

# 中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國中組 物理科

最佳團隊合作獎

030102

汽笛狂響曲

學校名稱：新北市立板橋國民中學

作者：  國二 許呈瑄  國二 陳冠宇  國二 林益民	指導老師：  莊順源
---	------------------

關鍵詞：汽笛、笛音壺、體腔共振

## 摘要

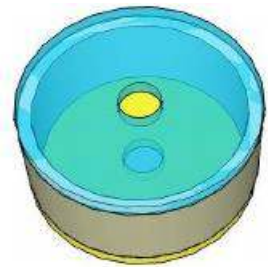
本作品探討了笛音壺汽笛的響度及音調變化的變因如下：

- (一) 風速愈大，音調愈高，響度愈大。
- (二) 出入口孔洞直徑相差 1~2mm 時響度較大。出入口直徑愈大頻率愈大，但孔洞大於 10mm 或小於 3mm 時，將難以產生共振而無法發出特定頻率之聲音。
- (三) 上下出入口位置容忍稍許的偏移，偏移量對響度影響較大。
- (四) 開孔不一定只能開一個，開孔總面積愈大響度及頻率都變大，但有其極限。
- (五) 空腔愈大響度也漸增但有上限，空腔愈大頻率愈低。

另外本研究希望能製作出有音階變化之笛音汽笛壺，我們發現以原汽笛之原理較難達到目的，我們改用哨子發聲原理來製作汽笛，其頻率變化較能達到我們的需求，我們也製作出接近我們期望的汽笛壺。

## 壹、 研究動機

茶壺能泡出好茶，但我們發現現在的茶壺不僅能泡茶，還能發出「笛音」作為警示水沸騰之用。八年級上學期的理化課程中曾經探討過聲音的三要素：頻率、響度與波形，加上看到學長們長期用心於哨子發聲原理的研究，於是我們想探討笛音壺之汽笛發聲的原理，希望製作出能發出音階變化的汽笛壺。



## 貳、 研究目的

- 一、探討笛音壺聲音的特性並自製汽笛。
- 二、探討影響笛音音調及響度的變因：
  - (一) 風速的影響。
  - (二) 孔洞的影響：(1)孔洞直徑、(2)孔洞位置對稱性、(3)孔洞數量。
  - (三) 空腔的影響：(1)空腔高、(2)空腔直徑。
- 三、笛音壺的應用：(1)製作有音高變化的笛音壺、(2)利用哨子發聲原理製作笛音壺。

## 參、 研究設備與器材

項次	名稱	項次	名稱	項次	名稱	項次	名稱
1.	壓克力板	6.	笛音壺	11.	錄音軟體	16.	雷射雕刻機
2.	水管	7.	錄音機	12.	粗麻手套	17.	桌上型電鑽
3.	散熱扇	8.	分貝計	13.	熱熔膠	18.	卡式瓦斯爐
4.	筆記型電腦	9.	風速計	14.	砂紙	19.	聲音軟體 Audacity
5.	強力膠	10.	游標尺	15.	切斷機	20.	軟木棒



## 肆、研究過程與方法

一、探討笛音壺聲音的特性並自製發聲汽笛。

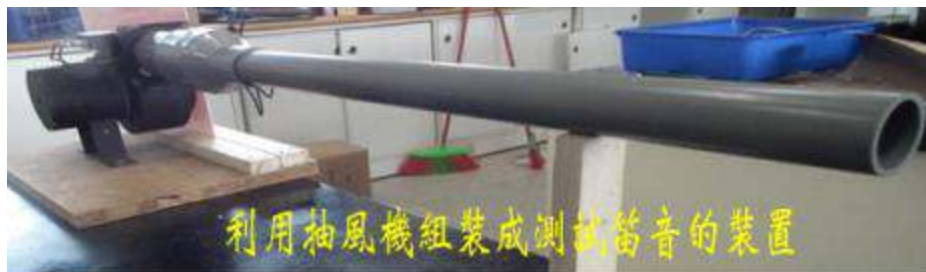
(一) 定義:為了後面討論明白, 定義笛音壺發聲孔「汽笛」各部位名稱如下圖。



凹空腔是指上蓋與下底之間的體積。之後討論都是以自製汽笛結構解釋。

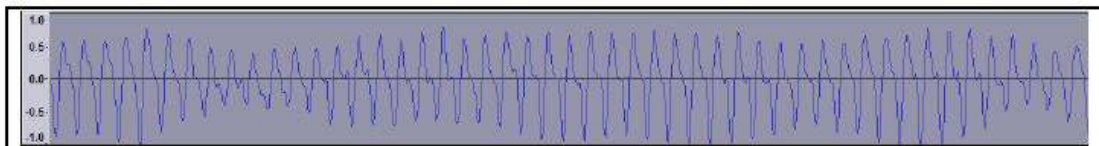
(二) 笛音壺發聲的前置

我們先前的測試發現, 笛音壺的發聲部位是他的汽笛, 而這聲音不拘限於水蒸氣的衝力, 只要是風速夠都可以發出聲音, 因此我們選用散熱扇產生的氣流來模擬水蒸氣的衝力, 好處是可以定量風力和調整風速。



