

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	160024
參展科別	物理與天文學
作品名稱	腔體共振與開孔氣流的探討
得獎獎項	四等獎

就讀學校	國立彰化高級中學
指導教師	賴維銘
作者姓名	吳炯毅

關鍵詞	<u>氣流、共振、頻率</u>
-----	-----------------

作者簡介



大家好我是吳炯毅，就讀彰化高中數理資優班。我喜歡探討各式各樣的物理現象，很高興能夠在高中接觸到科展並開始獨立研究，感謝賴維銘老師的指導與家人的支持，讓我能夠進入台灣國際科展！

2025 年台灣國際科學展覽會
研究報告

科 別： 物理與天文學

作品名稱：腔體共振與開孔氣流的探討

關 鍵 詞：氣流 、共振 、 頻率

摘要

本研究探討聲音共振引起腔體開口處氣流噴出的現象。實驗通過揚聲器播放聲音，使固定的錐形瓶產生共振，並改變聲音頻率、聲音強度及腔體參數（體積、瓶口截面積、瓶頸長度）分析氣流的形成原理與機制。腔體非共振情況下，腔體內外氣壓的振幅差較小，且存在相位差，此時開口處並未測得氣流；而在共振時，腔體內氣壓振幅顯著增加，導致開口處出現氣流且流速達到峰值。而流速峰值頻率與腔體幾何參數的關係符合修正後的亥姆霍茲共振公式，其中瓶頸有效長度應為 $L+1.45D$ 。此外，氣流形態受衝程比 L/D 影響，當衝程比小於 0.1 時，氣體噴出後容易被重新吸回腔體，無法形成噴流；而衝程比大於 0.4 時，噴出氣流形成穩定的不連續渦流環，即合成噴流；在 0.1 至 0.4 之間時，氣流形態處於過渡狀態。本研究為聲能轉動能方面提供新的研究途徑，並有進階研究的可能性。

Abstract

This study is conducted through an experimental method to explore the phenomenon of airflow at an opening due to Helmholtz resonance. A speaker is used in the experiment to generate sound, causing a fixed erlenmeyer flask to resonate. The experiment analyzes the formation principles and mechanisms of airflow by changing the sound frequency and cavity parameters (cavity volume, cross-sectional area, neck length).

when the cavity is not in resonance, the difference in air pressure amplitude inside and outside the cavity is small, and there is a phase difference. However, when the cavity is in resonance, the air pressure inside cavity increases significantly, and the phase difference disappears, leading to a peak in airflow speed. The relationship between the sound frequency at peak airflow speed and the geometric parameters of the cavity corresponds to the corrected Helmholtz resonance equation, where the effective length of neck should be corrected as $L_0+1.45D$ (end correction). Additionally, airflow patterns are related to the stroke ratio (L/D), When the stroke ratio is less than 0.1, air is easily drawn back into the cavity, preventing the formation of a jet. In contrast, when the stroke ratio exceeds 0.4, vortex rings are formed, result in a synthetic jet. When the stroke ratio is between 0.1 to 0.4, airflow is in a transitional state.

This study offers a new approach to understanding the transformation of sound energy into kinetic energy and holds potential for further advanced research.

壹、研究動機

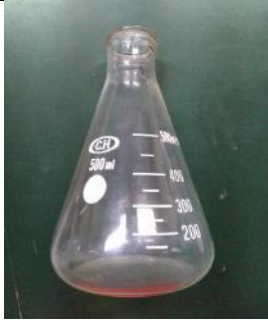
在一次實驗中，我偶然發現當手機播放聲音時，出聲口會釋放出一股微弱的氣流。這一現象引起了我的興趣，經過查詢文獻後發現，這個現象與腔體和聲音的共振有關，這讓我開始好奇：在一個腔體旁播放聲音時，是否也會在腔體開口處產生噴流的現象？然而，關於這一現象的文獻較為稀少，因此本研究想探討腔體共振時產生氣流的原理為何？氣流的型態是什麼？而又有什麼因素會對氣流產生影響？

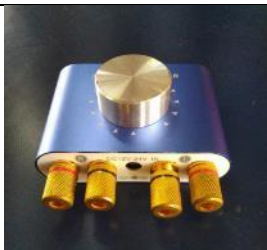
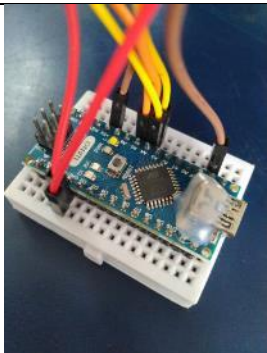
貳、研究目的

- 一、探討腔體共振時產生氣流的原理及其形成條件。
- 二、分析不同變因（如腔體參數與外部聲音條件）對氣流流速和氣流形態的影響。

參、研究設備及器材

一、表(一) 研究設備

編號	設備名稱	用途	圖示
1	玻璃錐形瓶	實驗本體	
2	塞子	透過不同塞子改變錐形瓶之瓶頸長度與瓶口口徑。	
3	揚聲器	播放聲音驅動錐形瓶噴出氣流	

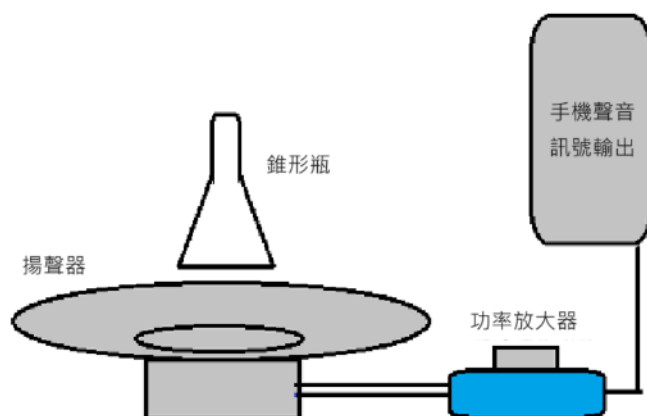
4	可調式功率放大器	調整揚聲器撥出之聲音強度	
5	熱敏式風速儀	測量錐形瓶噴出氣流之速度	
6	腳架	架設錐形瓶於揚聲器上方	
7	高速攝影機	拍攝錐形瓶所噴出之氣流型態	
8	bmp280 溫濕壓感測模組	測量錐形瓶內外壓力振幅	
9	arduino nano 板	接收 bmp280 回傳的訊號	

