

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

第一名

040109

腔體共振之探討

學校名稱：臺北市立第一女子高級中學

作者： 高二 許婷	指導老師： 張清俊
--------------	--------------

關鍵詞：腔體共振、駐波、聲音

得獎感言



一開始做這個題目是因為實驗簡單，而且可與生活結合。實驗中不斷的收集空罐、裁切紙筒、纏貼膠帶……，這些研究步驟在別人眼中也許是枯燥乏味的，但做久了之後，我發現研究過程中充滿了樂趣：發現誤差來源的喜悅、修正實驗方法讓實驗更順利的成就感、看到結果的驚喜、尋找出合理解釋的興奮……等等，探索越多，越能從平凡中見驚奇，這也是參加科展最大的收穫——快樂。

做實驗的同時也閱讀了許多關於聲波的資料，因此發現生活中每個聲音的背後都有令人驚奇的發聲原理，越是思考越能感受到科學的趣味及美感。

謝謝教授、老師以及學長姐的指導，還有一路上陪伴我、支持我的家人和同學，這份榮耀是屬於大家的。

腔體共振之探討

摘要

本實驗用音頻分析軟體測定容器共振頻率，探討各變因對腔體共振的影響。同時，我們將探討不同形狀容器所符合的共振理論（駐波理論、腔體共振理論），並對現有理論進行修正。

壹、研究動機：

過去有實驗發現，管樂器中某些人體口腔可以吹奏出來的高音，用機器吹卻吹不出來，表示人的口腔在吹奏樂器時會對特定音頻產生共振放大的現象。在高中物理的課程中，關於聲波共振的部分僅有柱狀共鳴管內的駐波共振，在查閱文獻後，我們得知聲音的共振除了駐波理論外還有另一腔體共振理論，我們想知道這兩個理論的應用範圍，以及符合口腔內共振的理論。由於口腔形狀複雜，因此本實驗以形狀較簡單的容器進行口腔中聲音共振的模擬，探討各變因對腔體共振的影響。

貳、研究目的：

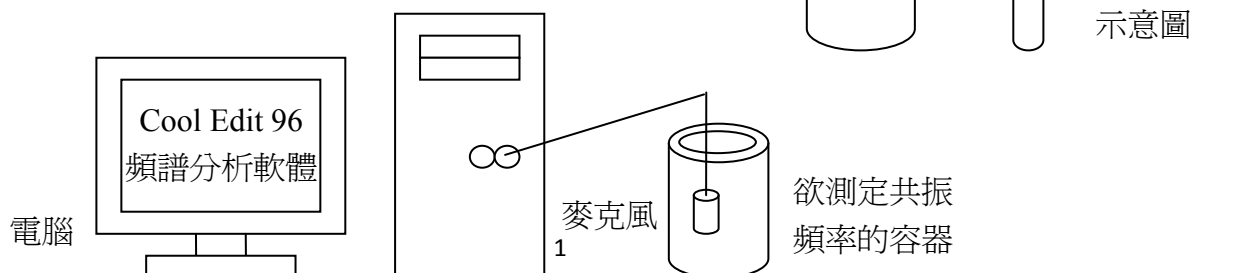
- 一、探討不同測量方式所得的頻譜分析圖及共振頻率
- 二、探討影響共鳴腔共振頻率的變因
 - (一) 探討影響圓底燒瓶共振頻率的變因
 - (二) 探討影響柱狀共鳴管共振頻率的變因
 - (三) 探討影響兩節圓筒瓶共振頻率的變因
 - (四) 瓶長、頸長修正項的探討
- 三、探討共鳴腔內有外物時對共振頻率的影響
 - (一) 探討外物位置對共振頻率的影響

參、研究設備及器材：

一、研究器材：

- (一) 麥克風
- (二) 圓底燒瓶（不同容積、口徑、頸長）及可替換的頸部（不同長度）
- (三) 管徑 6.30 公分的羽球瓶（裁切成不同長度）
- (四) 管徑 2.65 公分的硬紙筒（裁切成不同長度）
- (五) 兩節圓筒瓶（為硬紙筒連接羽球瓶所構成，如右圖所示）
- (六) 邊長為 1 公分的正立方體若干
- (七) Cool Edit 96 頻譜分析軟體
- (八) 電腦

二、研究裝置示意圖：



肆、研究過程及方法：

一、文獻探討

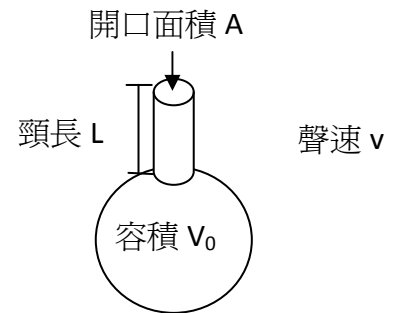
(一) 駐波理論：

在一介質中，若有兩波波長相同，且相向而行，則可互相干涉形成駐波 (standing wave)。一般入射波與反射波之間的相互干涉即為駐波；共鳴管中可形成駐波的最低頻率稱為基音，其餘較高頻率則稱為泛音。

(二) 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

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



二、探討不同測量方式所得的頻譜分析圖及共振頻率

(一) 取一圓底燒瓶，將麥克風置入其中，分別靜置、輕敲瓶身、吹氣進入瓶內並錄音，利用 Cool Edit 96 音頻分析軟體對錄音進行頻譜分析，得到共振頻率。

三、探討影響共鳴腔共振頻率的變因

(一) 圓底燒瓶結構類似腔體共振理論中的理想共鳴腔，包含瓶身、瓶頸兩部分，測量不同開口大小、不同頸長、不同容積的圓底燒瓶共振頻率。

(二) 將不同口徑的羽球瓶及硬紙筒裁切、黏接成不同長度，並將一端蓋上瓶蓋一端未蓋上瓶蓋形成「閉管」，測量不同長度的羽球瓶及硬紙筒的閉管共振頻率。

(三) 將不同口徑的羽球瓶及硬紙筒裁切、黏接成不同長度，並將兩端皆未蓋上瓶蓋形成「開管」，測量不同長度的羽球瓶及硬紙筒的開管共振頻率。

(四) 在硬紙板上割出不同大小的圓形開口，將硬紙板黏接在羽球瓶口，以膠帶密封接合處，使圓形開口恰好在羽球瓶口中央，改變羽球瓶開口口徑，測量不同開口口徑下羽球瓶共振頻率。

(五) 將羽球瓶連接硬紙筒，接合處以膠帶密封，形成類似圓底燒瓶的構造，稱為兩節圓筒瓶，無開口的一端稱為瓶身，有開口的一端稱為頸部，測量不同頸長下兩節圓筒瓶的共振頻率。

(六) 利用硬紙板改變兩節圓筒瓶開口口徑，測量不同開口口徑下兩節圓筒瓶的共振頻率。

四、探討共鳴腔內有外物時對共振頻率的影響

(一) 將若干邊長為 1 公分的正立方體排列成較大的長方體，用膠帶固定形狀，將此長方體置入柱狀共鳴管中，黏著於不同位置，測量其共振頻率。

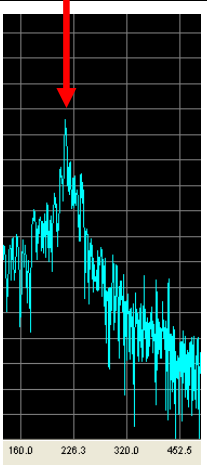
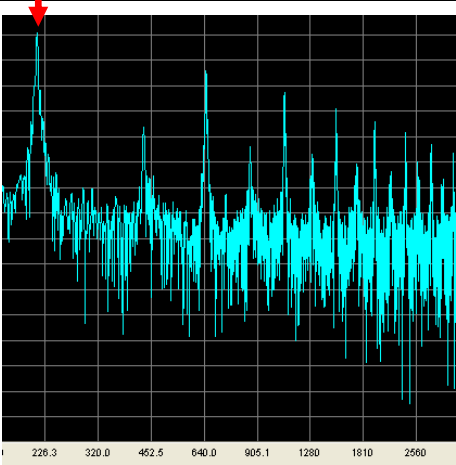
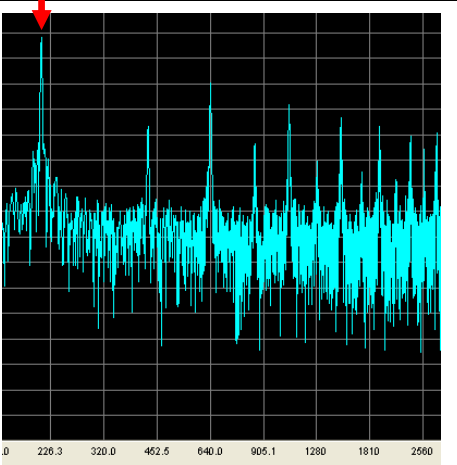
伍、研究結果：

一、不同測量方式所得到的頻譜分析圖及所測得的共振頻率

以下頻譜分析圖中，橫坐標為頻率對數值（取對數後圖較清晰），縱座標為強度大小（單位：分貝），圖中高峰處即為共振頻率，若有多個高峰（如輕敲瓶身及向瓶內吹氣所得的頻譜分析圖），則以第一個高峰的頻率值為以下各實驗中的共振頻率值（即為基音），其餘為泛音。

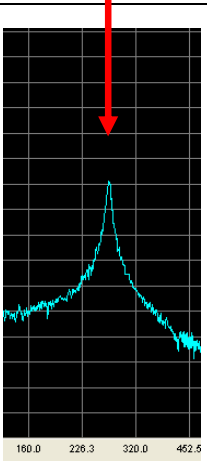
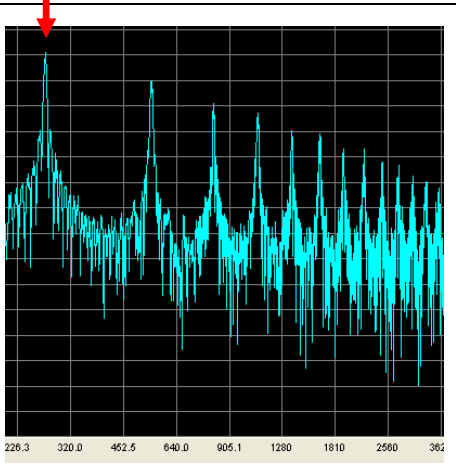
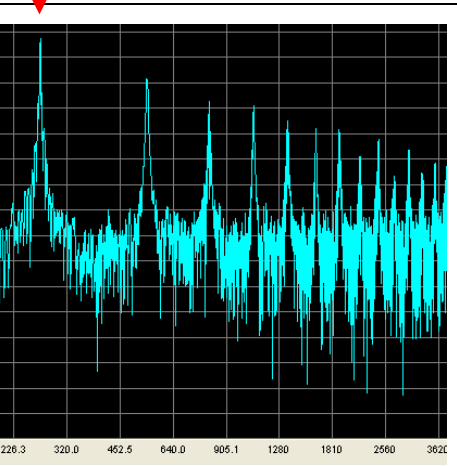
(一) 開口口徑 2.245 公分，容積 535.0 毫升，頸部長度 6.300 公分的圓底燒瓶頻譜分析圖