(三) 笛音壺聲音的特性

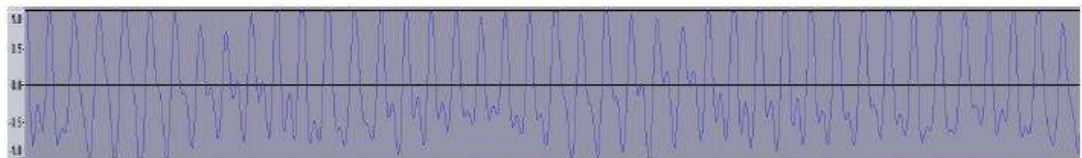
利用聲音分析軟體錄製並分析如下圖：



市面上笛音壺的波形圖



市面上笛音壺的頻譜圖



自製汽笛的波形圖



自製汽笛的頻譜圖

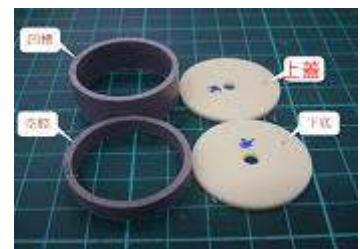
頻譜峰值上的標示數字為峰值頻率(Hz)。以上都是使用散熱扇所得實驗數據。

#### ◆ 小結論

1. 由頻譜分析可發現笛音有泛音存在，顯然有共振現象。
2. 自製汽笛與市售汽笛無太大差異，有類似的波形及頻譜，因此可以繼續採用此自製汽笛。

#### (四) 製作汽笛

1. 經過多種實驗後，我們決定以壓克力板，作為汽笛的上蓋下底，並以水管作為汽笛的空腔及凹槽。
2. 實作步驟：
  - (1) 製作頂部底部(包括孔洞):電腦繪製草圖→使用雷射雕刻機(切割需要零件)。