10	軟體 soundcard scope	搭配麥克風測量腔體內外氣壓相位差	
11	軟體 phyphox	聲音訊號輸出	
12	軟體 arduino IDE	編寫 arduino 模組軟體程式	
13	軟體 Spectroid	測量腔體共振頻率	
14	軟體 Tracker	追蹤氣體運動狀態	

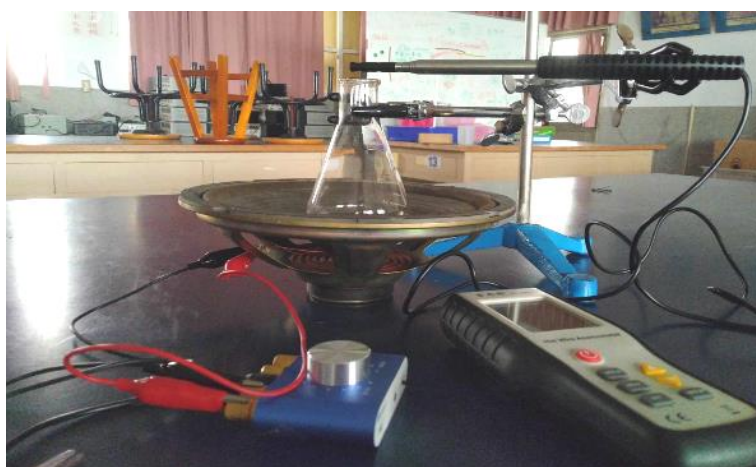
(以上照片為作者自行拍攝，軟體圖示取自官網)

二、實驗裝置製作

- (一)、將揚聲器朝上放置於桌上
- (二)、將揚聲器連接至功率放大器與手機
- (三)、將玻璃錐形瓶固定於揚聲器上方
- (四)、依實驗不同裝設不同感測儀器



圖(一)實驗裝置示意圖(作者自行繪製)



圖(二)實際實驗裝置(作者自行拍攝)

壹、研究過程或方法

一、文獻探討

在查詢與腔體噴出氣流相關的資料時，近乎所有資料都表示此現象與腔體共振有關，而腔體共振可經由亥姆霍茲共振公式描述，以下為亥姆霍茲共振公式概述。

亥姆霍茲共振公式

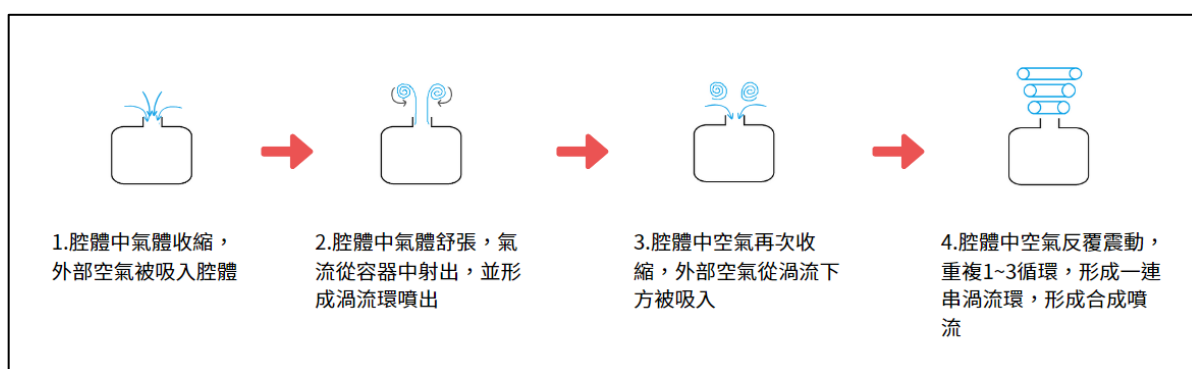
每個容器（腔體）都有本身的自然共振頻率，其與容器本身形狀有關。當一剛體容器共振時，容器內氣體的震動過程非常快速，因此可視為絕熱過程，根據絕熱過程之特性，可以推導出腔體共振之頻率公式：（ f 為共振頻率； c 為音速； A 為瓶口截面積； V 為容器體積； L 為瓶頸頸長）

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL}}$$

然而僅有亥姆霍茲共振公式並不足以解釋為何腔體共振時會噴出一股氣流，因此在查詢許多中外論文研究後，我發現腔體噴出氣流的現象與合成氣流兩者在理論上有許多相似之處，以下是合成氣流之概述。

合成氣流

當腔體振動時，腔體內的氣體會進行周期性的收縮與舒張。在腔體內氣體收縮時，外部氣體會被吸入腔體中；而當氣體舒張時，則會從腔體開口噴出，形成渦流環。接著，腔體內的氣體再次收縮，此時渦流環尚未完全脫離瓶口，外部氣體因此被迫從渦流環下方進入腔體，使渦流環與開口分離，形成了環狀的渦流噴流。這樣的過程完成一周期循環。腔體的週期性震動會產生一系列連續的渦流環，而這些連續的渦流環組成的噴流即為合成氣流(synthetic jet)。



圖(三)合成氣流形成過程示意圖(作者自行繪製)

然而我發現關於合成氣流的研究中大部分都是使用合成氣流致動器(synthetic jet actuators)藉由震動膜直接改變腔體內的體積與氣壓，進而產生合成氣流，甚少有以聲音共振這種未接觸方式導致腔體中噴出合成氣流的研究。因此在本研究中，會著重探討腔體與聲音共振產生合成氣流。

二、研究方法

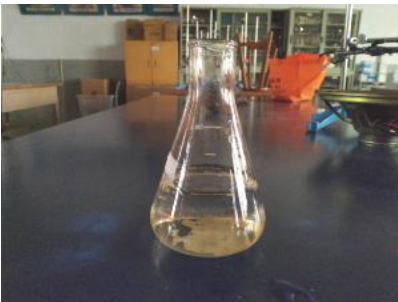
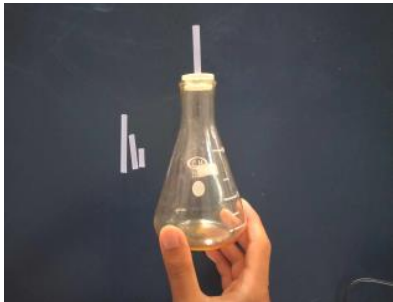
(一)、噴流流速與聲音頻率間關係