表格 1

頻譜分析圖			
	靜置	輕敲瓶身	向瓶內吹氣
	174Hz	173Hz	173Hz

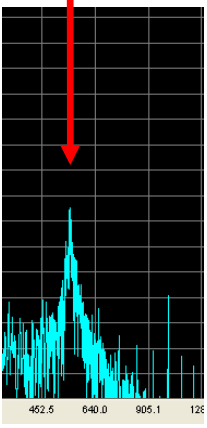
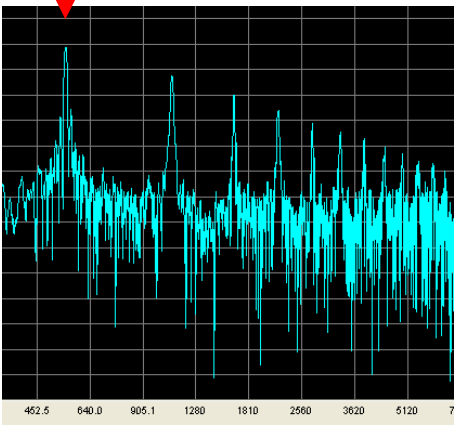
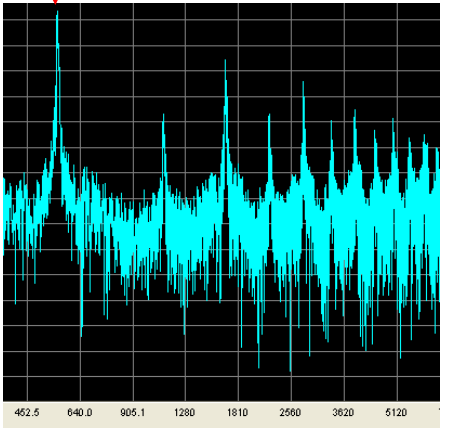
(二) 開口口徑 2.790 公分，容積 285.0 毫升，頸部長度 6.500 公分的圓底燒瓶頻譜分析圖

表格 2

頻譜分析圖			
	靜置	輕敲瓶身	向瓶內吹氣
	271Hz	270Hz	270Hz

(三) 開口口徑 2.245 公分，容積 52.0 毫升，頸部長度 5.900 公分的圓底燒瓶頻譜分析圖

表格 3

頻譜分析圖			
	測量方式	靜置	輕敲瓶身
共振頻率	628Hz	627Hz	628Hz

二、探討影響共鳴腔共振頻率的變因

(一) 影響圓底燒瓶共振頻率的變因

1. 開口口徑為 2.245 公分的圓底燒瓶

表格 4

口徑(cm)	頸長 L(cm)	容積 V_0 (ml)	共振頻率 f(Hz)	共振頻率理論值 f_0 (Hz)	誤差 $(f_0-f)/f_0$
2.245	15.510	285.0	143.0	165.4	0.136
2.245	15.080	285.0	145.3	167.8	0.134
2.245	6.300	535.0	173.0	189.8	0.088
2.245	6.300	285.0	236.6	259.6	0.089
2.245	5.760	117.0	365.5	423.9	0.138
2.245	5.900	52.0	541.5	628.0	0.176

2. 開口口徑 2.790 公分的圓底燒瓶

表格 5

口徑(cm)	頸長 L(cm)	容積 V_0 (ml)	共振頻率 f(Hz)	共振頻率理論值 f_0 (Hz)	誤差 $(f_0-f)/f_0$
2.790	6.500	547.0	197.0	228.0	0.136
2.790	6.500	285.0	270.0	315.9	0.145
2.790	6.050	119.0	419.0	506.4	0.173
2.790	5.750	52.0	611.0	785.8	0.222

3. 開口口徑 2.558 公分的圓底燒瓶

表格 6

口徑(cm)	頸長 L(cm)	容積 V_0 (ml)	共振頻率 f(Hz)	共振頻率理論值 f_0 (Hz)	誤差 $(f_0-f)/f_0$
2.558	11.740	285.0	164.4	216.3	0.240
2.558	16.720	285.0	144.0	181.2	0.205

2.558	20.950	285.0	120.0	161.9	0.259
2.558	21.380	285.0	118.0	160.3	0.264
2.558	25.500	285.0	112.0	146.7	0.237
2.558	25.930	285.0	110.0	145.5	0.244
2.558	30.160	285.0	97.0	134.9	0.281

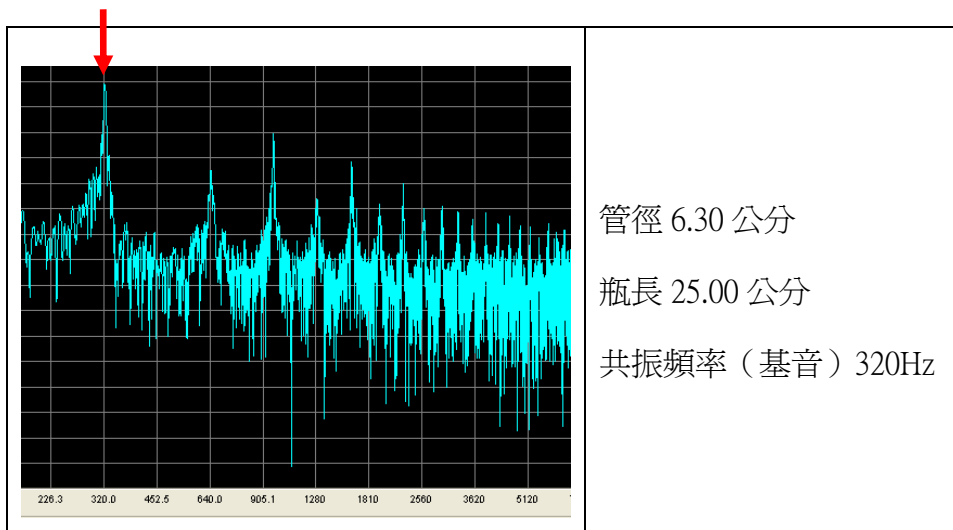
(二) 瓶長對閉管共振頻率的影響



(最左側為管徑 6.30 公分的羽球瓶，其餘為管徑 2.65 公分的硬紙筒)

1. 閉管共振頻譜分析圖

表格 7



以下表格僅呈現基音頻率

2. 管徑 6.30 公分：

- (1) 控制變因：管徑 6.30 公分，其中一端加上蓋子
- (2) 操縱變因：瓶長
- (3) 實驗結果：

表格 8

瓶長(cm)	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	34.30	39.30	44.30	49.30	54.30	59.30	64.30
閉管共振頻率(Hz)	711	504	392	320	268	237	207	185	167	152	140	131

3. 管徑 2.65 公分：

- (1) 控制變因：管徑 2.65 公分，其中一端加上蓋子
- (2) 操縱變因：瓶長
- (3) 實驗結果：

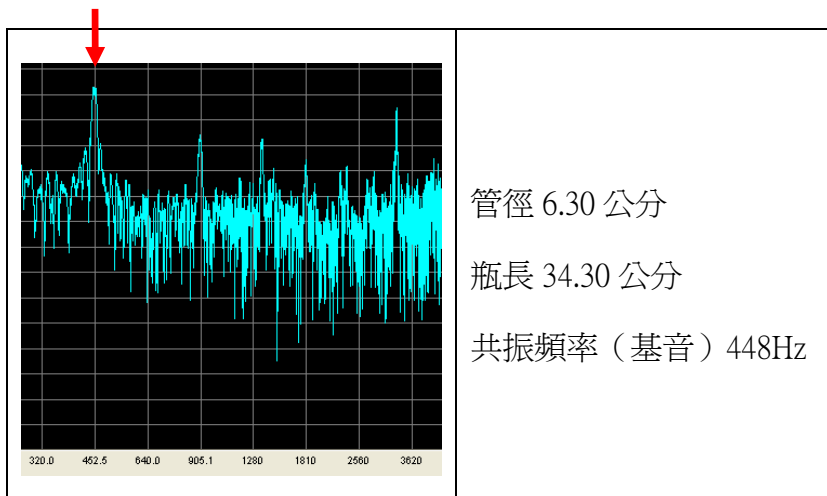
表格 9

瓶長(cm)	3.05	4.00	5.00	6.00	8.00	12.00	14.10	15.80	19.80	24.00	28.00	30.00	38.90	46.70
閉管共振頻率(Hz)	2123	1713	1404	1190	945	645	556	501	402	337	291	272	211	177

(三) 瓶長對開管共振頻率的影響

1. 開管共振頻譜分析圖

表格 10



以下表格僅呈現基音頻率

2. 管徑 6.30 公分：

- (1) 控制變因：管徑 6.30 公分，兩端皆沒有蓋子
- (2) 操縱變因：瓶長
- (3) 實驗結果：

表格 11

瓶長(cm)	20.00	25.00	30.00	34.30	39.30	44.30	49.30	54.30	59.30	64.30
開管共振頻率(Hz)	727	587	505	448	398	355	328	293	275	257

3. 管徑 2.65 公分：

- (1) 控制變因：管徑 2.65 公分，兩端皆沒有蓋子
- (2) 操縱變因：瓶長
- (3) 實驗結果：

表格 12

瓶長(cm)	14.10	15.80	19.80	24.00	28.00	30.00	38.90	46.70
開管共振頻率(Hz)	1070	968	784	658	565	530	415	350

(四) 開口口徑對共振頻率的影響



1. 控制變因：管徑 6.30 公分，其中一端加上蓋子
2. 操縱變因：未蓋上蓋子的一端以有圓孔的紙板改變開口口徑
3. 實驗結果：

表格 13

瓶長(cm)	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	34.30	39.30	44.30	49.30	54.30	59.30	64.30
開口口徑 6.3cm 共振頻率(Hz)	717	504	392	320	268	237	207	185	167	152	140	131
開口口徑 1cm 共振頻率(Hz)	250	216	189	166	148	137	126	115	107	100	94	91
開口口徑 2cm 共振頻率(Hz)	394	319	257	227	200	182	163	148	137	126	117	110
開口口徑 3cm 共振頻率(Hz)	520	383	319	266	229	207	183	166	151	139	129	121

(五) 瓶長修正比例

由表格 8、9、11、12 可得到不同口徑及瓶長所對應的共振頻率測量值，利用駐波理論計算出測量值所對應到的理論瓶長，依下列公式計算修正比例。

➤ 修正比例 = (理論瓶長 - 實際瓶長) / 實際瓶長

1. 管徑 6.30 公分

表格 14 (X 代表無法測量)

瓶長(cm)	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	34.30	39.30	44.30	49.30	54.30	59.30	64.30
閉管共振 瓶長修正比例	0.193	0.125	0.100	0.078	0.073	0.061	0.060	0.052	0.048	0.045	0.039	0.040
開管共振 瓶長修正比例	X	X	0.188	0.164	0.136	0.120	0.106	0.097	0.087	0.081	0.077	0.073
閉管共振瓶長 修正長度(cm)	1.929	1.879	2.003	1.953	2.183	2.092	2.367	2.322	2.347	2.443	2.307	2.560
開管共振瓶長 修正長度(cm)	X	X	3.760	4.089	4.091	4.119	4.151	4.292	4.271	4.373	4.589	4.700

