

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國小組 物理科

團隊合作獎

080115

多管齊下-自製複管笛的音色探討

學校名稱：高雄市鳳山區忠孝國民小學

作者：	指導老師：
小六 郭宇恩	郭清進
小六 洪宇承	蕭雅琳
小六 吳秉森	
小六 蕭翔禧	
小六 邱暉哲	

關鍵詞：聲音的探討、電腦測音、複管笛

摘 要

本研究利用生活中隨手可得的水管、廢棄椰子殼與竹子(掃把柄)，嘗試研發製作出能同時發出旋律音與持續音的特殊樂器，並探討其旋律音與持續音之間所產生的音色和諧度的變化。

由於「雙管鼻笛」與「葫蘆絲」的構造比較特殊，我們除了探討相關文獻，了解笛類樂器的發聲頻率公式外，還實際操作器械，藉由自製的水管笛驗證管長、管徑與吹嘴對基音頻率理論的可行性。電腦頻譜軟體，除了可以分析主管與副管(和音管)在各音階的的和諧程度外，更可以作為我們自製樂器微調管長或音孔大小的依據。

壹、研究動機

在課堂中，我們從影片中看見了原住民鼻笛的演奏與介紹，並對其特殊的音響效果感到好奇。在請教老師的過程中我們發現，笛類樂器通常都是單管演奏的，而能夠同時發出兩個音或兩個音以上的樂器很少，除了雙管鼻笛外，還有中國的葫蘆絲，這兩個樂器在演奏的樂曲大多緩慢悠揚，具有獨特的韻味。這對平時只接觸西洋直笛的我們來說，真是大開眼界。在這次的研究中，我們除了要了解這一類樂器的構造外，還想探討不同的開管笛和閉管笛組合音響效果到底有甚麼不同。

貳、研究目的

1. 探討管長、管徑與吹口氣窗對基音頻率理論和實測的相關性。
2. 探討以直笛孔位長度比來製笛的適用性。
3. 探討主管與副管(和音管)在各音階上的和音效果。
4. 自製和諧程度最佳的「複管樂器」。

參、研究設備及器材

(一)設備：電腦、麥克風。

(二)軟體：錄音與頻譜分析軟體--Cool Edit Pro 2 (圖 1)、校音軟體--Syaku 8 (圖 2)

(三)器材：廢棄椰子殼、竹子(掃把柄)、塑膠瓶、塑膠軟墊、塑膠管。

(四)工具：60cm 長尺、游標尺、圓管切割器、圓口刀、圓形切割器、美工刀、鑽孔刀、銼刀、砂輪機、鋸子和剪刀。



圖 1 頻譜分析軟體--Cool Edit Pro 2

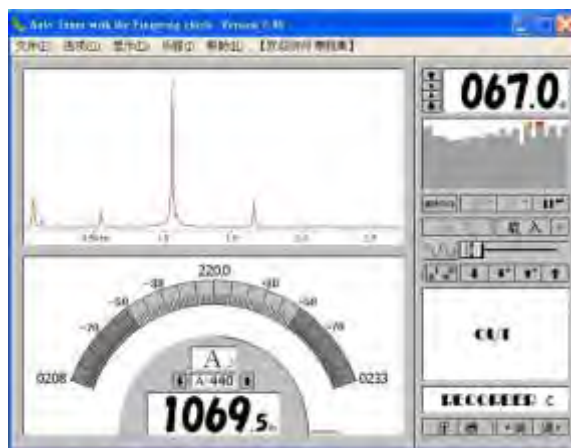


圖 2 校音軟體--Syaku 8

肆、研究過程與方法

一、相關資料蒐集與探討

(一)雙管鼻笛與葫蘆絲的探討

本研究利用生活中隨手可得的廢棄椰子殼與竹子(掃把柄)，嘗試研發製作出類似「複管鼻笛」與「葫蘆絲」的一種深具獨特性「複管樂器」，因此，針對雙管鼻笛與葫蘆絲做進一步的了解與探討。

排灣族的雙管鼻笛(圖3)，兩管等長，其中一管無按孔，另外一管多為3~4個按孔，有指孔一管可吹奏旋律，另一管則為持續低音。由於製作材料的關係，較難有統一的規格尺寸，由史料得知其尺寸長約為一尺3寸到二尺之間。