(2) 製作空腔及凹槽:水管以切斷機切割→利用砂紙將空腔結合面磨平。

(3) 以快乾膠黏合組件。

## 二、探討影響笛音音調及響度的變因：

### (一) 風速的影響。

1. 製作一個汽笛。

2. 利用風速計，測量散熱扇的各等級風速(藉用壓克力板擋住入風口的大小調整風量)。

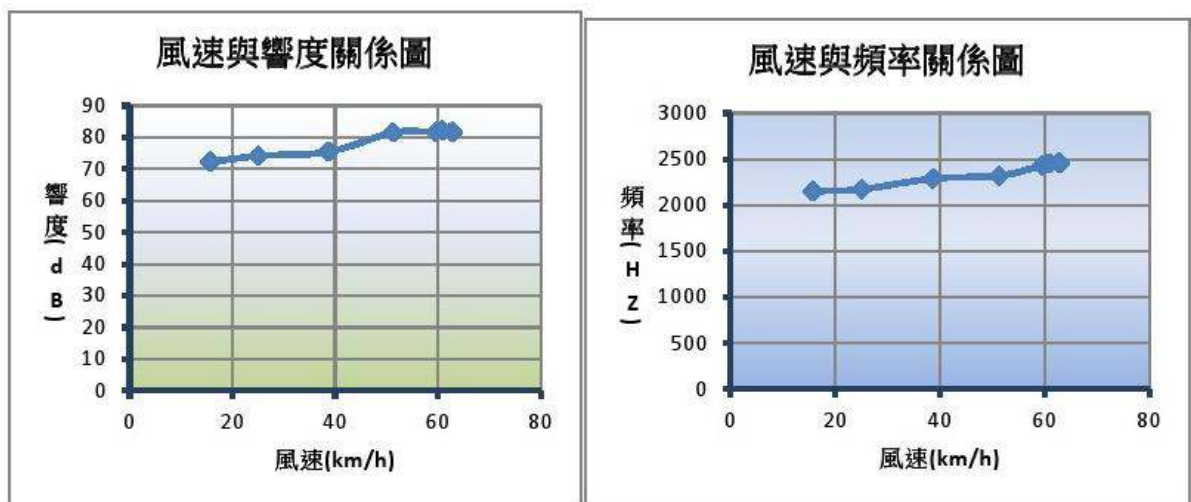
3. 將自製汽笛靠近吹風孔，吹出聲音並測量頻率與響度

註測量聲音儀器與軟體：錄音機、分貝計、筆記型電腦、Audacity。

\* 實驗結果：

汽笛發聲 風速(km/h)	響度(dB)	頻率(Hz)
15.7	72.3	2151
25	74.2	2174
38.7	75.5	2290
51.3	81.6	2321
59.6	81.7	2434
60.9	82.2	2454
62.6	81.7	2462
63	81.7	2457

註頻率是由多次檢測基音頻率後，所平均出的數據(有四捨五入至整數位)。



### 小結論：

(1) 風速大小確實影響笛音頻率和分貝，分貝是明顯上升後，到了一個值後穩定下來不增加，頻率也是持續上升到一個穩定值，可能是風速差距不夠大，比較沒有明顯的改變。

(2) 風速是造成笛音的重要關鍵，雖然能夠利用它改變聲音，但若是風太弱或是入風處不對，都會造成無法發出聲音的結果，是要多注意的地方。

(二) 孔洞的影響：作以下變因改變，分別測量頻率與響度。

1. 孔洞直徑：改變上孔洞直徑(1~9mm)，控制變因：空腔高(8mm)、空腔直徑(34mm)、下孔洞直徑(6mm)。
2. 孔洞位置對稱性：改變上蓋孔洞位置偏離中心距離(1~6mm)，控制變因：孔洞直徑(6mm)、空腔高(8mm)、空腔直徑(34mm)。
3. 孔洞數量：改變上蓋開孔數量，控制變因：下底孔洞直徑(6mm)、上蓋孔洞直徑(mm)、空腔高(4mm)、空腔直徑(34mm)。



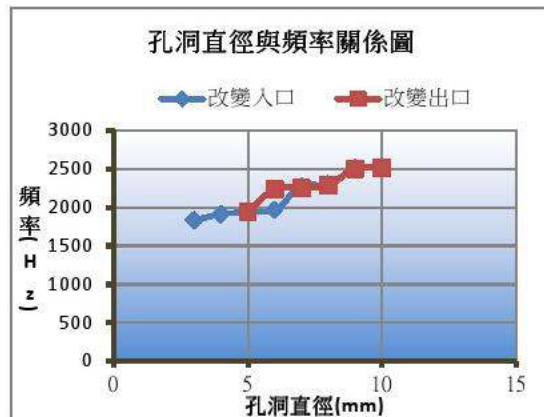
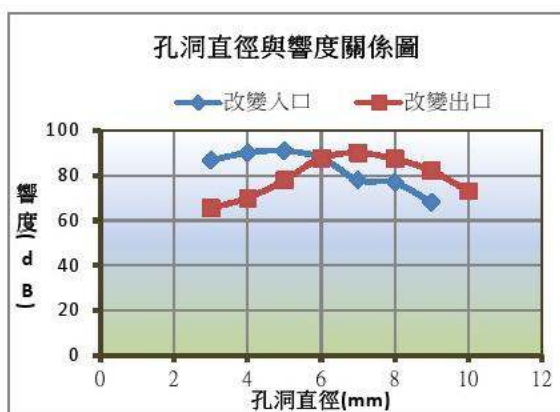
實驗結果：

1. 改變入口孔洞大小：空腔高 8mm、空腔直徑 34mm。

入口孔洞 (mm)	響度(dB)	頻率(Hz)	出口孔洞 (mm)	響度(dB)	頻率(Hz)
3	86.7	1835	3	65.5	X
4	90.1	1913	4	70	X
5	90.9	1945	5	77.9	1947 (943)
6	87.9	1971	6	87.7	2241 (1117)
7	78	2272	7	90	2255
8	76.9	2304	8	87.3	2290
9	68.1	2518	9	82.1	2505
10	X	X	10	73	2519 (1264)

