘

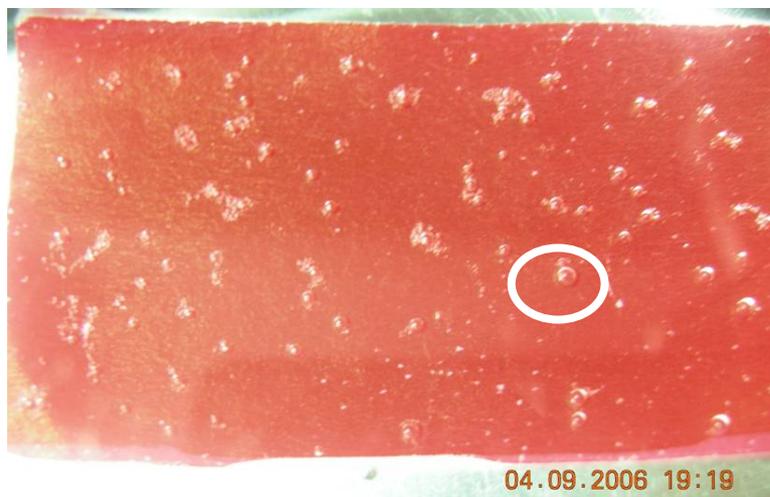


圖 37-3 超聲波震盪三分鐘



圖 37-4 超聲波震盪四分鐘

藉由異質成核的原理，氣泡會因表面的不平滑及雜質，較易形成氣泡，在本實驗利用蠟紙粗糙的表面，使氣泡較穩定的成長。

由這些圖可看出空蝕氣泡的成長

另外，更改液體的種類，如酒精，發現氣泡大量冒出，不需藉著蠟紙即可成長，且成長的速度極快，數量極多，其攝影機無法拍攝。

討論

- (一) 鋁箔為氧化鋁的延展物，又因超聲波的存在，使水跑出一個氫的自由基 $H_2O \rightarrow HO \cdot + \cdot H$ 加上自來水有氯又與氫的自由基作用形成鹽酸，使整體 pH 值下降，而鋁為兩性金屬碰到酸檢都有侵蝕的效果會有一點的誤差，但不影響整體結果。
- (二) 要使圓管內的進行波為一平面波，由文獻得知，管長至少要半徑的三倍。
- (三) 在聲光效應實驗中，有試過測量甘油的聲速，因為甘油的黏滯性太大，所使用的超聲波振動子無法使它產生聲光效應，所以必須另尋高頻、高功率的振動子。
- (四) 聲光效應實驗中，測量聲音在水、和酒精中聲速，誤差值均小於 5%，非常準確。推測造成誤差的原因如下
1. 屏幕上的條紋會些微晃動
 2. 水溫
- (五) 容器內因空蝕現象產生些微氣泡，使雷射光發散。
- (六) 空蝕現象較難形成的液體可用異質成核的方法，觀察其氣泡的成長。

第五章 結論

結論

- (一) 可藉由駐波法、聲光效應等，以簡單實驗來精確的測量聲音在水中的速度。
- (二) 聲光效應在屏幕上產生的暗紋間距和屏幕與狹縫的距離成正比，且可以推算出聲波波長。
- (三) 超聲波的衰減和水位高低有關、液體的蒸氣壓、表面張力有關，水位大於 $1/2$ 波長時，因有駐波產生，空蝕現象增強；蒸氣壓越高，表面張力越小，越容易產生空蝕，超聲波的強度增強。
- (四) 可藉由鋁箔外力破壞實驗，約略推測出液中氣泡噴流速度。
- (五) 空蝕現象氣泡成長的快慢與生成的數量與液體的表面張力與蒸氣壓有關。

參考文獻

- [1]吳明德，超聲波之光彈測試與辨析，國立成功大學碩士論文，民國 79 年
- [2]吳俊賢，聲光可調式濾波器的極化狀態及群速延遲的理論與實驗分析，國立台灣大學碩士論文，民國 94 年
- [3]高三物理參考書，南一版
- [4]左卷健男、瀧川洋二，愛上物理實驗課，世茂出版有限公司，民國 94 年
- [5]劉萬能，應力實驗報告，民國 94 年
- [6]鄭振東，超音波工程學，全華科技圖書公司，民國 88 年
- [7]馬科斯·玻恩、埃米爾·沃耳夫，光學原理，電子工業出版社
- [8]Kundt' s tube:
http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/acoustics/effects_of_sound/kundts_tube.html
- [9] 中國大百科智慧藏
<http://lib4.cma.edu.tw/cpedia/Content.asp?ID=37610>
- [10]施登士，鑄造鋁合金氧化磨的超音波檢測，行政院國家科學委員會補助專題研究計劃成果發表，民國 91 年
- [11]應崇福，超聲學，科學出版社，民國 79 年

評語

實驗觀察非常仔細，數據分析過程亦很符合科學過程技能。可惜結論過於雜亂，希望以後能儘量化繁為簡，釐清基本物理。