2. 管徑 2.65 公分

表格 15 (X 代表無法測量)

瓶長(cm)	3.05	4.00	5.00	6.00	8.00	12.00	14.10	15.80	19.80	24.00	28.00	30.00	38.90	46.70
閉管共振 瓶長修正比例	0.332	0.259	0.229	0.208	0.141	0.114	0.100	0.090	0.084	0.066	0.059	0.057	0.051	0.043
開管共振 瓶長修正比例	X	X	X	X	X	X	0.143	0.128	0.111	0.092	0.090	0.085	0.069	0.061
閉管共振瓶長 修正長度(cm)	1.013	1.035	1.143	1.248	1.127	1.372	1.413	1.416	1.655	1.593	1.639	1.710	1.977	2.029
開管共振瓶長 修正長度(cm)	X	X	X	X	X	X	2.021	2.020	2.203	2.216	2.531	2.547	2.666	2.869

(六) 影響兩節圓筒瓶共振頻率的變因

1. 瓶身管徑 > 頸部管徑

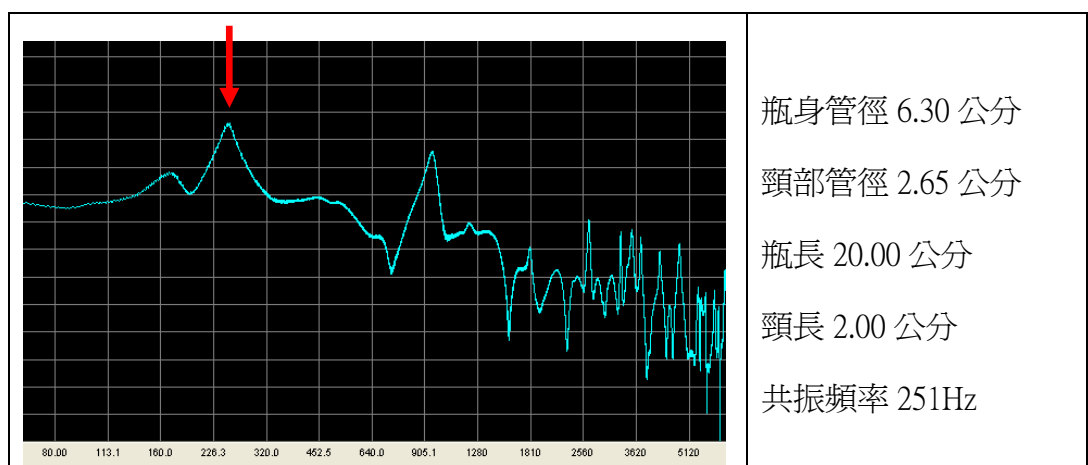
(1) 實驗一

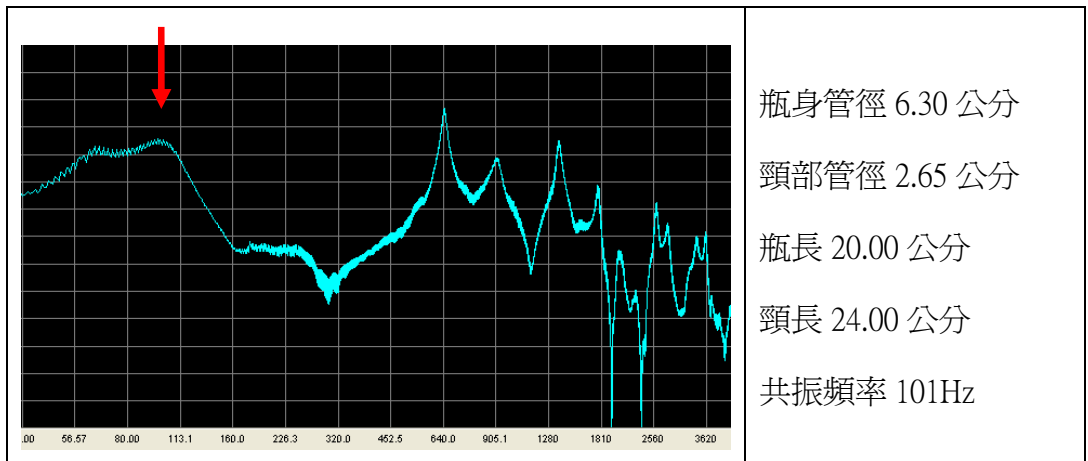


(實驗一、二所用兩節圓筒瓶)

a. 頻譜分析圖：

表格 16





b. 控制變因：瓶身長度 20.00 公分，瓶身管徑 6.30 公分，頸部管徑 2.65 公分

c. 操縱變因：頸長

d. 實驗結果：

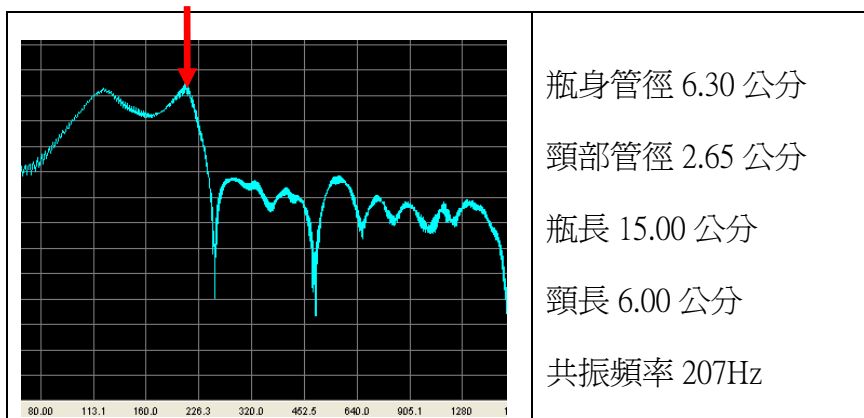
表格 17

頸長(cm)	2.00	3.05	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.10	15.80	24.00
共振頻率(Hz)	251	227	208	183	161	147	136	127	121	101
頸長修正比例	1.083	0.697	0.541	0.357	0.286	0.234	0.202	0.173	0.153	0.111
頸部修正長度(cm)	2.167	2.126	2.165	2.141	2.29	2.343	2.421	2.437	2.417	2.672

(2) 實驗二

a. 頻譜分析圖：

表格 18



b. 控制變因：瓶身長度 15.00 公分，瓶身管徑 6.30 公分，頸部管徑 2.65 公分

c. 操縱變因：頸長

d. 實驗結果：

表格 19

頸長(cm)	2.00	3.05	4.00	6.00	7.00	10.00	12.00	14.10	22.00	30.00
共振頻率(Hz)	290	264	239	207	195	174	157	146	116	101
頸長修正比例	1.114	0.673	0.556	0.383	0.336	0.245	0.234	0.2	0.161	0.139
頸部修正長度(cm)	2.229	2.053	2.226	2.3	2.353	2.452	2.802	2.815	3.541	4.182

(3) 實驗三

- a. 控制變因：瓶身長度 8.00 公分，瓶身管徑 6.30 公分，頸部管徑 2.65 公分
- b. 操縱變因：頸長
- c. 實驗結果：

表格 20

頸長(cm)	2.00	3.05	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.10	15.80	19.80	23.80	28.00	30.00
共振頻率(Hz)	424	375	336	291	260	232	215	202	192	170	154	141	136
頸長修正比例	0.872	0.597	0.503	0.331	0.262	0.261	0.225	0.182	0.169	0.165	0.166	0.165	0.167
頸部修正長度(cm)	1.744	1.821	2.013	1.984	2.096	2.605	2.697	2.57	2.671	3.273	3.955	4.608	5.014

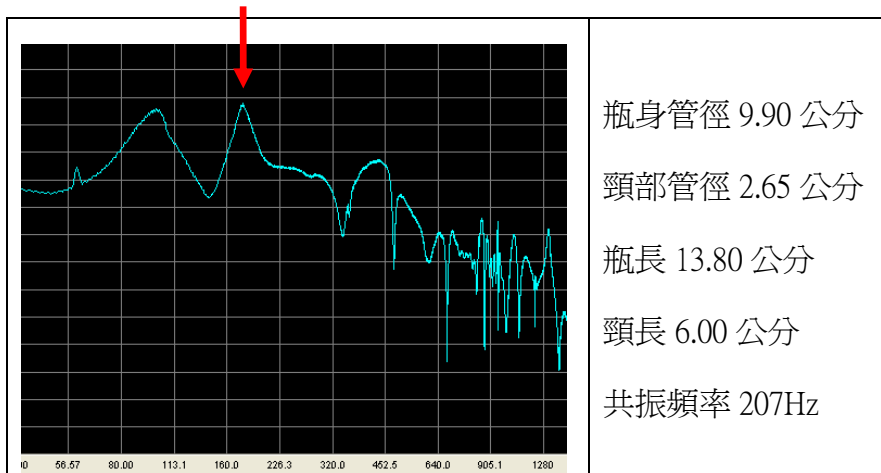
(4) 實驗四

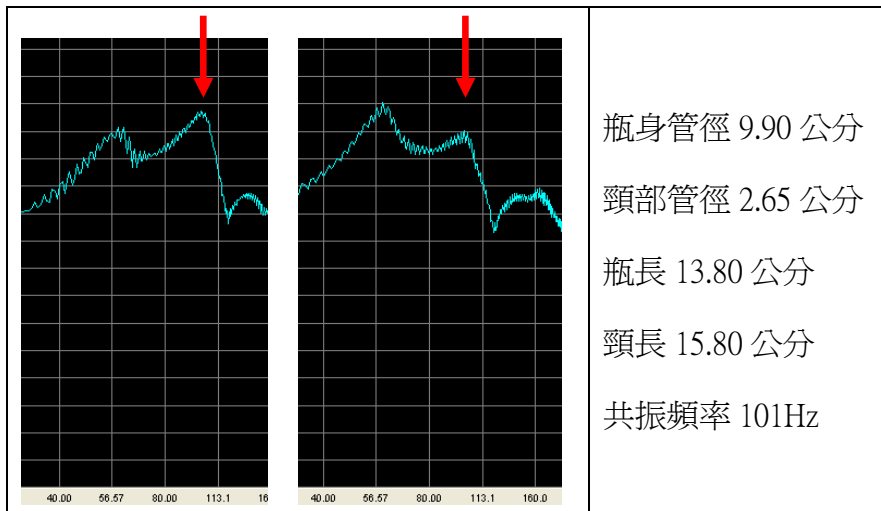


(實驗四所用兩節圓筒瓶)