改變揚聲器輸出聲音的頻率，使用熱敏式風速儀測量腔體噴出氣流流速的變化。

(二)、噴流流速與腔體幾何參數間關係

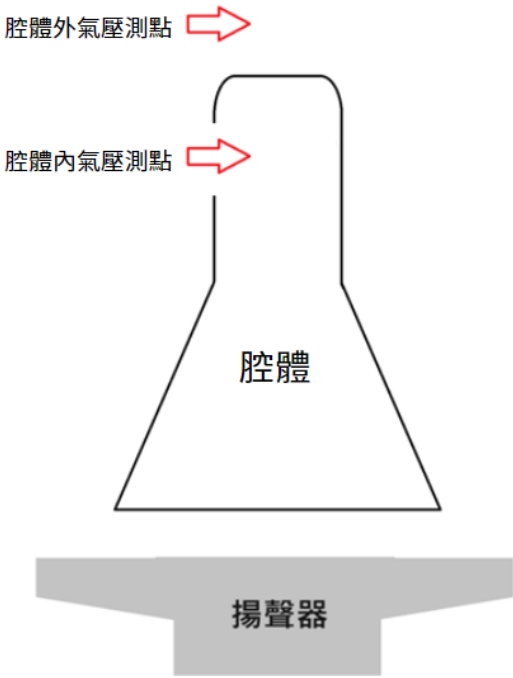
改變腔體幾何參數，使用熱敏式風速儀測量腔體噴出氣流流速的變化。由於幾何參數同時會影響腔體的自然共振頻率，因此實驗中會同時將腔體幾何參數與外界的聲音頻率作為操縱變因，以噴流流速作為應變變因，分析三者之關係。本實驗中的幾何參數為亥姆霍茲方程中腔體體積 V 、瓶頸頸長 L 、瓶口截面積 A 三項變因，由於音速在實驗環境中改變甚小，所以本實驗暫不討論。

表(二) 改變容器參數方式(照片為作者自行拍攝)

容器體積 V	瓶口截面積 A	瓶頸頸長 L
		
在容器中裝水模擬體積變化	透過不同口徑的塞子模擬瓶口截面積的變化	透過吸管模擬瓶頸頸長變化

(三)、腔體內外氣壓與噴流間關係

1. 使用軟體 soundcard scope 搭配麥克風測量在共振與非共振時腔體內外氣壓隨時間變化。
2. 在腔體開口內外裝設 bmp280 感測器(位置如圖(四))，並改變揚聲器輸出的聲音強度，測量腔體內外壓力振幅差與腔體噴出氣流流速間關係。



圖(四)壓力感測器放置位置

(作者自行繪製)

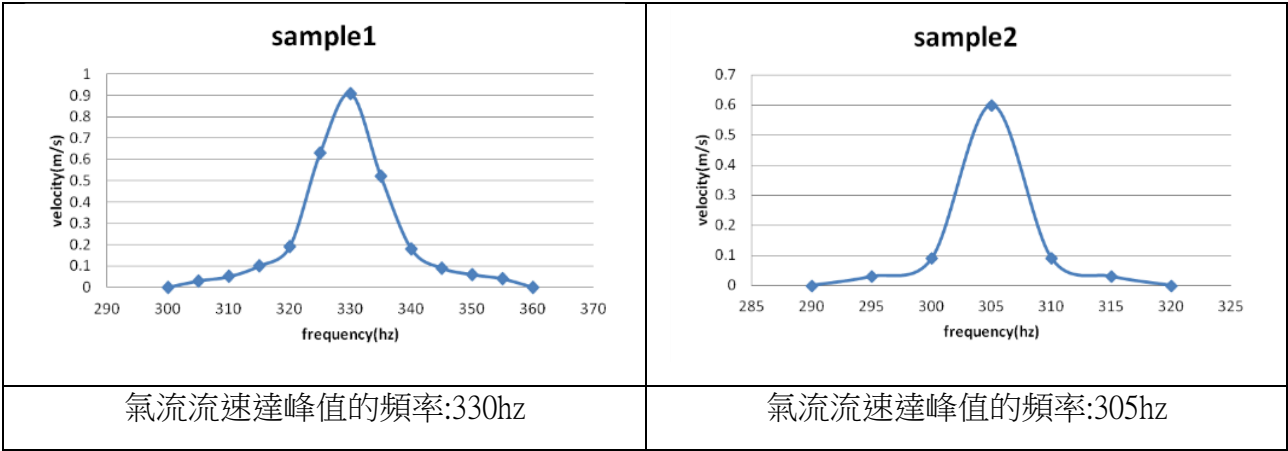
(四)、噴流型態觀察

將煙霧注入腔體作為追蹤粒子，並通過撥放聲音使腔體共振，隨後使用高速攝影機拍攝腔體共振時開口處的氣體運動，通過慢速影像分析氣流之型態。

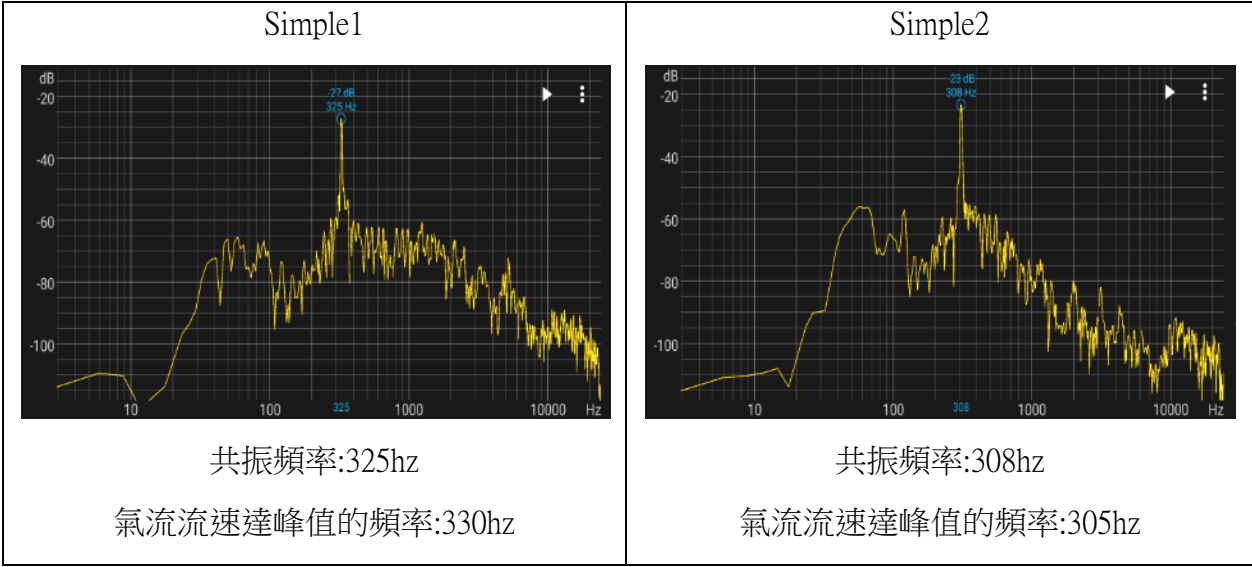
三、研究結果與討論

一、 探討噴流流速與聲音頻率間關係

本實驗使用兩個錐形瓶進行測量，從表(三)兩個數據結果可知當外界聲音頻率為某一特定值時，噴出氣流流速值達峰值，離此頻率越遠，流速會急速下降。因此合理推測此頻率即是亥姆霍茲共振頻率(以下簡稱共振頻率)，表(四)測量共振頻率並與實驗數據進行比對來驗證此猜想。發現噴流流速達峰值時所對應到的聲音頻率與腔體共振頻率近乎吻合，兩樣本中都得到相同的結果，因此合理推測，當外加聲音之頻率為腔體共振頻率時，噴流流速會達最大值。