括弧內數字為響度第二大且接近第一大的頻率，

改變入口時，出口孔洞直徑固定為 6mm、改變出口時，入口孔洞直徑固定為 6mm。

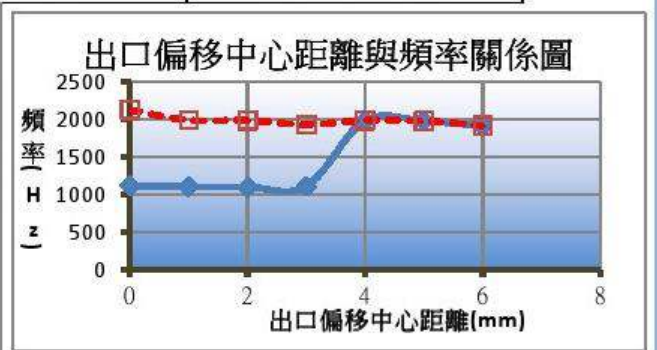
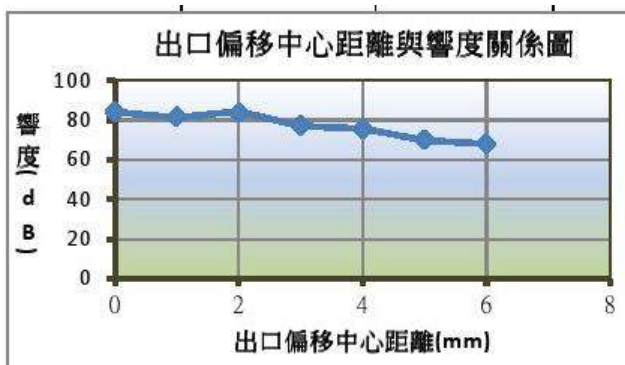


**小結論：**

- (1) 入口及出口孔洞大小都會影響發聲頻率及響度。
- (2) 入口口徑比出口大時，口徑愈大響度愈小。出口口徑比入口大時，口徑愈大響度也愈小。也就是說出入口口徑大小相當時響度較大，響度大時也表示空腔內共振較佳。
- (3) 無論入口或出口口徑愈大頻率都愈高。

2. 孔洞位置對稱性：空腔高 8mm、空腔直徑 34mm、出入口孔洞 6mm。

上出口孔洞偏移中心(mm)	響度(dB)	頻率(Hz)	備註
0	84.2	1120(2133)	括弧內數字為泛音頻率
1	81.7	1110(1996)	括弧內數字為泛音頻率
2	83.7	1107(1992)	括弧內數字為泛音頻率
3	77.4	1114(1937)	括弧內數字為泛音頻率
4	75.5	1992	
5	70.1	1984	
6	68.1	1921	無明顯共振現象



◆ **小結論：**

- (1) 與頻率關係圖中，紅色虛線是以泛音作圖，所得曲線接近水平，代表頻率不變。
- (2) 出口孔洞愈偏離中心響度愈小，共振效果愈差，但偏移量在 3mm 內時影響不大。
- (3) 出口孔洞偏移量在 3mm 內時對頻率影響不大。但大於 3mm 後無法發出低 8 度的音，只能發出 2 倍頻的泛音。
- (4) 由於偏移量在 3mm 內時對響度及頻率的影響都不大，所以在製作汽笛時上下蓋貼合允許些微的偏差。

3. 孔洞數量：空腔高 8mm、空腔直徑 34mm、孔洞 4mm、入口 6mm。

開孔數	響度(dB)	頻率(Hz)	備註
4	77.7	1242	
3	78.7	1140	
2	69.3	1106	
1	X	X	(發不出共振聲音)

◆ **小結論：**

- (1) 開孔數不只一個也可以發出聲音。
- (2) 開孔總面積愈大頻率愈高。

(三) 空腔的影響：作以下變因改變，分別測量頻率與響度。

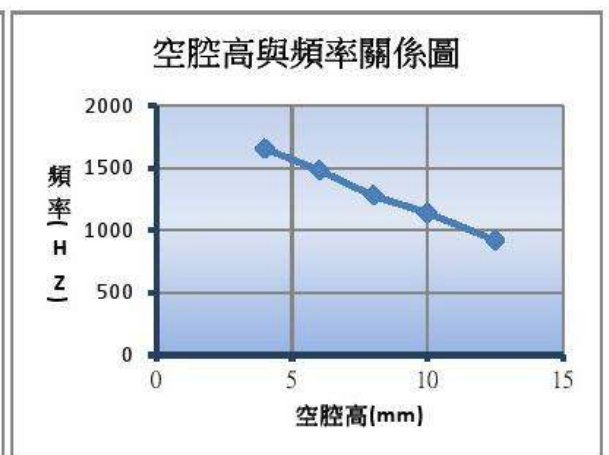
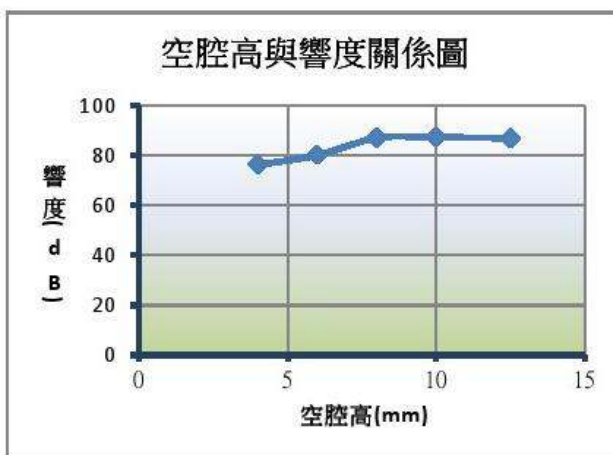
1. 改變空腔高，其他條件維持不變，如空腔直徑 34mm、上下孔洞 6mm。
2. 改變空腔直徑，其他條件維持不變，如空腔高 8mm、上下孔洞 6mm。