圖3 雙管鼻笛

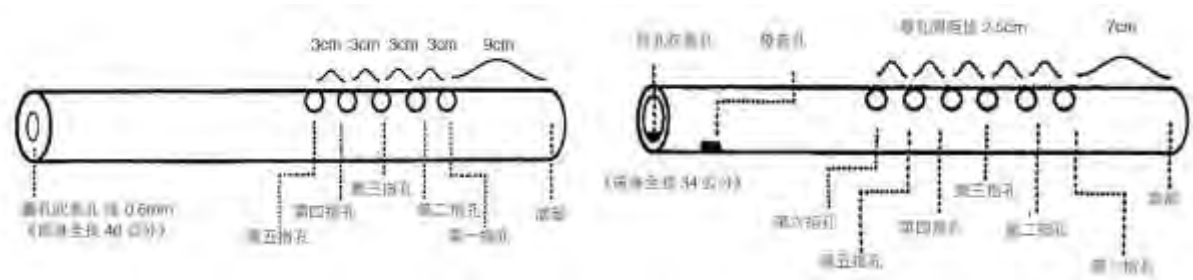


圖4 謝水能傳習單位運用電腦繪圖圖示排灣笛基礎構造

排灣笛的基礎構造如圖4所示，圖左為圓孔吹氣孔，圖右為具有發音孔的斜孔吹氣孔構造。

吹奏者表示「有孔一管有如『在說話』，無孔一管則為在旁『配音』」，此不但與排灣族歌謠「一人領唱，其他人配唱」複音唱法相互輝映，亦體現排灣族階層文化的特殊關連。

葫蘆絲(圖5)是雲南少數民族特有的樂器之一。這種樂器用小葫蘆作為音箱，以三根長短不一的竹管並排插在葫蘆下端，竹管嵌有銅質簧片，中間較長的一根竹管開七孔。



圖5 葫蘆絲

吹奏時口吹葫蘆細端，指按中間竹管的音孔，在奏出旋律的同時，左右兩根竹管同時發出固定的單音，與旋律構成和音。其音樂輕柔細膩，圓潤質樸，極富表現力，深受大家的喜愛。

(二)聲音的探討

從聲學的角度來看，樂音有三個主要特徵，即響度、音調、音色，稱為樂音三要素。聲音的強弱程度稱為響度，響度和聲波的振幅大小有關，聲波的振幅愈大，所聽到的聲音也就愈大。而聲音的高低稱為音調，聲音的頻率愈大，則聽到的聲音也就愈高昂；相反地，頻率愈小，聽到的聲音也就愈低沉。發聲體的發音特性稱為音色，其決定因素為發聲體所發出聲波的波形，若波形不同，則音色也不一樣。對於不同的樂器所發出的聲音，即使頻率都調成一樣，但其音色各不相同。圖 6 為五種不同的樂器，以相同頻率所發出的聲音波形。