- a. 頻譜分析圖：

表格 21





- b. 控制變因：瓶身長 13.80 公分，瓶身管徑 9.90 公分，頸部管徑 2.65 公分
- c. 操縱變因：頸長
- d. 實驗結果：

表格 22

頸長(cm)	2.00	3.05	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.10	15.80	24.00
共振頻率(Hz)	227	197	177	158	139	124	113	107	101	83
頸長修正比例	0.519	0.322	0.249	0.045	0.013	0.018	0.022	-0.030	-0.029	-0.053
頸部修正長度(cm)	1.038	0.984	0.997	0.271	0.102	0.181	0.259	-0.427	-0.455	-1.277

2. 瓶身管徑 < 頸部管徑

(1) 以瓶長、頸長為變因

- a. 控制變因：瓶身管徑 2.65 公分，頸部管徑 6.30 公分
- b. 操縱變因：瓶長、頸長
- c. 實驗結果：

表格 23 (X 代表無法測量)

頸長(cm) \ 瓶長(cm)	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	12.00	14.00	16.00	18.00	20.00	26.00	30.00
2.00	X	X	1047	845	724	617	541	481	440	402	295	262
8.00	880	838	773	690	612	539	476	434	402	367	294	259
12.00	618	600	581	559	519	481	439	408	375	347	281	251
14.00	550	528	519	504	478	447	420	391	366	337	278	247
31.00	263	261	258	256	253	249	245	240	235	231	213	201

(2) 改變開口口徑

a. 控制變因：瓶長 12.00 公分，瓶身管徑 2.65 公分，頸部管徑 6.30 公分，

b. 操縱變因：開口口徑、頸長

c. 實驗結果：

表格 24

開口口徑(cm) 頸長(cm)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
10.00	233	311	429	477	502
16.00	200	272	316	370	395

三、探討共鳴腔內有外物時對共振頻率的影響

(一) 外物位置對共振頻率的影響



1. 實驗一

(1) 控制變因：瓶長 15.00 公分，管徑 6.30 公分，外物體積 12 立方公分 (1cm x 3cm x 4cm 的長方體)，以 (w) 1cm x (h) 3cm 的那面黏著於瓶內壁

(2) 操縱變因：外物中心點距瓶底高度

(3) 實驗結果：

表格 25

外物中心距瓶底高度(cm)	2.00	3.20	5.80	8.00	11.00	13.00
共振頻率(Hz)	524	518	514	509	504	503

2. 實驗二

(1) 控制變因：瓶長 10.00 公分，管徑 6.30 公分，外物體積 24 立方公分 (2cm x 3cm x 4cm 的長方體)，以 (w) 2cm x (h) 3cm 的那面黏著於瓶內壁

(2) 操縱變因：外物中心點距瓶底高度

(3) 實驗結果：

表格 26

外物中心距瓶底高度(cm)	1.50	2.80	3.50	5.00	6.00	6.80	7.50	8.50
共振頻率(Hz)	773	751	746	718	702	688	676	669

3. 實驗三

- (1) 控制變因：瓶長 10.00 公分，管徑 6.30 公分，外物體積 24 立方公分 (2cm x 3cm x 4cm 的長方體)，以 (w) 2cm x (h) 4cm 的那面黏著於瓶內壁
- (2) 操縱變因：外物中心點距瓶底高度
- (3) 實驗結果：

表格 27

外物中心距瓶底高度(cm)	2.00	3.10	3.90	4.50	5.40	7.10
共振頻率(Hz)	755	750	747	731	717	690

陸、討論

一、不同測量方式對所測得的頻譜分析圖及共振頻率的影響

由表格 1、2、3 可知，不同測量方式對共鳴腔本身共振頻率不造成影響。但經實驗發現，對瓶內吹氣時若嘴巴太靠近開口會改變共鳴腔開口大小，進而影響共振頻率，因此在接下來的實驗中，均以輕敲瓶身作為測量共振頻率的方式。

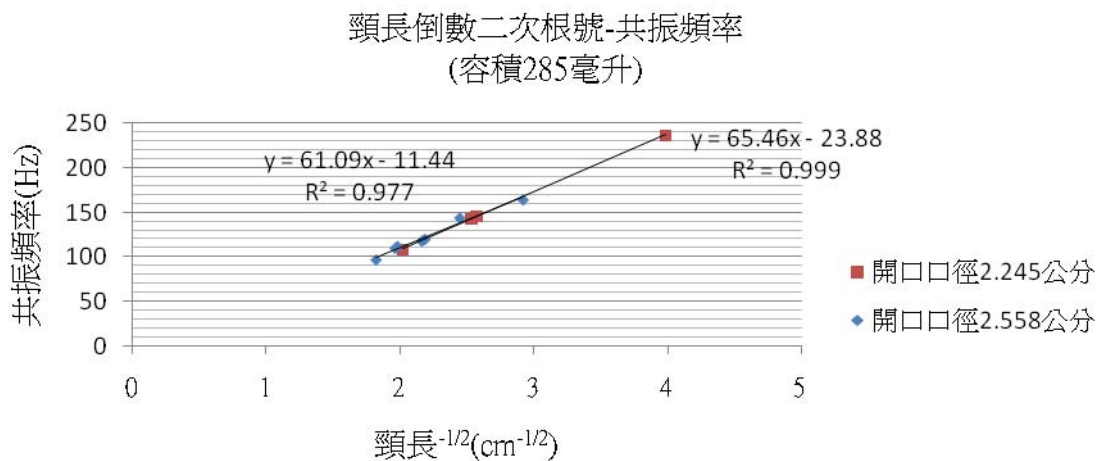
二、影響共鳴腔共振頻率的變因

(一) 影響圓底燒瓶共振頻率的變因

1. 圓底燒瓶頻譜分析圖

由表格 1、2、3 可知，圓底燒瓶的頻譜分析圖中，除了第一個高峰外（即為基音），尚有許多高峰，表示圓底燒瓶有許多泛音。共振頻率的變化為 1：2：3…，其中基音偶數倍的泛音強度較強，基音奇數倍的泛音強度較弱。

2. 頸長與共振頻率的關係

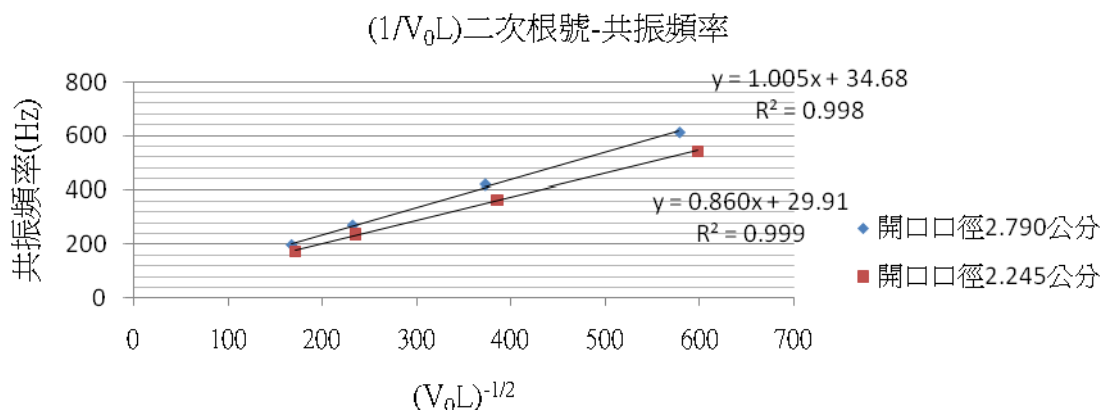


圖表 1

將表格 4、5、6 繪製成圖表 1，可知以頸長為變因時，共振頻率與頸長的-0.5 次方成正相關，符合腔體共振理論，但兩者不成正比（關係線未通過原點），顯示頸長應做修正。在參考有關「邊界效應」的文獻後，我們認為這是因為腔體共振理論中，頸部內的空氣被視為一個圓柱形活塞，但實際上在開口外會有部分氣體隨著頸部內的空氣活塞運動，因此頸長應修正為「有效頸

長」。

3. 容積、頸長的乘積 (V_0L) 與共振頻率的關係

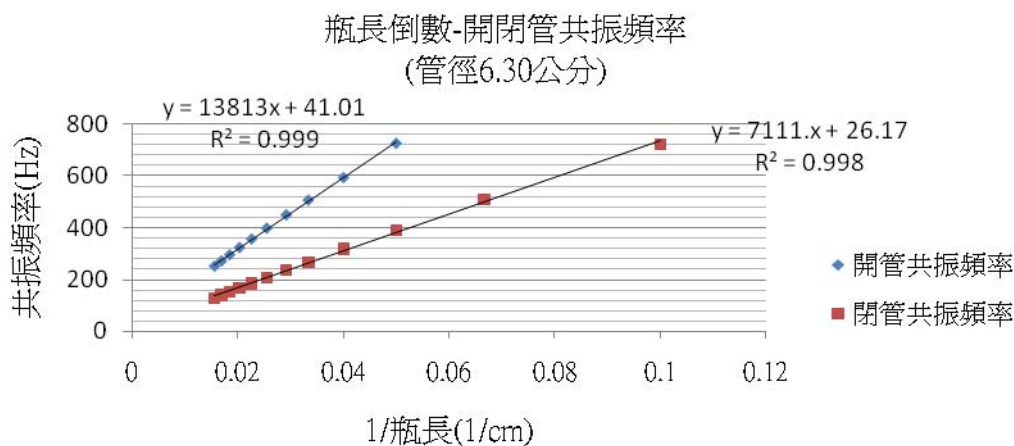


圖表 2

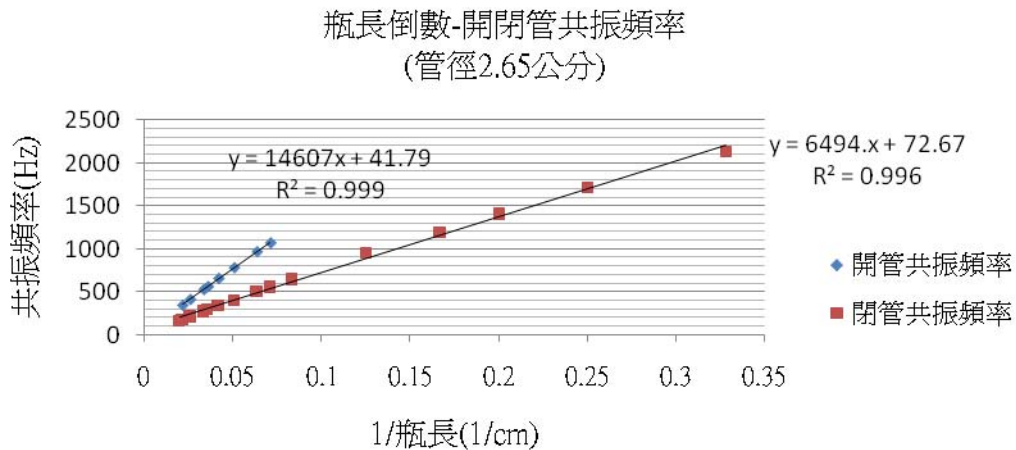
將表格 4、5 繪製成圖表 2，可知固定開口口徑時，共振頻率與 V_0L 的-0.5 次方成正相關，其中 V_0 為容積， L 為頸長，符合腔體共振理論。