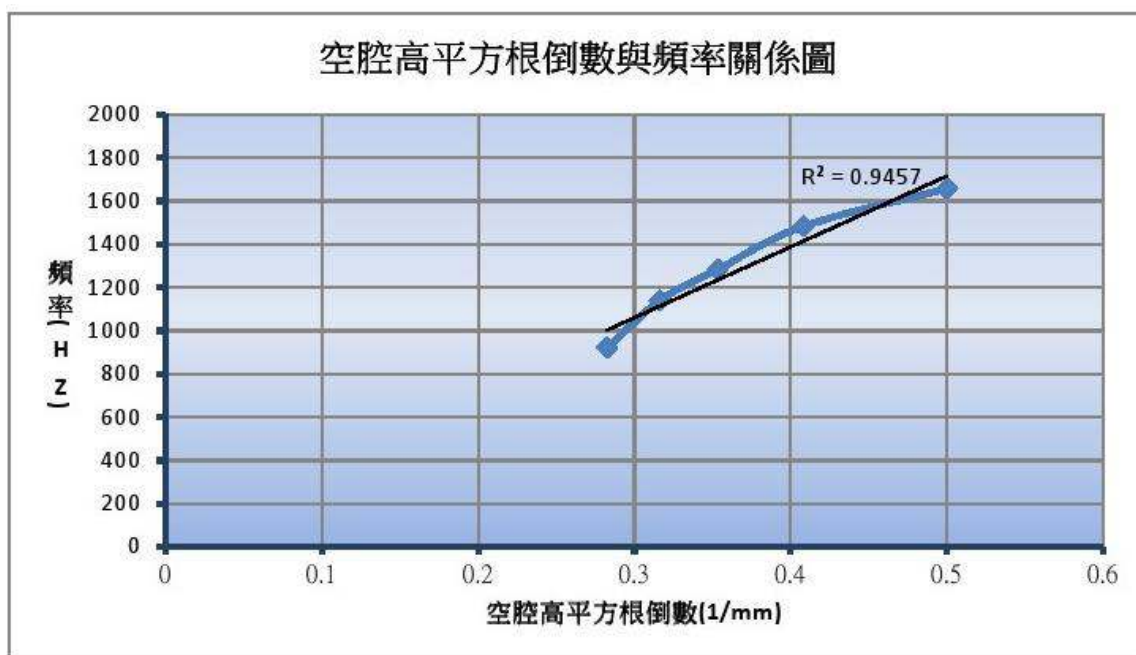
\* **實驗結果：**

1. 改變空腔高：

空腔高(mm)	響度(dB)	頻率(Hz)
4	76.5	1658
6	80.3	1484
8	87.2	1284
10	87.5	1140
12.5	87.1	921





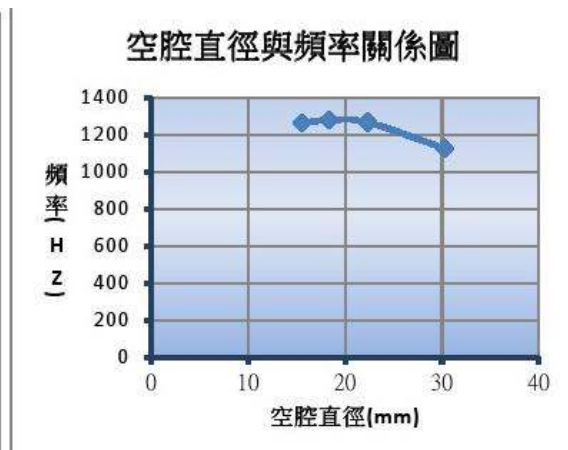
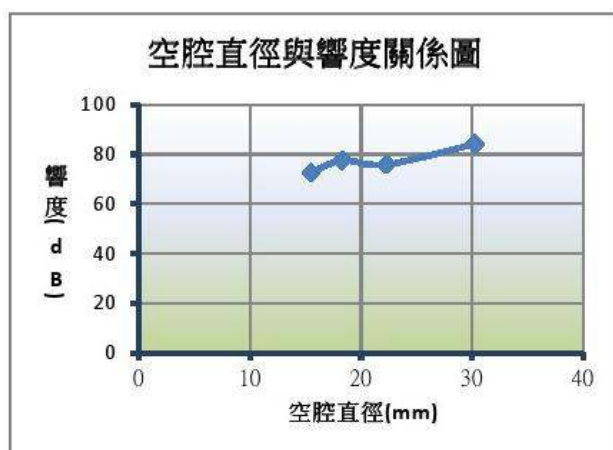