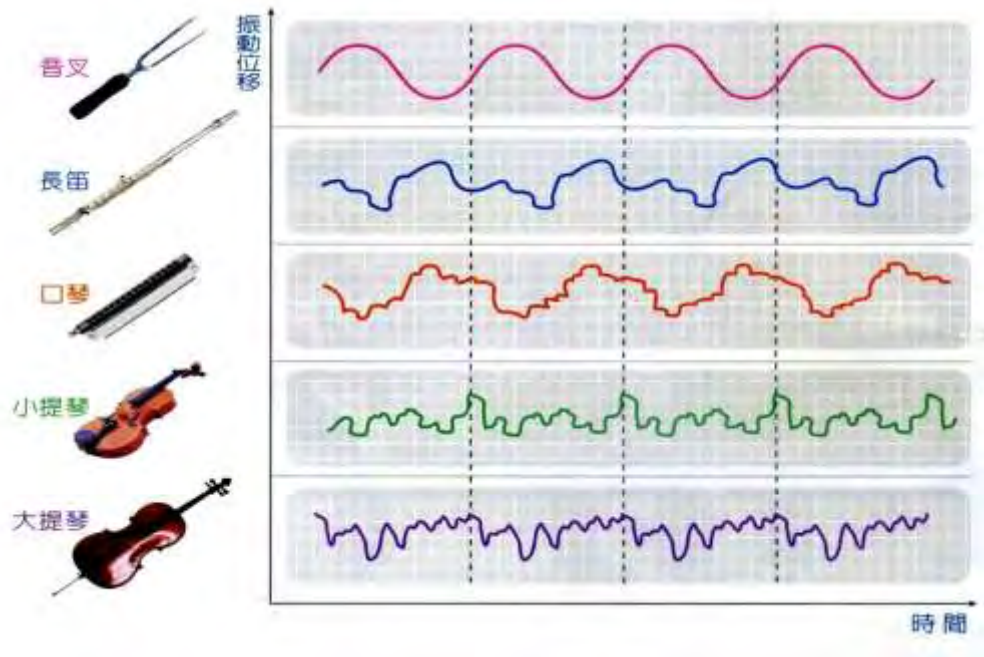


圖 6 不同的樂器所發出聲音的波形
 資料來源：陳炳亨（2013，頁 68）

閉管笛的波形單純穩定與陶笛類似(圖 7)，而直笛會因壓力而產生變化波形(圖 8)，所發出的聲音乃是由基音和多組不同頻率的泛音複合而成的複合波，其中泛音的頻率必為基音頻率的整數倍。基音與泛音所組成的複合波形如圖 9 所示：

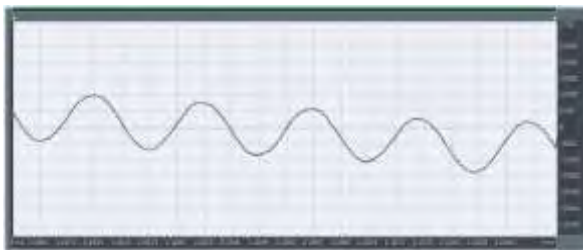


圖 7 閉管笛的波形單純穩定

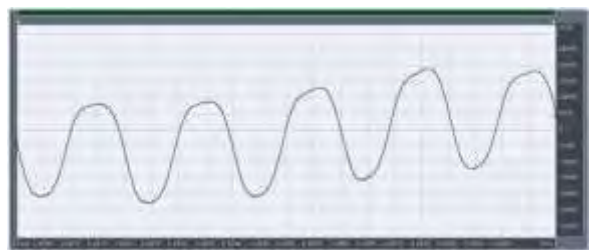


圖 8 直笛因壓力而產生變化波形

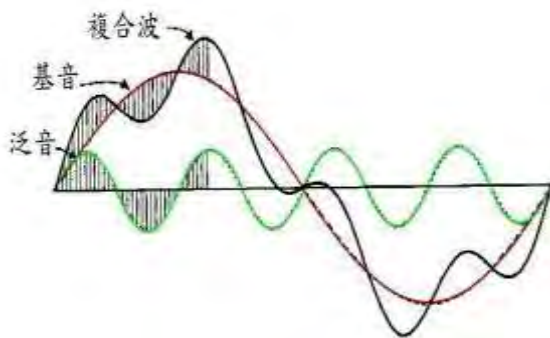


圖 9 基音與泛音所組成的複合波形



圖 10 C4 和 C6 和音所組成的複合波形

圖 9 所述基音與泛音所組成的複合波形，是由 C4(261.3Hz)和 C6(1046.5Hz)所合成，利用音樂半日通軟體發出 C4 和 C6 和音，得到結果如圖 10 所示，理論與實測符合。

本研究所採用的音高值，是以國際標準音的頻率（赫茲：Hz）來表示，各音階相對的頻率，如表 1 所示：

表 1 音階與頻率對照表

音符	頻率	音符	頻率	音符	頻率	音符	頻率
C4	261.63	C5	523.25	C6	1046.50	C7	2093.00
D4	293.66	D5	587.33	D6	1174.66	D7	2349.32
E4	329.63	E5	659.26	E6	1328.51	E7	2637.02
F4	349.23	F5	698.46	F6	1396.91	F7	2793.83
G4	392.00	G5	783.99	G6	1567.98	G7	3135.96
A4	440.00	A5	880.00	A6	1760.00	A7	3520.00
B4	493.88	B5	987.77	B6	1975.53	B7	3951.07

(三)製笛理論公式的探討

(1) 閉管空氣柱形成駐波：

外來的干擾（如吹氣）經由此開口端使管內的空氣柱發生振動形成駐波(圖 11)，以管內介質（即空氣分子質點）的振動位移而言，開口端為波腹，閉口端則為波節，其間可以另有波節，也可以沒有波節，故當空氣柱形成駐波時，管長為四分之一個波長的奇數倍，見右圖。設管長為 ℓ ，波長為 λ ，則