表(三)氣流流速與聲音關係圖(作者使用 excel 自行繪製)

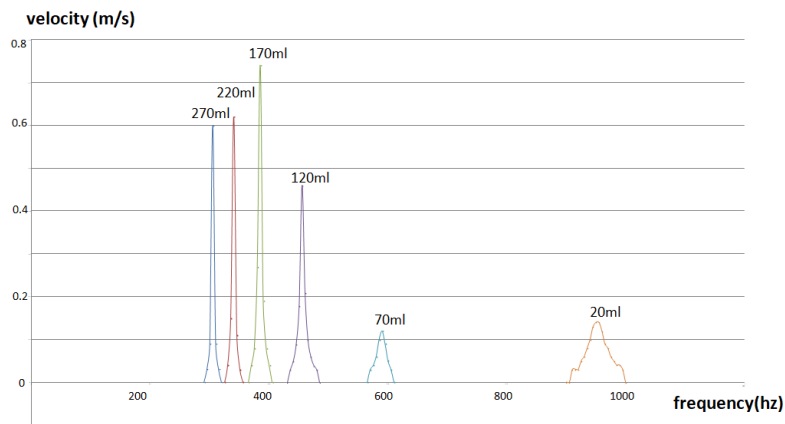


表(四)腔體共振頻率與數據比對(作者自行量測)

二、 噴流流速與腔體幾何參數間關係

圖(五)~圖(七)為同時改變腔體參數與聲音頻率，測量開口處噴流流速變化。經實驗結果可看出，不同腔體幾何參數下，皆可發現流速會在某頻率時出現峰值，根據上文所推得之結論，可知即為不同腔體幾何參數下的腔體共振頻率。

(一)、改變腔體體積 V

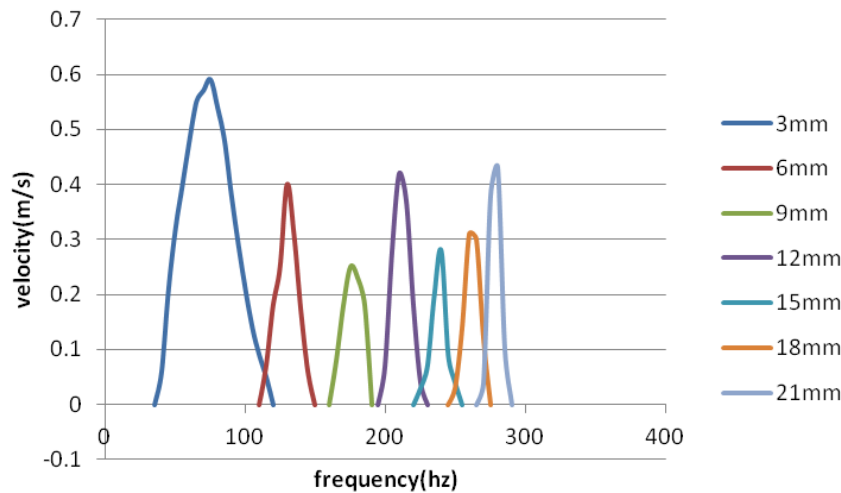


圖(五)不同體積下聲音頻率與噴流流速關係圖
(作者使用 excel 自行繪製)

表(五)腔體體積與流速峰值頻率關係

體積(ml)	20	70	120	170	220	270
流速峰值頻率(hz)	955	590	455	385	340	305

(二)、改變瓶口口徑

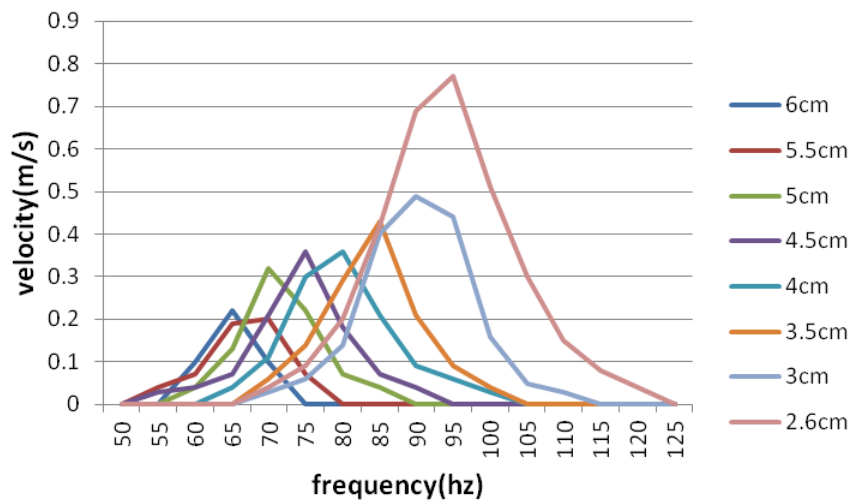


圖(六)不同瓶口口徑下聲音頻率與噴流流速關係圖
(作者使用 excel 自行繪製)

表(六)腔體口徑與噴流流速峰值頻率關係

口徑(mm)	3	6	9	12	15	18	21
流速峰值頻率(hz)	75	130	175	210	240	260	280

(三)、改變瓶頸頸長 L



圖(七)不同瓶頸頸長下聲音頻率與噴流流速關係圖

(作者使用 excel 自行繪製)