◆ **小結論：**

- (1) 空腔高愈大響度愈大。
- (2) 空腔高愈大頻率愈小。
- (3) 由空腔高平方根倒數與頻率關係圖可知，頻率與空腔高的平方根成反比，而空腔高代表空腔體積，故頻愈應與空腔體積的平方根成反比，這一點說明汽笛發聲與空腔發聲理論相吻合。

2. 改變空腔直徑：

空腔高(mm)	響度(dB)	頻率(Hz)
15.5	72.6	1263
18.3	77.6	1279
22.3	76	1268
30.3	84.2	1126



**小結論：**

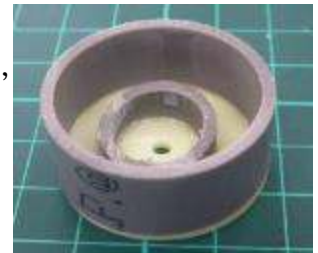
- (1) 空腔直徑愈大響度似乎愈大。

- (2) 空腔直徑愈大頻率愈小。空腔直徑愈大即空腔體積愈大故頻率愈低，與前項實驗相吻合。

### 三、笛音壺的應用：

#### (一) 製作有音高變化的笛音壺：

- 經由以上實驗發現汽笛聲的頻率可以經由空腔體積來改變，因此我們想到藉著水蒸氣冷卻變成水收集在汽笛空間中，汽笛空腔體積減少了，那麼發出之聲音就逐漸提高。
- 製作方法：
  - 如右圖於下底先黏貼口徑較小水管(高需低於空腔高)，再黏貼上蓋即完成。
  - 測試其響度及頻率變化。

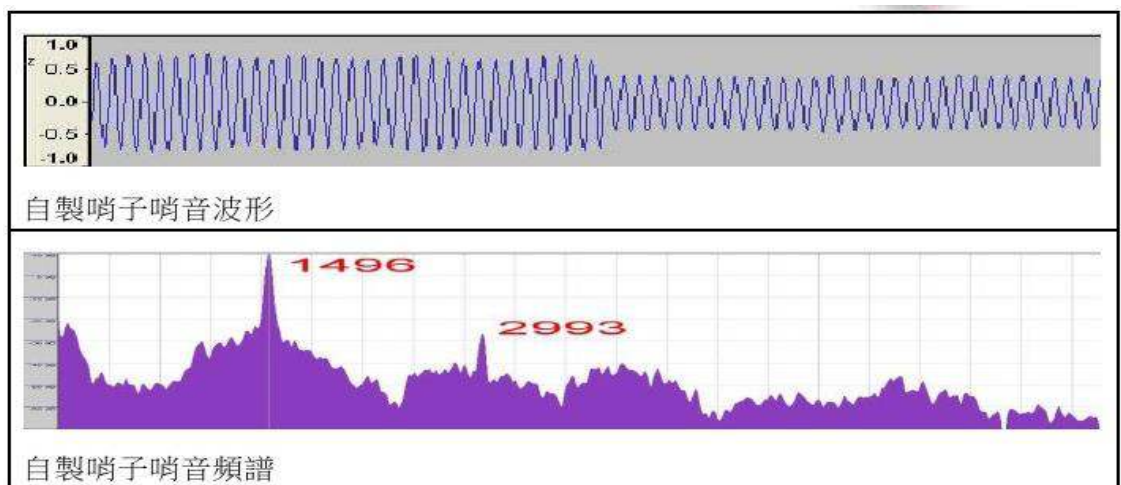


#### ● 實驗結果：

狀態	響度(dB)	頻率(Hz)
空管	53.7	1430
注滿水	53.7	1507

#### (二) 利用哨子發聲原理製作笛音壺：

- 依據學長們的研究結果(參見參考資料一)，哨子發聲機制如右圖所示，其聲音特性如波形及頻譜圖都與我們自製的汽笛聲音頗相類似，所以我們想將哨子的發聲原理運用到汽笛壺上。