由表格 4、5、6 可知，測量值與理論值間有超過 10% 的落差，我們認為這是頸部長度並非「有效頸長」的原因（邊界效應）。但由於圓底燒瓶的頸部連接瓶身處未有明顯分界，影響了頸部長度及瓶身容積的測量，且圓底燒瓶的頸部因有磨口而造成管徑不均，以上兩個原因也會對共振頻率造成影響，使測量值及理論值間差異更大。為了驗證邊界效應確實存在，我們利用羽球瓶及硬紙筒等柱狀共鳴管進行以下實驗。

(二) 瓶長對開、閉管共振頻率的影響

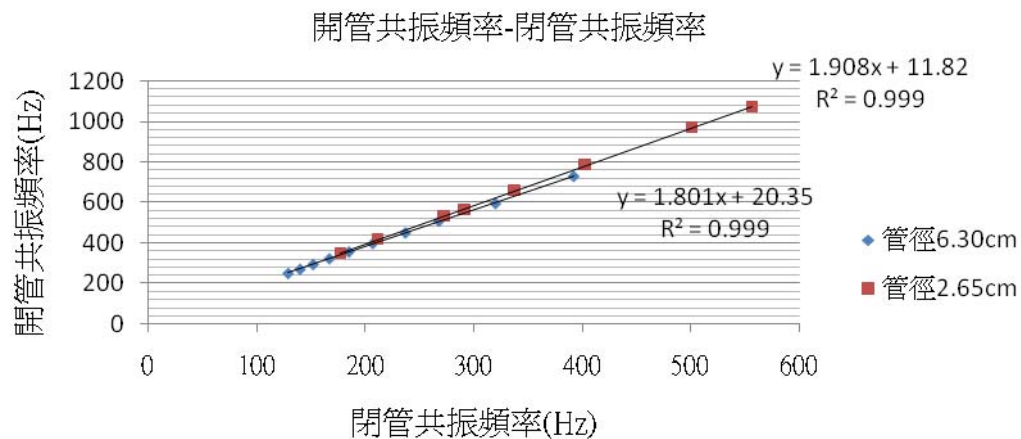


圖表 3



由圖表 3、4 可知，開、閉管共振頻率與瓶長倒數成正相關，符合駐波理論，但並不成正比，顯示瓶長須做修正，符合邊界效應。

(三) 開管共振頻率與閉管共振頻率的比例

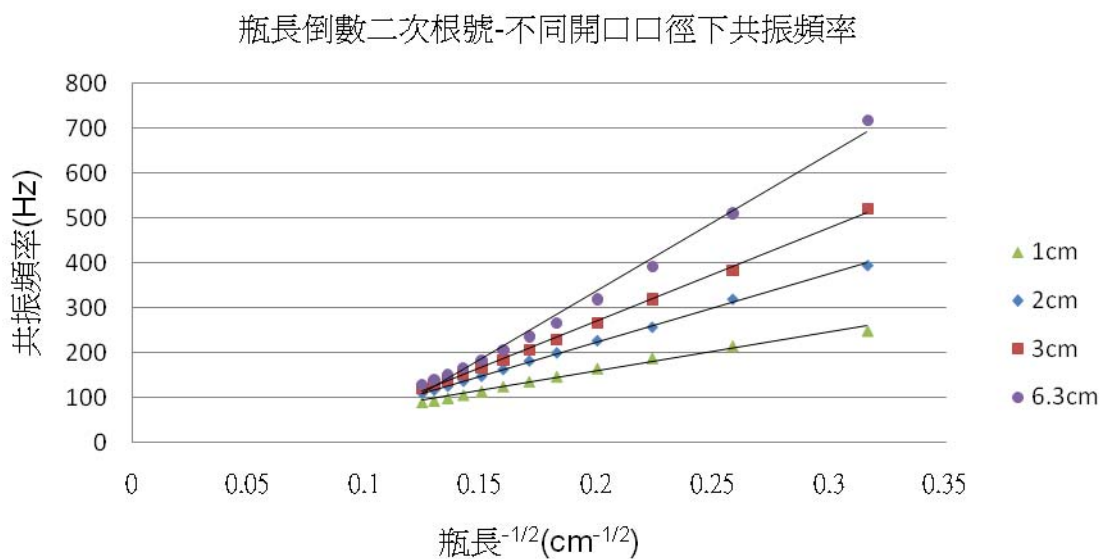


由駐波理論可知，開管共振頻率與閉管共振頻率比值等於 2。由圖表 5 可知，實際上開管共振頻率與閉管共振頻率比值略小於 2，且管徑較小時比值較趨近於 2，顯示管徑越小越符合駐波理論。閉管共振頻率與開管共振頻率呈正相關，但不成正比，顯示閉管及開管時「有效瓶長」不相同，且開管時有效瓶長較閉管時有效瓶長大。

(四) 閉管共振及開管共振的頻譜分析圖

由表格 7、10 可知，閉管及開管共振中，共振頻率的變化皆為 1 : 2 : 3...，其中基音偶數倍的泛音強度較強，基音奇數倍的泛音強度較弱。這不符合駐波理論中閉管共振頻率變化為 1 : 3 : 5 : 7...。

(五) 開口口徑對共振頻率的影響

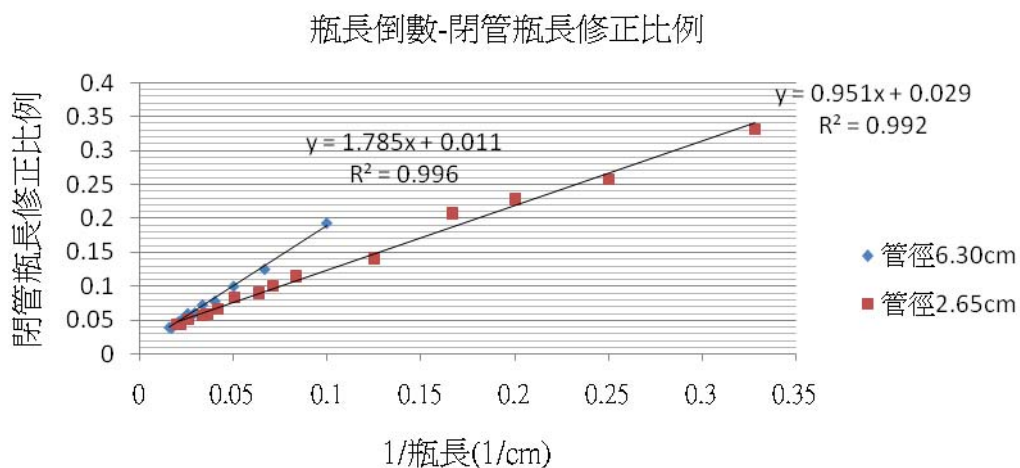


圖表 6

由圖表 6 可知，當開口口徑不等於瓶身管徑時（開口口徑分別為 1、2、3 公分），共振頻率與瓶長的-0.5 次方成正比，符合腔體共振理論，但當開口口徑為瓶身管徑時（即為閉管共振，管徑為 6.30 公分），共振頻率與瓶長-0.5 次方的線性關係沒那麼明確，由圖表 3 可知，閉管共振頻率與瓶長倒數成正比，符合駐波理論。

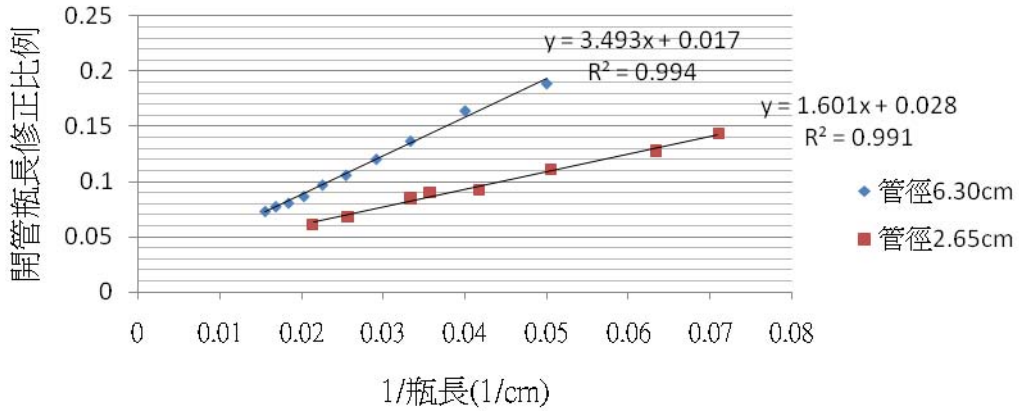
瓶長越短時，開口口徑大小對共振頻率的影響越顯著。不同瓶長中，開口口徑與共振頻率的關係不同。

(六) 瓶長修正比例



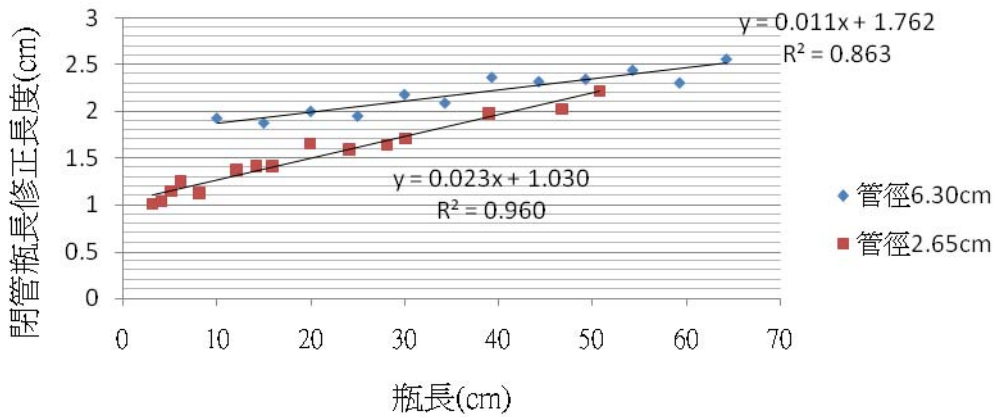
圖表 7

瓶長倒數-開管瓶長修正比例



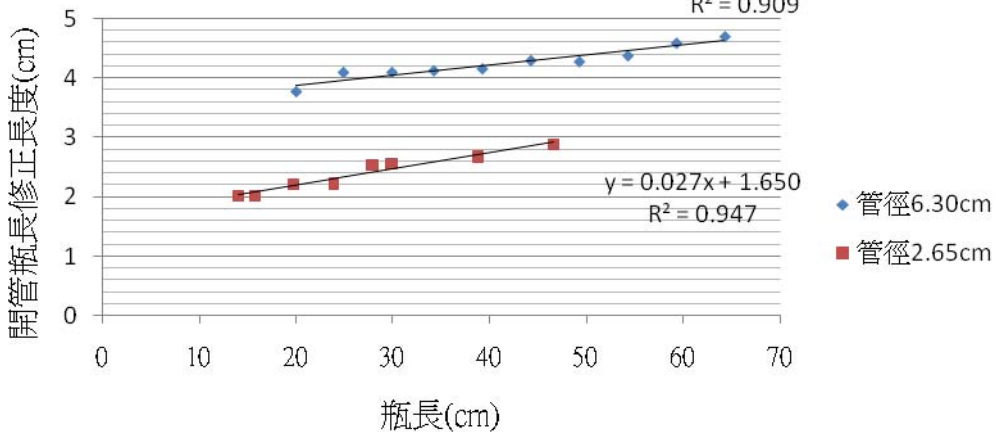
圖表 8

瓶長-閉管瓶長修正長度



圖表 9

瓶長-開管瓶長修正長度



圖表 10

將表格 14、15 分別繪製成圖表 7、8、9、10，由圖可知開、閉管瓶長修正比例與瓶長倒數成正相關。瓶長修正長度與瓶長成正相關，瓶長越長修正長度越長。我們推測這是由於瓶長較長時，共鳴管內的空氣柱較穩定，使聲波離開共鳴管開口後，可以行進較遠再反射，使有效空氣柱增長。