表(七)瓶頸頸長與噴流流速峰值頻率關係

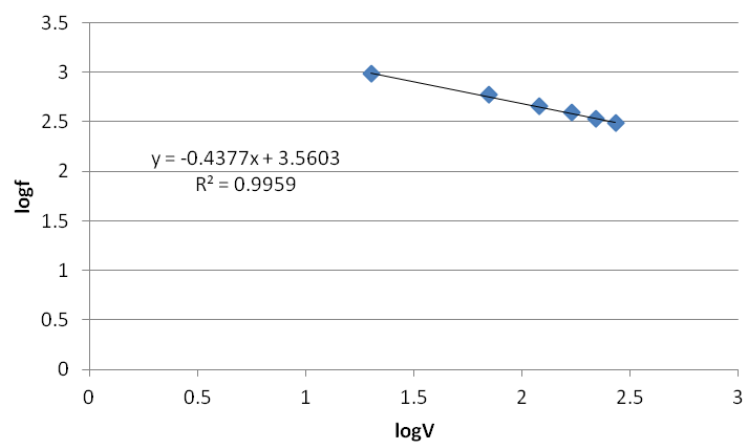
頸長(cm)	6	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.6
流速峰值頻率(hz)	65	70	70	75	80	85	90	95

我們推測這個現象與亥姆霍茲共振公式有關，因此以下導入兩端同取 log 的亥姆霍茲共振公式以分析腔體各參數與共振頻率之關係：

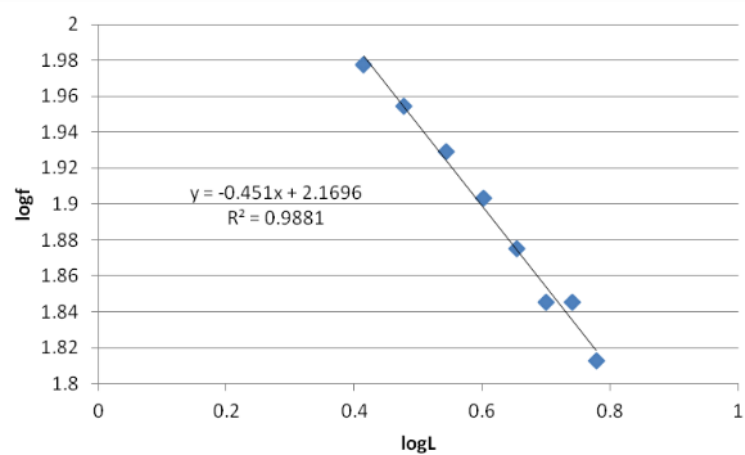
$$\log f = \log c - \log(2\pi) + \frac{1}{2}\log A - \frac{1}{2}\log V - \frac{1}{2}\log L$$

由上式可知 $\log f$ 與 $\log A$ 呈斜率為 $\frac{1}{2}$ 的線性關係；與 $\log L$ 、 $\log V$ 呈斜率為 $-\frac{1}{2}$ 的線性關係。

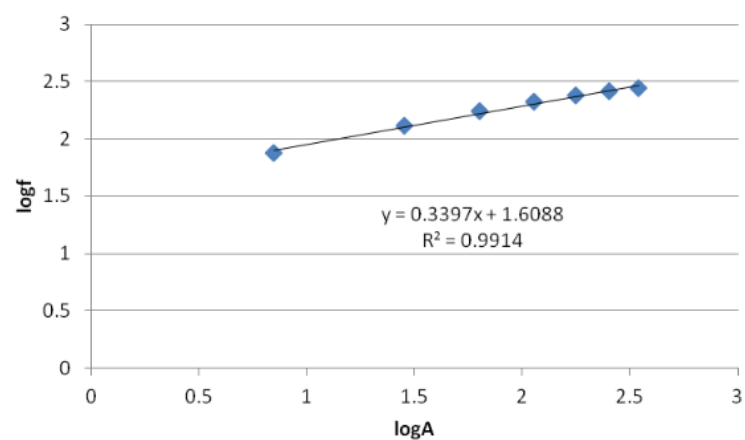
由圖(八)、圖(九)、圖(十)可看出 $\log(V) - \log(f)$ 圖斜率值約為 -0.44，接近公式中的理論值 -0.5； $\log(L) - \log(f)$ 圖斜率值為 -0.45，接近公式中的理論值 -0.5；然而 $\log(A) - \log(f)$ 圖斜率值為 0.33，與理論值 0.5 有較大的偏差。



圖(八) $\log(V)$ - $\log(f)$ 圖
(作者使用 excel 自行繪製)



圖(九) $\log(L)$ - $\log(f)$ 圖
(作者使用 excel 自行繪製)



圖(十) $\log(A)$ - $\log(f)$ 圖
(作者使用 excel 自行繪製)

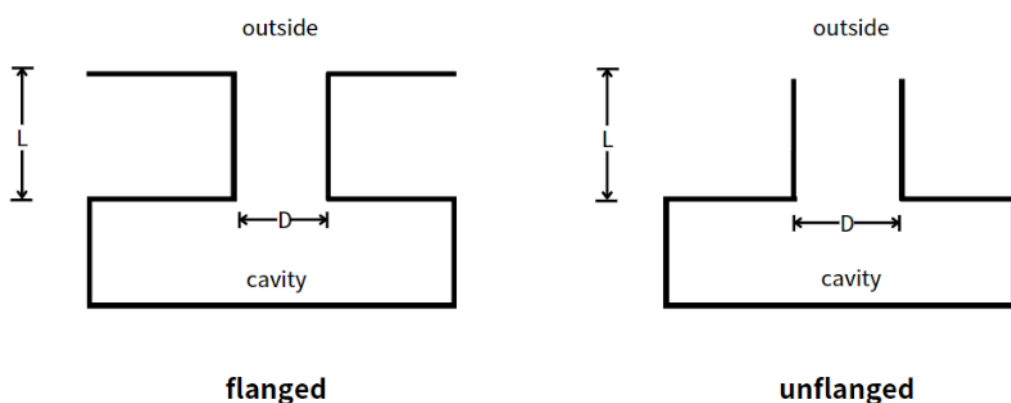
經過文獻的查詢後，發現造成偏差的原因在於亥姆霍茲公式中頸長項 L 需進行修正 (end correction)，當腔體共振時，瓶頸兩端外有些許空氣隨瓶頸內空氣柱震動，因此公式中的有效頸長(effective length)大於原始頸長，額外的頸長增加取決於瓶口口徑。修正方式如下：

無凸緣 (Unflanged) : $L=L_0+(0.85+0.6)D$

有凸緣 (Flanged) : $L=L_0+(0.85+0.85)D$

在腔體共振時瓶頸處震動的空氣柱其中 L_0 為原始頸長； D 為瓶口直徑，由於本實驗使用的腔體開口處非凸緣，故原式應改寫為：

$$\log f = \frac{1}{2} \log A - \frac{1}{2} \log (L_0 + 1.45D) - \frac{1}{2} \log V + \log c - \log (2\pi)$$