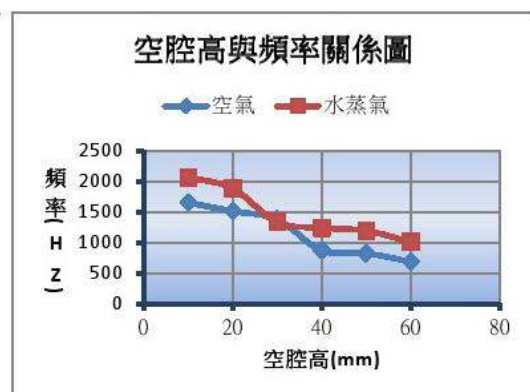
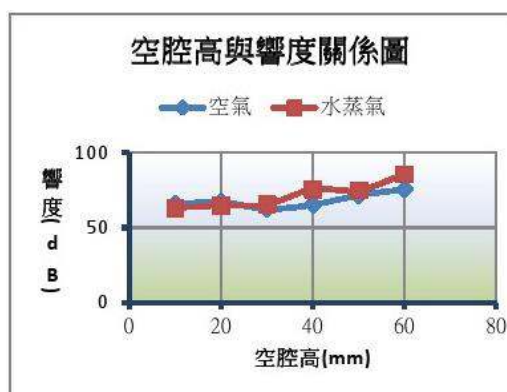
- 首先先製作出可以安裝在水壺上的哨子如右圖，其做法如下：
  - 水電材料行取得 4 分鐵管，於距一端約 40mm 處鑽一直徑 7mm 孔洞。
  - 取 40mm 軟木棒(直徑與鐵管內徑相當)，於一邊切出約 2mm 平面。塞入鐵管中如下圖。



- (3) 將步驟(1)的孔洞以銼刀磨出斜面與鐵管直軸面夾約 30 度角。
  - (4) 再以鐵鎚將步驟(3)之斜面敲擊往下凹入，以由管口往內直視可以看到斜面凹陷管內為原則。
  - (5) 套上管帽即完成哨音汽笛。
3. 探討哨音汽笛發聲頻率與空腔體積的關係：
- (1) 將哨音汽笛以自製吹氣機測量其發聲響度及頻率。
  - (2) 另將哨音汽笛裝在水壺上實際以煮沸的水氣讓哨音汽笛發聲，並測量其發聲響度及頻率。
  - (3) 利用由出口端塞入軟木棒的方法改變哨音汽笛空腔體積，重複步驟(1)、(2)。

● 實驗結果：

空腔高(mm)	空氣		水蒸氣	
	響度(dB)	頻率(Hz)	響度(dB)	頻率(Hz)
10	65.8	1658	63.2	2072
20	67.1	1518	64.9	1889
30	62.6	1382	65.5	1336
40	65.3	875	75.6	1244
50	71.6	829	75	1198
60	75.7	691	85.6	1013



(三) 實作具有音調變化之哨音汽笛壺。

1. 方法一：

(1)原理：利用空腔體積變化調整音調高低。

(2)如下圖，將軟木裁出凹洞塞入鐵管作為吹嘴，當水沸騰後水蒸氣冷卻凝結成水流入凹洞空間，隨著沸騰時間愈久空腔體積逐漸變小，汽笛發聲頻率升高。

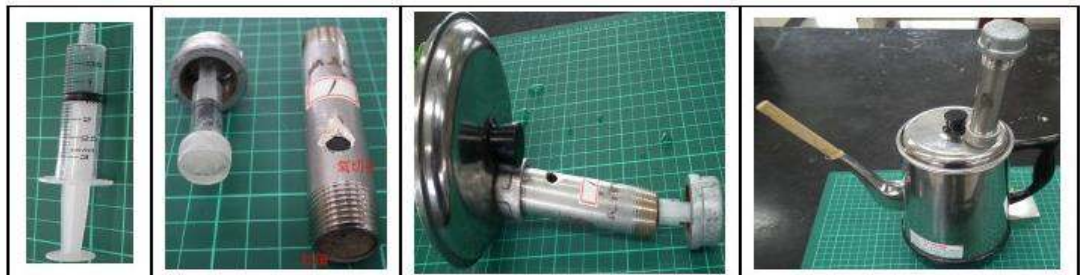


● 缺點：利用水蒸氣凝結升高水位使空腔體積變小時間需要很長。

2. 方法二：

(1)原理：利用注射筒內空氣受熱而膨脹，推出活塞以減少空腔體積，進耳改變汽笛音調高低。

(2)如下圖，將注射頭裁掉並封以相當筒內徑的壓克力圓板，注射筒及活塞適當裁短並固定在鐵管管蓋內。將軟木一側磨平塞入鐵管作為吹嘴，當水沸騰後，注射筒內空氣受熱而膨脹，活塞被推出減少空腔體積，隨著沸騰時間愈久空腔體積逐漸變小，汽笛發聲頻率升高。