同一管徑開管修正長度大於閉管修正長度，經計算後發現，開管修正長度與閉管修正長度比值介於 1 到 2 之間，管徑較大時較接近 2，管徑較小時比值趨近於 1，表示管徑越小時，開、閉管的「有效瓶長」越接近。

同一瓶長，管徑較小時修正長度較小，顯示管徑較小時較符合駐波理論。我們認為這是因為管徑較大時，開口內外差異較小，也就是界面位置較不清楚，使聲波離開開口後可以行進較遠的距離再反射，有效空氣柱較長。

(七) 影響兩節圓筒瓶共振頻率的原因

1. 瓶身管徑 > 頸部管徑

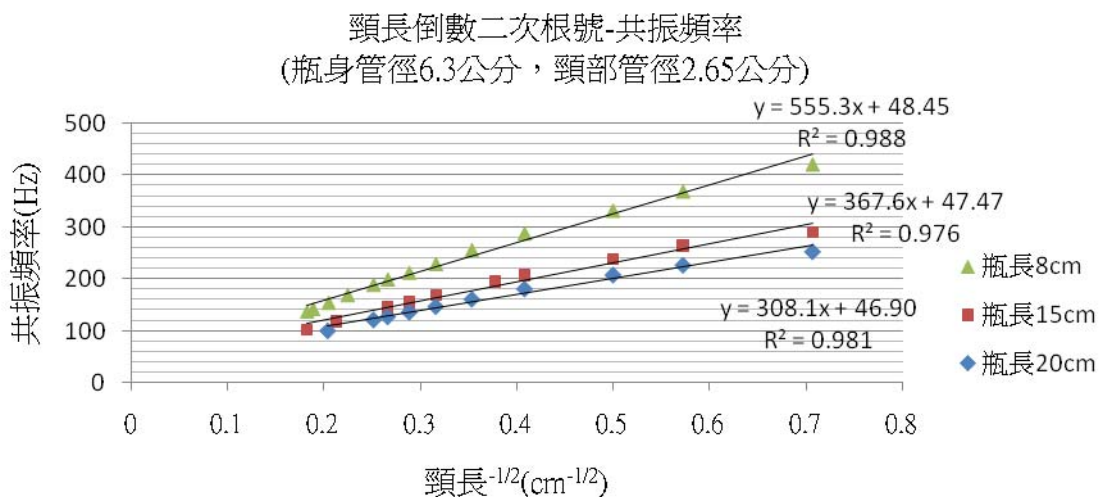
(1) 兩節圓筒瓶頻譜分析圖

由表格 16、18、21 可知，在兩節圓筒瓶的頻譜分析圖中，基音附近有另一略小於基音的頻率強度特別強，我們認為這是因為兩節圓筒瓶為兩柱狀共鳴管組成，不像理想共鳴腔瓶身處為一完全對稱的球體，因此共振情形較複雜，須考慮瓶內各處聲波反射的差異。

另外，將麥克風置於瓶身處時，錄製的聲音檔所得的頻譜分析圖中泛音不明顯（如表格 16 上圖、表格 18、21 所示）。頸長較長時將麥克風置於頸部處，錄製的聲音檔所得的頻譜分析圖中泛音明顯，且強度高於基音，基音與略小於基音的不尋長頻率均有泛音（如表格 16 下圖所示）。泛音與基音間的倍數關係不明確，且頸長不同時第一泛音與基音的比值不同。

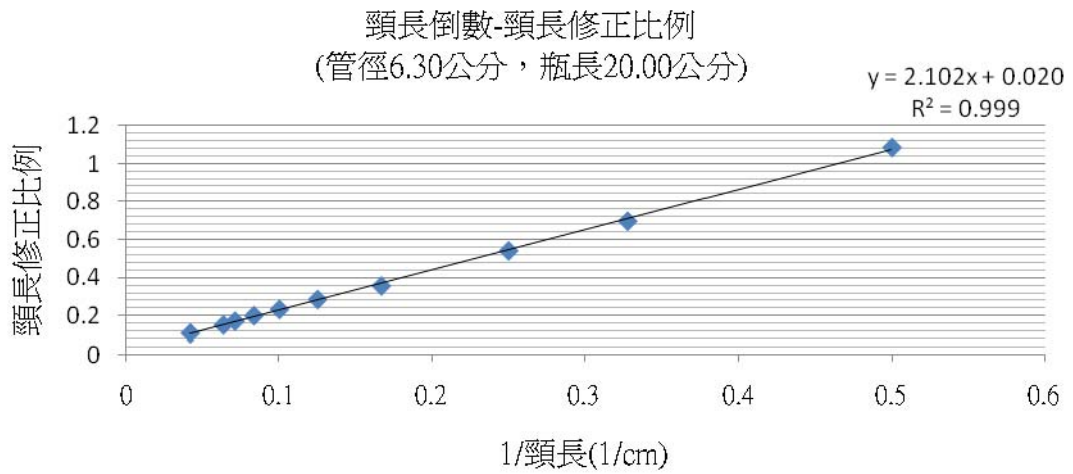
當頸長漸長，由頻譜分析圖可發現略小於基音的不尋長頻率強度漸強，甚至大於基音強度（如表格 21 下圖所示）。

(2) 實驗數據分析

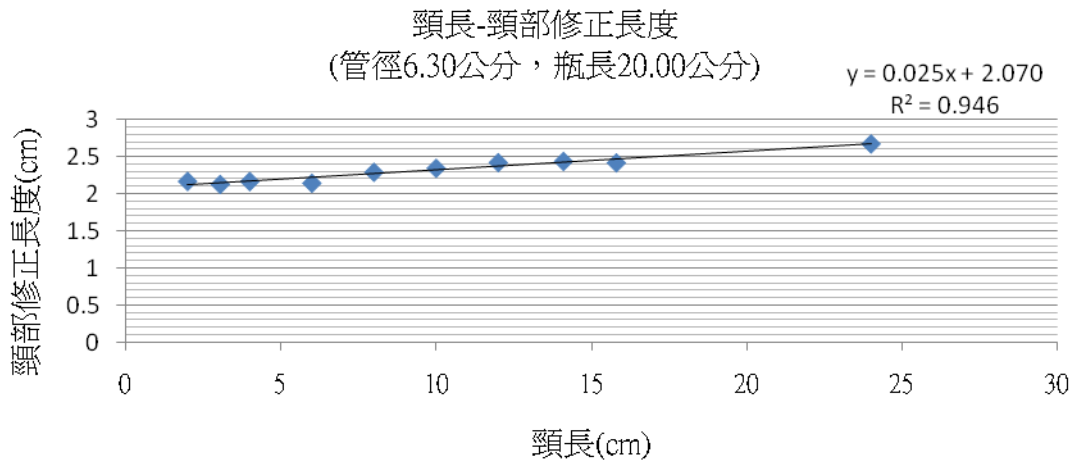


圖表 11

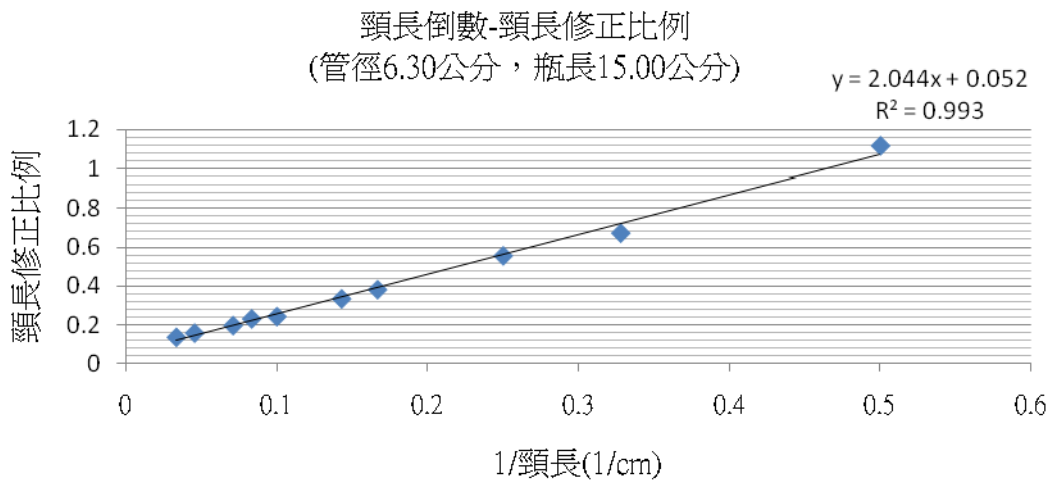
由表格 17、19、20 得到頸長的-0.5 次方與共振頻率的關係圖(圖表 11)，顯示共振頻率與頸長的-0.5 次方成正相關，符合腔體共振理論，但皆不成正比，顯示頸長需做修正。