圖(十一) 腔體開口處凸緣與凹緣示意圖(作者自行繪製)

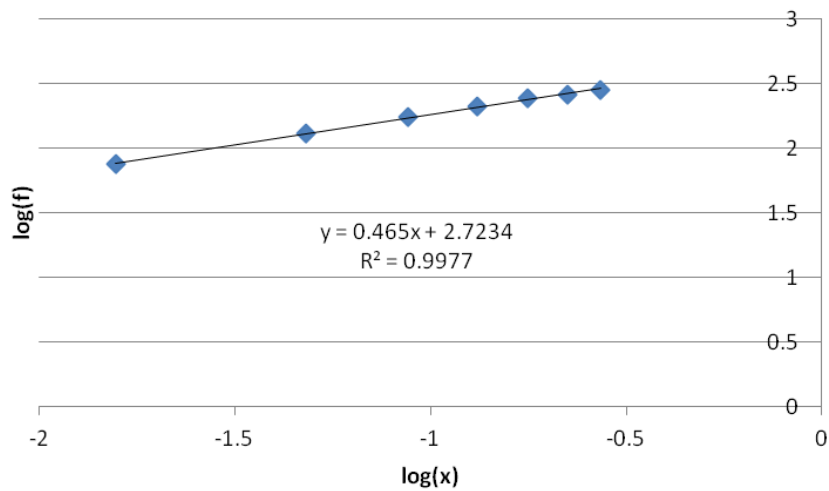
將 A 可代換成 $\pi(\frac{D}{2})^2$ ，經過整理後可得：

$$\log f = \frac{1}{2} \log \left(\frac{D^2}{4(L_0 + 1.45D)} \right) - \frac{1}{2} \log V + \log c - \log (2\pi) + \frac{1}{2} \log \pi$$

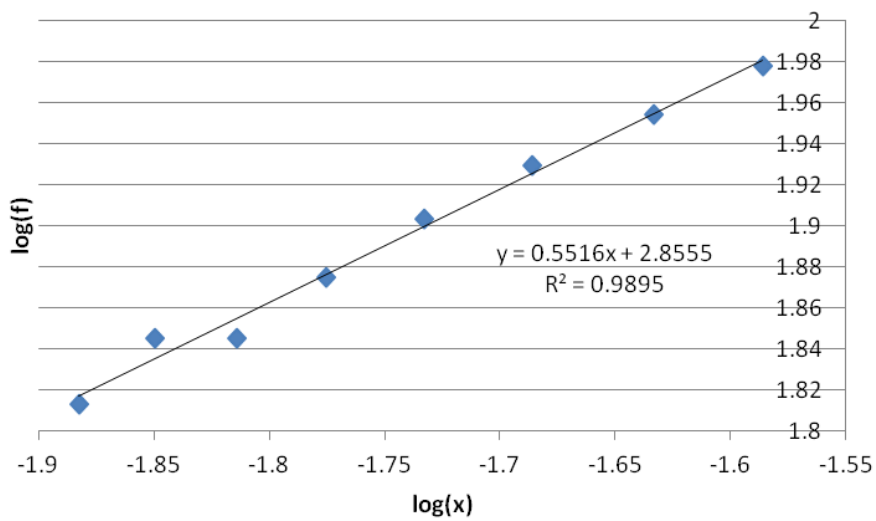
由上式可知理論上 $\log f$ 與 $\log \left(\frac{D^2}{4(L_0 + 1.45D)} \right)$ 應呈斜率為 $\frac{1}{2}$ 的線性關係(為方便表示，以下稱

$\log \left(\frac{D^2}{4(L_0 + 1.45D)} \right)$ 為 $\log x$)。圖(十二)、圖(十三)分別是改變 D 與 L_0 時 $\log x - \log(f)$ 之作圖。

從數據可知改變 D 與 L_0 時 $\log x - \log(f)$ 之作圖斜率值分別為 -0.47、0.55，儘管仍有偏差，然而兩者皆更為接近公式中的理論值。



圖(十二) 改變 D 時 $\log(x)$ - $\log(f)$ 圖
(作者使用 excel 自行繪製)



圖(十三) 改變 L_0 時 $\log(x)$ - $\log(f)$ 圖
(作者使用 excel 自行繪製)

	$\log(L)$ - $\log(f)$	$\log(A)$ - $\log(f)$
理論斜率	-0.5	0.5
實際斜率	-0.45	0.33

表(八)修正前斜率

	改變 L_0 時 $\log(x)$ - $\log(f)$	改變 D 時 $\log(x)$ - $\log(f)$
理論斜率	-0.5	0.5
實際斜率	-0.47	0.55

表(九)修正後斜率

三、腔體內外氣壓與噴流間關係

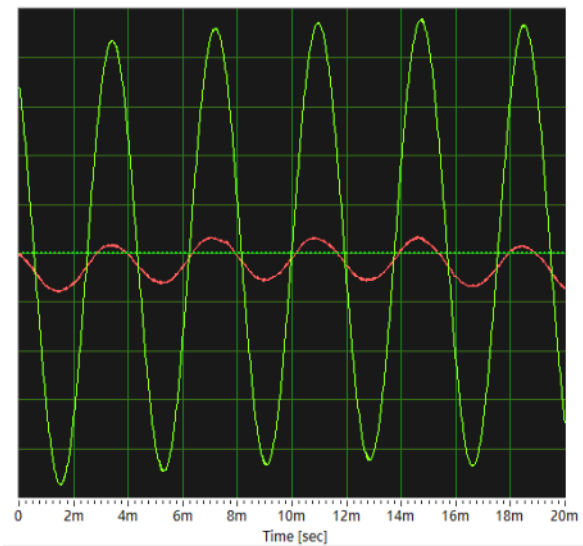
(一)、腔體內外氣壓隨時間變化

筆者推測腔體內外的壓力差是腔體共振時產生噴流的原動力，然而不清楚腔體共振時出現壓力差的原因，為此筆者提出兩種可能的猜想：

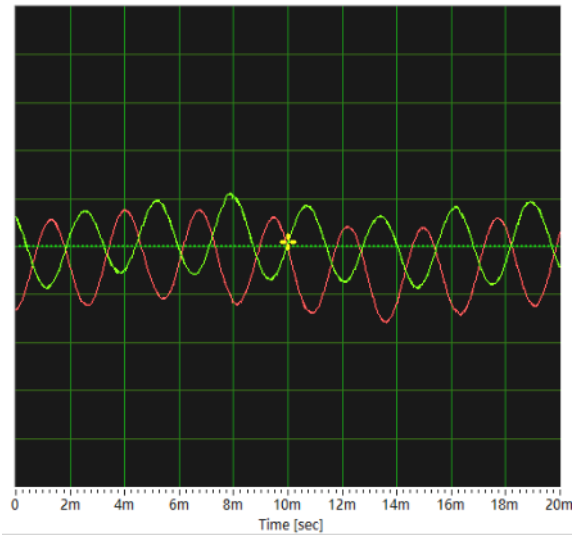
1. 共振時腔體內外氣壓波的相位差導致出現壓力差
2. 共振時腔體內外氣壓波的振幅差導致出現壓力差