● 實驗結果：

水沸騰時間(秒)	0	10	20	30	40	50
頻率(Hz)	956	964	996	1010	1027	1027

## 伍、 研究結果與討論

一、經本次研究探討發現笛音壺之汽笛發聲類似空腔共振原理，其原理經文獻探討整理如下：

文獻資料顯示，一般聲音共振產生駐波的理論有種，一種是因空氣柱於管子內共振所得，另一種為體腔共振，其理論摘要如下：

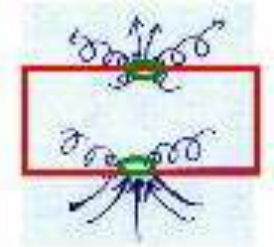
● 腔體共振理論：

如右圖所示，將理想共鳴腔分為瓶身及頸部兩部分。其中開口面積  $A$ ，頸長  $L$ ，瓶身容積  $V_0$ ，當聲速  $v$  時，此共鳴腔共振頻率  $f$  為

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L}}$$

可知影響共振頻率的變因為：體積（ $V_0$ ），  
頸長（ $L$ ），頸部口徑（ $A$ ）。

我們的研究發現汽笛發聲頻率除了與空腔體積及開孔洞大小外，另一重大影響為氣流大小，因此我們認為汽笛發聲機制要比體腔共振複雜。我們推想氣流通過入口時與孔洞摩擦產生渦流，出口處也有渦流產生，這些渦流強度便造成空腔內氣體振盪而產生特定頻率之聲波。



二、經由多次實驗探討，總結影響笛音壺汽笛聲音響度與音調的變因如下：

變因項目	響度	音調
風速強弱	風速愈大響度愈大但漸趨上限。	風速愈大音調愈高但漸趨上限
出入口孔洞直徑	出入口孔洞直徑相差 1~2mm 時響度較大。	出入口直徑愈大頻率愈大，但孔洞大於 10mm 或小於 3mm 時，將難以產生共振而無法發出特定頻率之聲音。
孔洞偏離	上出口孔洞偏移中心愈大，響度愈小，偏移量大於 4mm 後將難以產生共振而無法發出特定頻率之聲音。	上出口孔洞偏移中心小於 4mm 時對頻率影響不大，但偏移 4mm 後較難產生較低頻率之基音。
孔洞數量	孔洞數愈多即相當開孔總面積變大，故響度變大，但開孔總面積過大將無法發聲。	孔洞數愈多即相當開孔總面積變大，故頻率變大，但 2 個 4mm 的孔洞其頻率不等於 1 個 8mm 的孔洞頻率。
空腔體積	改變空腔高與空腔直徑都可改變空腔體積，空腔體積愈大響度大都能變大。	空腔體積愈大頻率愈小。

三、比較原汽笛發聲機制與改成哨子發聲機制的差異：

(一) 原汽笛音調較高(因空腔小)，雜訊較多，聲音不穩定，但也因如此顯得刺耳而具提醒作用。相對的哨音汽笛有較穩定的聲音，相對好聽，音量較大。



(二) 利用改變音調的措施，原汽笛因本身空腔體積較小，能變化的量有限，故音調變化不大。相對的哨音汽笛音調變化較大，接近我們原先想要的音階變化汽笛。

## 陸、參考資料

- 一、新北市立板橋國民中學 著 新北市 102 學年度國民中小學科學展覽會作品說明書。
- 二、新北市立板橋國民中學 著 全國 94 年度中小學科學展覽會作品說明書。
- 三、桃園縣立竹圍國民中學 著 中華民國第 42 屆中小學科學展覽會作品說明書。
- 四、省立嘉義高中 著 中華民國第 39 屆中小學科學展覽會作品說明書。

## 【評語】 030102

考慮變因多，設計各種笛口，製作認真，可見實驗技術相當成熟，若變因能更收斂，會更好。表達良好，經評定給予最佳團隊合作獎。