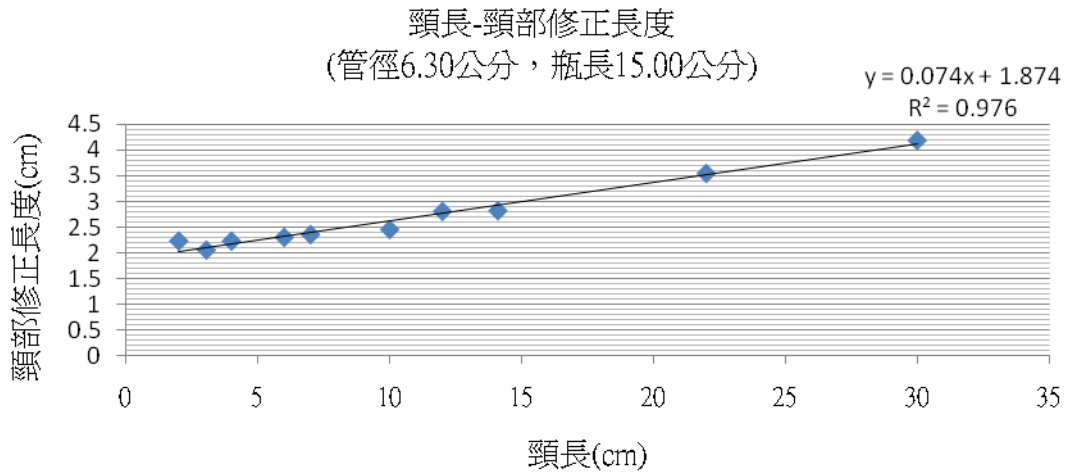
圖表 12



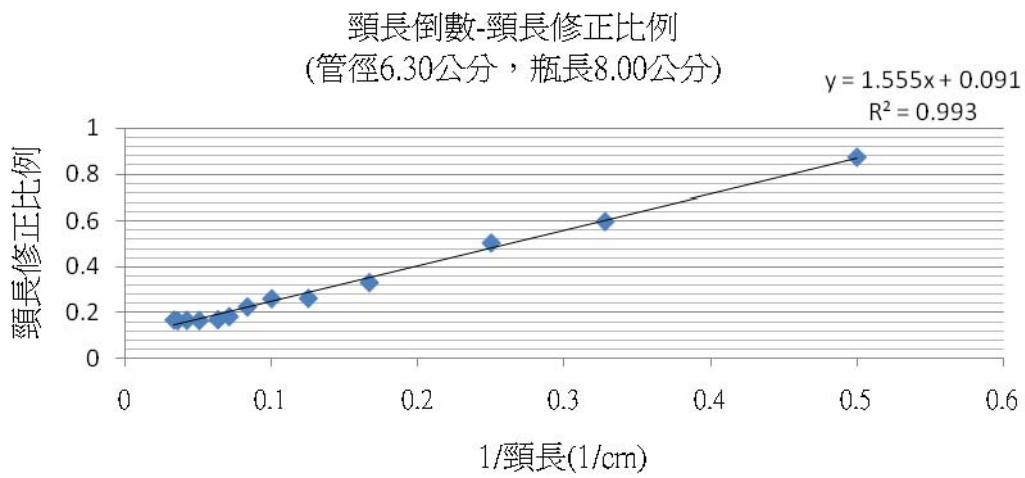
圖表 13



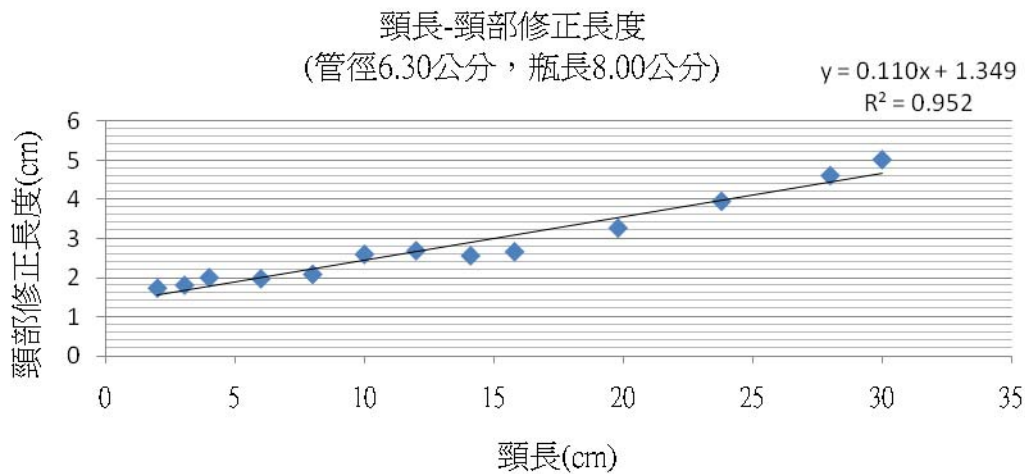
圖表 14



圖表 15



圖表 16



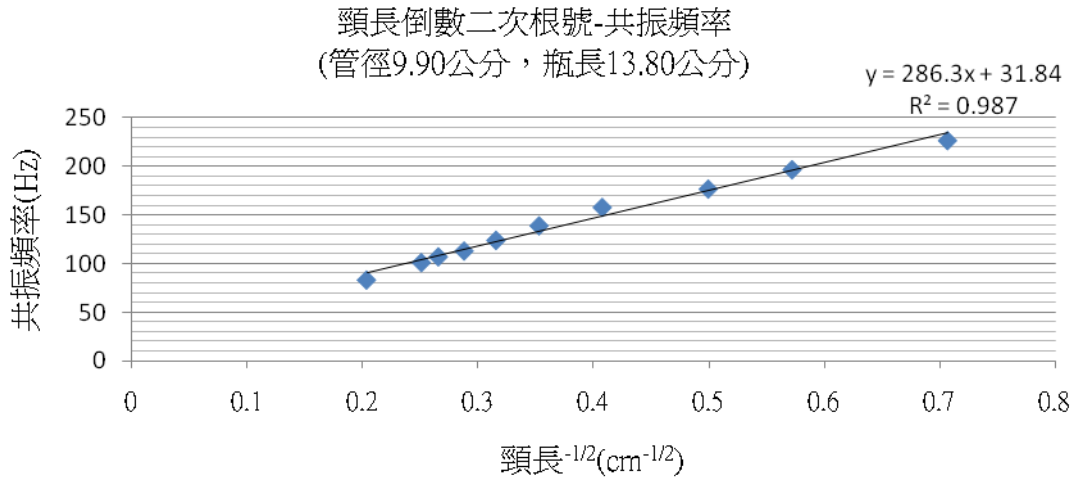
圖表 17

由圖表 12、13、14、15、16、17 可知，頸部修正比例與瓶長倒數成正相關。頸長修正長度與頸長倒數成正相關，頸長越長修正長度越長。我們推測這是由於頸長較長時，頸部內的空氣柱較穩定，使腔體外可隨著頸部

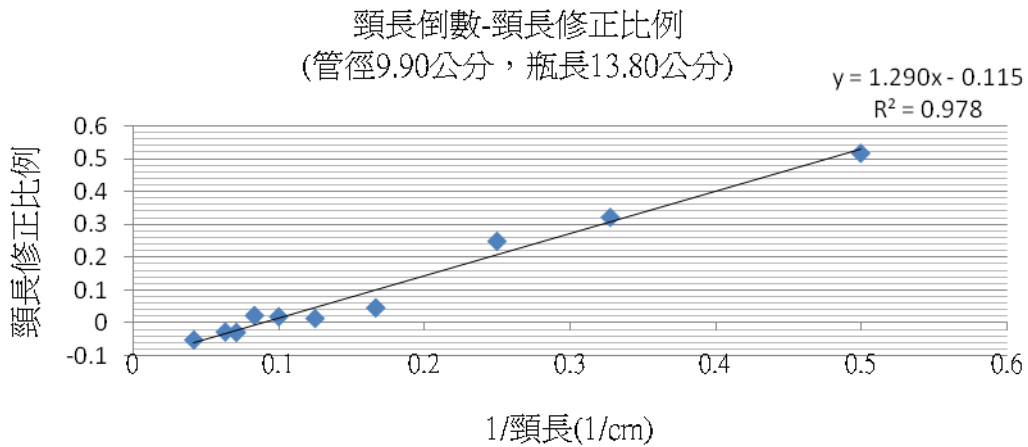
空氣活塞運動的空氣柱較長，也就是有效空氣柱較長。

另外，我們發現在頻譜分析圖解析度不夠高的情況下，共振頻率測量值與實際值間會有些許差異，而共振頻率差約 1Hz，修正長度會相差到數毫米，造成圖表判讀的差異。

頻譜分析圖中不尋常的頻率引起了我們的好奇，我們希望能進一步了解它的產生原因，因此我們利用瓶身管徑較大的罐子進行實驗，希望在瓶身與頸部管徑差異更大的情況下，讓瓶身及頸部的特性顯露出來，找出不尋常頻率的來源。

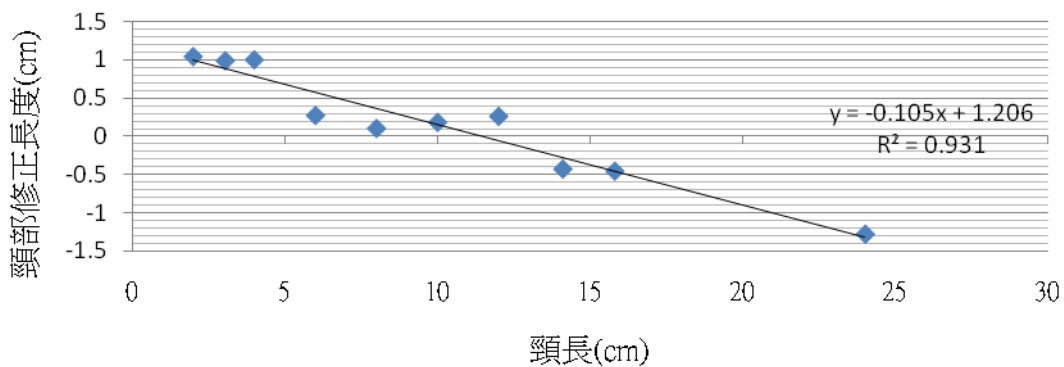


圖表 18



圖表 19

頸長-頸部修正長度
(管徑9.90公分，瓶長13.80公分)



圖表 20

由表格 22 得到頸長的-0.5 次方與共振頻率的關係圖 (圖表 18)，顯示共振頻率與頸長的-0.5 次方成正相關，符合腔體共振理論。

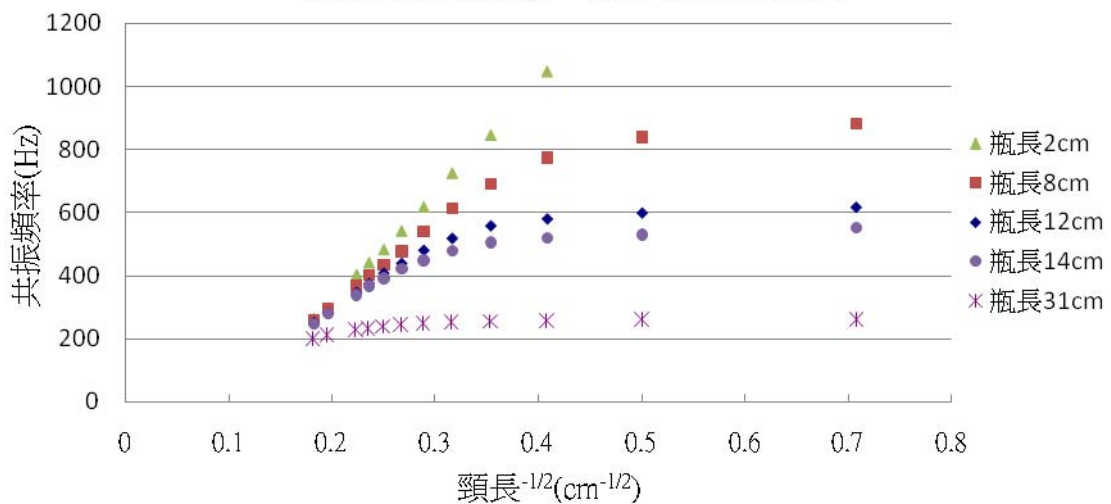
由圖表 19、20 可知，頸部修正比例與瓶長倒數成正相關，頸部修正長度大致與頸長成線性關係，但頸長越長修正長度越小，修正長度甚至出現負值。我們認為這是因為實驗四的兩節圓筒瓶瓶身管徑較大且體積較大，頸長較長時共鳴腔內的空氣黏滯性更高，造成頸部修正長度出現負值，不符合邊界效應。