以下以實驗驗證哪一個猜想是正確的，圖(十四)為測量所得腔體在共振與非共振時內外氣壓隨時間變化圖。(橫軸為時間，綠線代表腔體內氣壓，紅線代表腔體外氣壓)從數據中可知腔體內外氣壓值皆隨聲音反覆震盪，經計算後發現，其震盪頻率與揚聲器撥放聲音頻率相符。在腔體共振時腔體內氣壓振幅遠大於腔體外氣壓振幅，且幾乎沒有相位差，然而腔體未共振時內外氣壓振幅差距不大，且會出現相位差。從實驗結果可以看出，腔體共振時極大的內外氣壓振幅差是產生噴流的成因，而非兩者間的相位差。

圖(十四)氣壓隨時間震盪圖(作者自行量測)
橫軸為時間，綠線代表腔體內氣壓，紅線代表腔體外氣壓



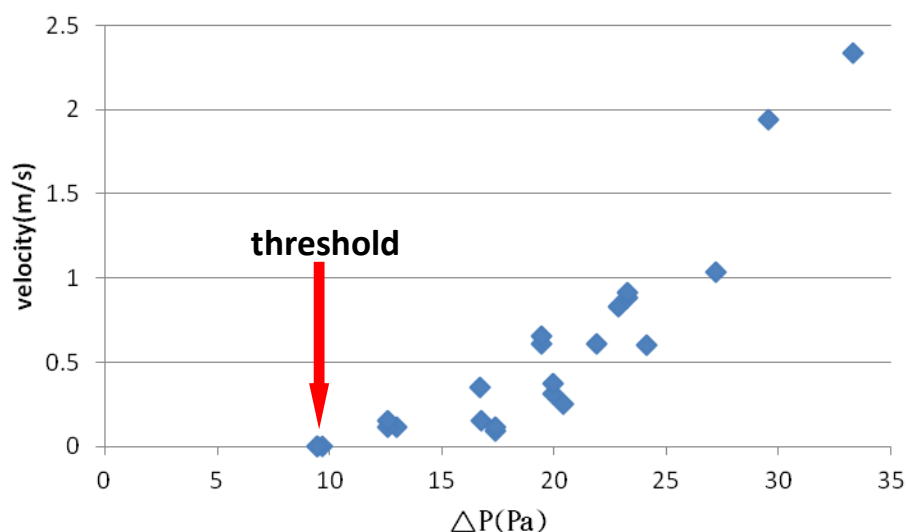
腔體共振時



腔體未共振時

(二)、腔體內外氣壓振幅差與噴流流速關係

從前面的實驗結果可以得知，腔體在共振時內外氣壓皆為同相的正弦波，故腔體內外的氣壓差亦為一正弦波，圖(十五)為腔體內外氣壓差的振幅與噴流流速間關係圖。可發現當內外氣壓振幅差達到一閾值時(threshold)，噴流會突然出現，並隨氣壓振幅差上升持續增加。



圖(十五)腔體內外氣壓振幅差與噴流流速關係圖
(作者使用 excel 自行繪製)

四、 氣流噴出型態觀察

為了解腔體共振時氣流噴出的型態，實驗中以煙霧作為追蹤粒子，使用了高速攝影機拍攝了腔體開口處的流場變化。觀察實驗所拍攝到的影像後，可發現當腔體與聲音共振時，會出現兩種氣體運動型態。

(一)、氣體噴出型(合成氣流)

當腔體內外氣壓差較大，而共振頻率較低時，氣流起初從開口處筆直噴出，隨後氣流前端向外捲起，形成蕈狀的噴流環，完成一個週期如圖(十六)。而從所錄製到噴出氣流與揚聲器同框的影片中，發現此氣流噴出週期與揚聲器鼓膜震動週期同步，因此氣流噴出頻率相當於聲音頻率。綜合上述的觀察，噴出氣流的機制與文獻中描述的合成氣流的噴出模式相符。因此可以推斷此型態即為合成氣流。圖(十七)~ 圖(十九)



圖(十六)噴出型氣流影像(作者自行拍攝)

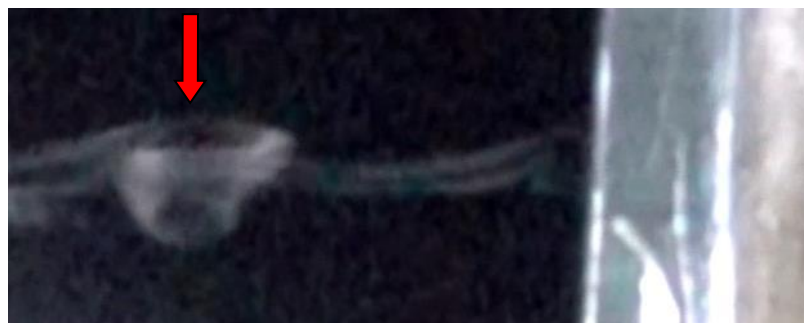
噴出型氣流一週期形成過程(作者自行拍攝)



圖(十七)氣體噴出腔體



圖(十八)噴流尖端開始捲曲



圖(十九)末端脫離腔體，形成渦流環

(二)、氣體未噴出型(震盪型)

當腔體內外氣壓差較小，而共振頻率較高時，氣流在噴出階段仍然會從腔體開口處噴出，然而在吸入階段會重新被吸入腔體中，進而反覆進行簡諧震盪，不會有合成氣流噴出。圖(二十)~ 圖(二十二)



圖(二十)初始狀態



圖(二十一)噴出階段，氣體向外衝出



圖(二十二)吸入階段，氣體重新被吸入

(三)、結果討論

我們很好奇是否有一個參數可以描述腔體開口處噴流型態的變化，在查詢相關文獻後，整理出了幾個可能的無因次參數，包括衝程比 (Stroke Ratio)、雷諾數 (Re)、和斯特勞哈爾數 (St)。基於這些參數進行了實驗，改變聲音頻率、口徑、聲音強度，並利用影像分析氣體衝程、噴出時的最大速率，比較不同參數對氣流型態的影響程度。結果顯示，衝程比對氣流運動型態的影響最為顯著，如(表八)。

衝程比 L/D 為噴出氣體的衝程 L 與口徑 D 的比值。其中衝程為氣體在噴出階段向外移動的距離，可表示為：

$$L = \int_0^T \frac{1}{2} v(t) dt$$

$v(t)$ 為開口處氣體瞬時運動速度。從實驗中我們發現衝程與聲音頻率呈負相關、與腔體內外氣壓差呈正相關。

表(八)衝程比與氣流型態關係

(N：氣流震盪型、M：過渡型、Y：合成氣流)

口徑 D(m)	衝程 L(m)	衝程比 L/D	氣流型態
0.0090	0.00064	0.071	N
0.0120	0.00098	0.082	N
0.0063	0.00056	0.089	N
0.0090	0.00095	0.106	N
0.0120	0.00131	0.109	M
0.0090	0.00159	0.177	M
0.0063	0.00119	0.189	M
0.0120	0.00230	0.192	M
0.0120	0.00262	0.218	M
0.0090	0.00220	0.244	M
0.0120	0.00295	0.246	M
0.0063	0.00157	0.250	Y
0.0060	0.00155	0.258	M
0.0090	0.00238	0.264	M
0.0090	0.00254	0.282	M
0.0063	0.00180	0.286	Y
0.0063	0.00189	0.301	Y
0.0063	0.00192	0.304	Y
0.0060	0.00186	0.310	M
0.0063	0.00205	0.325	Y
0.0063	0.00219	0.347	Y
0.0063	0.00220	0.349	Y
0.0063	0.00227	0.360	Y
0.0063	0.00235	0.372	M
0.0060	0.00248	0.413	M
0.0063	0.00264	0.418	Y
0.0063	0.00296	0.470	Y
0.0063	0.00326	0.517	Y
0.0063	0.00328	0.520	Y
0.0060	0.00387	0.645	Y
0.0060	0.00459	0.764	Y
0.0060	0.00535	0.891	Y
0.0060	0.00537	0.895	Y
0.0060	0.00674	1.123	Y
0.0030	0.00799	2.663	Y
0.0030	0.00980	3.265	Y
0.0030	0.01109	3.696	Y
0.0030	0.01199	3.995	Y

從表(八)可以觀察到，衝程比與氣流型態之間有明顯的關聯性。當衝程比在 0 至 0.1 範圍時，氣流噴出距離較短，容易在吸入階段被重新吸回腔體，無法形成噴流，而是在瓶口處震盪；而當衝程比大於 0.4 時，因氣流噴出距離的增加，不易被吸回，開始形成穩定合成氣流。

然而當衝程比介於約 0.1 至 0.4 之間時，氣流呈現不穩定的過渡狀態，有時形成合成氣流，有時在合成氣流與震盪型間不斷變換。

四、結論

一、氣流產生成因

當外部聲音作用於腔體時，腔體內外的氣壓皆呈現正弦波形式。在非共振情況下，內外氣壓的振幅皆相當的小，且兩者之間存在相位差。然而，在共振狀態下，且腔體內的氣壓振幅會突然顯著增加，且內外氣壓的相位差消失，從而導致內外氣壓差劇增。此氣壓差進一步引發腔體開口處產生氣流。氣流流速在外部聲音頻率與腔體的自然共振頻率一致時（即腔體共振）達到峰值，而當外部聲音頻率偏離共振頻率時，氣流流速則迅速下降。

二、氣流與腔體幾何參數關係

氣流流速的峰值頻率（共振頻率）與腔體的幾何參數（如腔體體積、瓶口截面積、瓶頸長度）之間的關係符合修正後的亥姆霍茲共振公式，其中瓶頸的有效長度 L 應修正為 $L_0 + 1.45D$ ，其中 L_0 為原始頸長、 D 為瓶口直徑。

三、不同衝程比下氣流型態的變化

氣流在不同條件下會以不同的形式出現，影響氣流形態的關鍵因素是衝程比 L/D （氣流衝程與開口直徑的比值）。衝程比受外部聲音強度、聲音共振頻率、腔體開口直徑等因素影響。當衝程比在不同範圍內變化時，氣流形態亦隨之改變。當衝程比處於 0 至 0.1 之間時，氣流的噴射距離較短，並容易在吸入階段被重新吸回腔體內，未形成穩定噴流，而是在瓶口處震盪；當衝程比大於 0.4 時，氣流噴射距離增加，不易被吸回，形成連續渦流環。根據分析，此種氣流型態即為合成噴流。而當衝程比介於大約 0.1 至 0.4 之間時，氣流型態處於過渡狀態，有時形成合成噴流，有時則呈現簡諧震盪。

五、未來展望

- 一、腔體內外的氣壓差與噴流流速之間的數學關係與物理意義尚未完全明確，未來希望能進一步深入探討，了解其內在機制。
- 二、在分析氣流衝程時，由於設備限制，無法同步拍攝氣流運動與測量腔體內外的壓力差。未來期望通過更新設備，深入探討腔體內外壓差與衝程之間的具體關聯性。
- 三、目前對於氣流型態的分析主要集中在近場變化，未來希望能擴展研究範圍，探討氣流離開瓶口後遠場的型態變化。

六、參考文獻資料

- 一、Ja'fari, M., Shojae, F. J., & Jaworski, A. J. (2023). Synthetic jet actuators: Overview and applications. *International Journal of Thermofluids*, 20.
- 二、Gil, P., Wilk, J., & Korzeniowski, M. (2021). Helmholtz resonance frequency of the synthetic jet actuator. *Applied Sciences*, 11, 5666.
- 三、Glezer, A., & Amitay, M. (2002). Synthetic jets. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 34, 503 – 529.
- 四、吳佑焉. (2001). 彈性荷姆霍茲共振器之分析. 國立臺灣大學機械工程系
- 五、中華民國第 50 屆中小學科學展覽會作品說明書，腔體共振之探討

【評語】160024

本研究探討聲音共振引起腔體開口處氣流噴出的現象。實驗通過揚聲器播放聲音，使固定的錐形瓶產生共振，並改變聲音頻率、聲音強度及腔體參數。結論得到氣流產生成因、氣流與腔體幾何參數關係、不同衝程比下氣流型態的變化。建議可增加樂器共振之探討，報告不疾不徐、表現優異。