2. 瓶身管徑 < 頸部管徑

我們將有共鳴作用的口腔視為一段氣管及口腔所構成，因此利用瓶身管徑小於頸部管徑的兩節圓筒瓶來模擬。

(1) 以頸長為變因

頸長倒數二次根號-共振頻率
(瓶身管徑2.65公分，頸部管徑6.30公分)



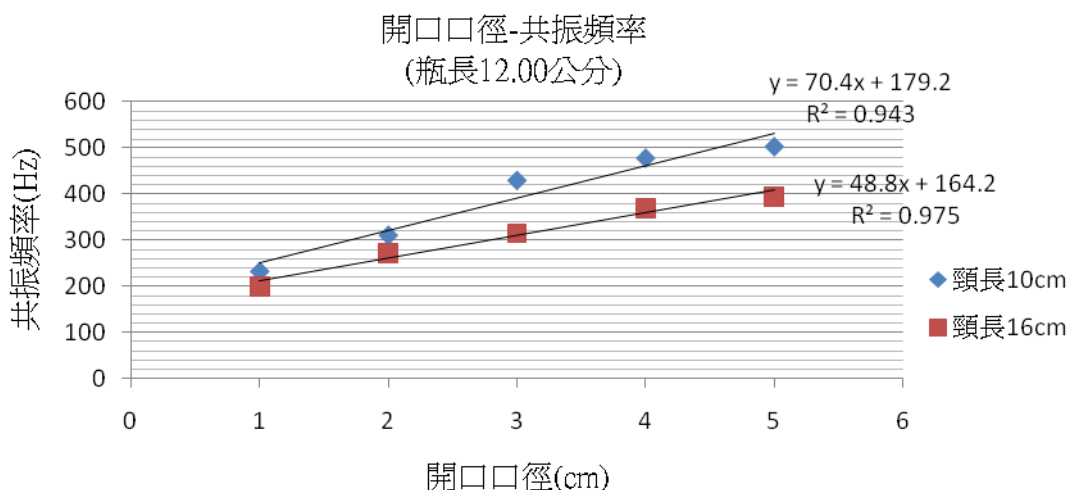
圖表 21

將表格 23 繪製成圖表 21，由圖可知頸長較長時，共振頻率與頸長的-0.5 次方成線性關係。當頸長漸短，共振頻率不再與頸長的-0.5 次方成線性關

係，圖中的曲線顯示，共振頻率值會趨近於瓶身的閉管共振頻率。瓶長越短頸部長度對共振頻率的影響越顯著，頸長越短瓶身長度的影響越顯著。

將實驗結果類比於吹口哨的情形，可以驗證吹高音時口腔內部容積較小，吹低音時口腔內部容積較大。

(2) 改變開口口徑



圖表 22

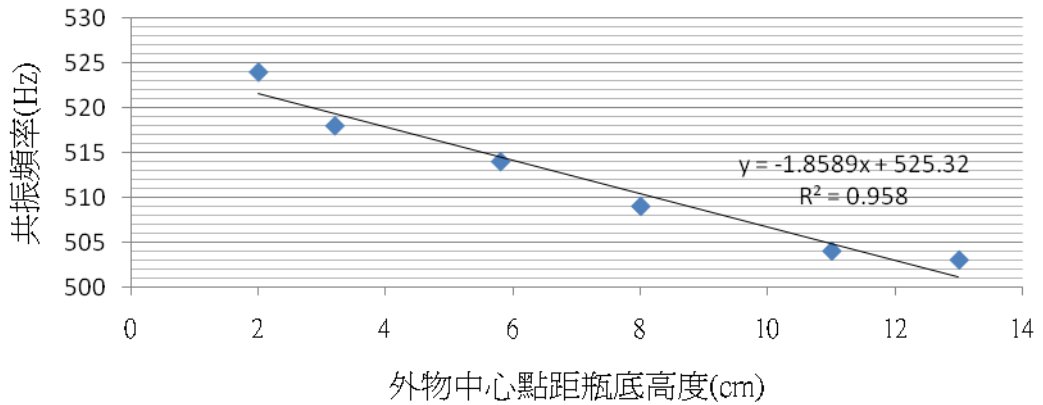
爲了模擬口腔開口可大可小的情形，我們改變兩節圓筒瓶的開口口徑，結果如表格 24。將表格 24 繪製成圖表 22，由圖可知共振頻率與開口口徑大致呈線性關係，表示共振頻率與開口面積根號呈線性關係，符合腔體共振理論。

綜合 1、2 兩種兩節圓筒瓶，可知兩節圓筒瓶開口在管徑較大的那端時，共振頻率比開口在管徑較小的那端時大。

三、探討共鳴腔內有外物時對共振頻率的影響

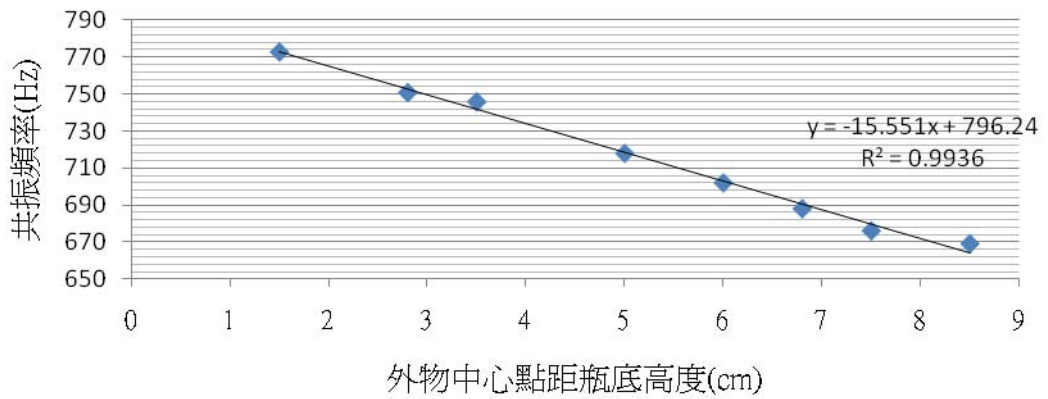
(一) 探討外物位置對共鳴腔共振頻率的影響

外物中心點距瓶底高度-共振頻率
(瓶長15公分，管徑6.3公分)



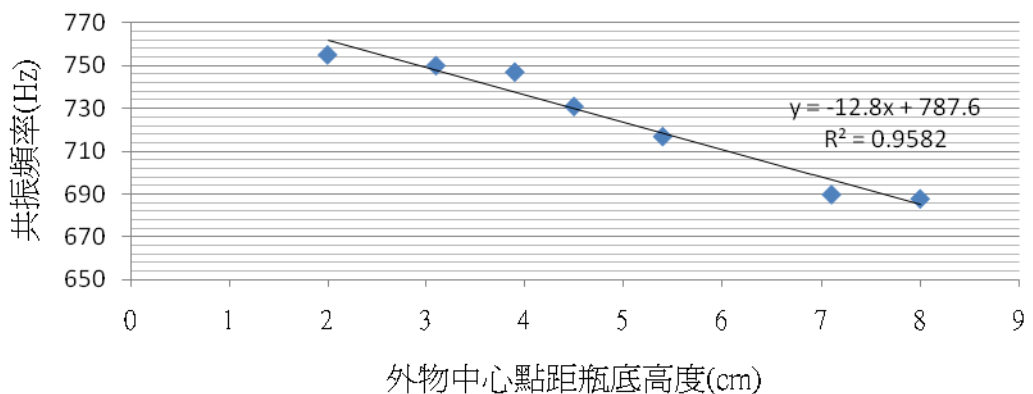
圖表 23

外物中心點距瓶底高度-共振頻率-1
(瓶長10公分，管徑6.3公分)



圖表 24

外物中心點距瓶底高度-共振頻率-2
(瓶長10公分，管徑6.3公分)



圖表 25

將表格 25、26、27 分別繪製成圖表 23、24、25，由表格 25、26、27 可知，當外物位於最低點時，其共振頻率較無外物時高，當外物位於最高點時（外物頂部未超過瓶口高度），其共振頻率較無外物時低。當外物高度恰為瓶長一半

時，共振頻率與無外物時的共振頻率大致相等。

由圖表 23、24、25 可知，外物中心距瓶底高度與共振頻率大致呈線性關係，當外物越靠近開口時，共振頻率越低。

柒、結論：

- 一、邊界效應確實存在：共鳴腔開口與腔體外氣體接觸之處，有一有效空氣柱在腔體外影響共鳴腔共振頻率。
- 二、由頻譜分析圖顯示的連續泛音可知圓底燒瓶、柱狀共鳴管內均有駐波模式的共振，而兩節圓筒瓶的共振模式更為複雜。
- 三、圓底燒瓶、改變開口口徑的柱狀共鳴管及兩節圓筒瓶均符合腔體共振理論。
- 四、在均勻柱狀共鳴管的實驗中，管長修正比例與管長倒數成正相關，管長越長修正長度越長。
- 五、同一管徑開管修正長度大於閉管修正長度，開管修正長度與閉管修正長度比值介於 1 與 2 之間。
- 六、共鳴管管徑越小越符合駐波理論。
- 七、在兩節圓筒瓶的實驗中，頸部修正比例與頸長倒數成正相關，頸長越長頸部修正長度越長。
- 八、在兩節圓筒瓶的實驗中，共振頻率與開口口徑呈線性關係。
- 九、共鳴腔內有外物時，外物中心距瓶底高度與共鳴腔共振頻率呈線性關係。外物位置越靠近開口，共鳴腔共振頻率呈線性遞減。外物中心距瓶底高度為瓶長一半時，共鳴腔共振頻率與無外物時的共振頻率大致相等。

捌、參考資料及其他

- 一、Jer Ming Chen, John Smith, Joe Wolfe (2008). Experienced saxophonists learn to tune their vocal tracts, *Science*, 8 February, 2008.
- 二、Cavity Resonance. Retrieved December 20, 2009, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/waves/cavity.html>
- 三、蔡振家（無日期）。泛音唱法的物理基礎。2009年12月20日，取自：
<http://www.sciscape.org/articles/overtone>
- 四、共鳴與發聲腔道（無日期）。2009年12月20日，取自：
<http://www.ling.fju.edu.tw/hearing/articulation-top.htm>
- 五、江文馨、林佳燕、陳怡文、陳怡雯（2003）。先聲奪人—從共鳴管到共振子。全國科學展覽會，高中組，物理科。

【評語】 040109

整體而言是優秀作品，從動機、實作、分析到整理成作品都具一定水準。作者的主動性亦很突顯，解決問題能力也強。然而對儀器的運作原理應再深入，對量測數據應自己再多作批判性的檢視。