$$\ell = n\left(\frac{\lambda}{4}\right) \quad n=1,3,5,7,\dots$$

駐波的頻率則為

$$f = \frac{nv}{4\ell} \quad n=1,3,5,7,\dots$$

$n = 1$ 時的聲音稱為基音，其頻率稱為基頻，

$n = 3,5,7,\dots$ 時的聲音稱為泛音，其頻率稱為泛頻。

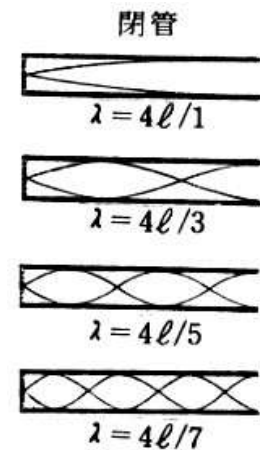


圖 11 閉管駐波示意圖

(2) 開管空氣柱形成駐波：

若為開管（兩端皆須打開），以管內介質（即空氣分子質點）的位移而言，兩端均為波腹，其間可以另有波節，也可以沒有波節，故當空氣柱形成駐波時，管長為二分之一個波長的整數倍，如圖 12 所示。設管長為 l ，波長為 λ ，則

$$l = n\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad n=1,2,3,4,\dots$$

駐波的頻率則為

$$f = \frac{nv}{2l} \quad n=1,2,3,4,\dots$$

n 等於 1 時為基音，其餘為泛音。

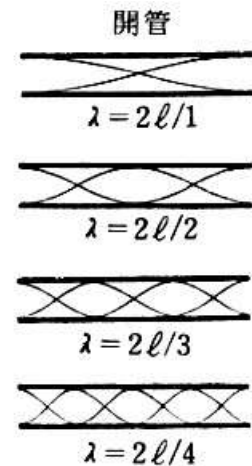


圖 12 開管駐波示意圖

(3) 有效管長的修正

在《*Fundamentals of Musical Acoustics*》這本書，有一張模擬長笛發聲時的內部空氣壓力圖，如圖 13 所示：

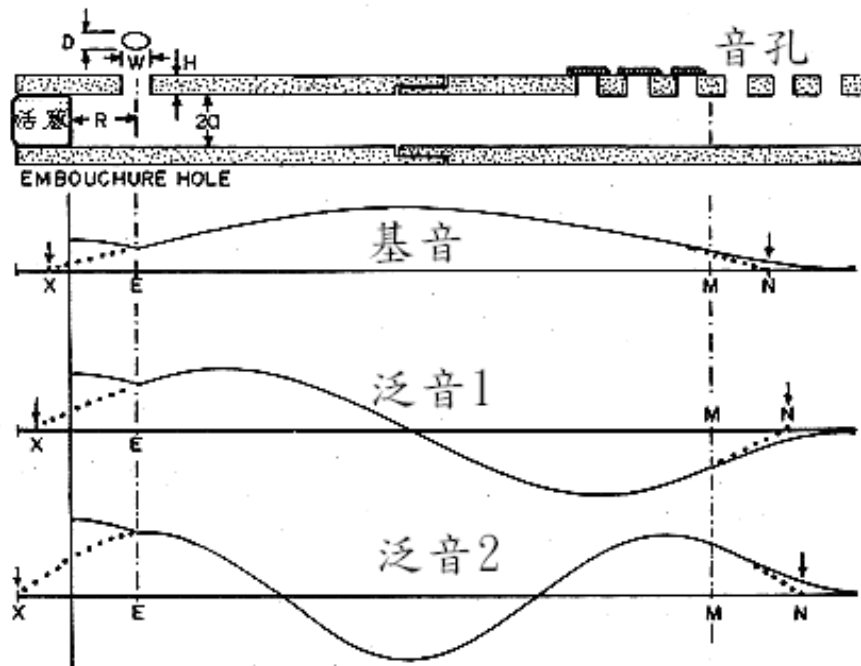


圖 13 長笛的前三種駐波模式的內部空氣壓力圖

假設平衡位置為外界壓力，吹奏長笛時，內部空氣會產生疏密波，在E、M兩孔位置上，因空氣可以流通，故壓力會較接近外界的壓力，而於E、M兩孔之間的空氣柱壓力則相對較大，而形成疏密波，並且發出聲音。

理論上來講此疏密波的波長應是E、M兩孔距離的兩倍，因E、M兩孔在平衡位置上，中間剛好有一個波峰，形成半個波長，不過從圖13 可看出，在實際狀況下E、M兩孔不會在平衡位置上，而是向兩側延伸至平衡位置X、N的虛線才是真正的半個波長，由此可知，長笛實際吹奏時波長會有一定的誤差。而圖13 的泛音1，其向兩側延伸的平衡位置X、N，略大於基音。在直笛發聲時，其內部所產生的駐波，並不是只有一種，在其最低頻率的整數倍都可形成駐波，而最低的頻率稱為基音，決定直笛所吹的音高，其餘則決定音色，稱為泛音。

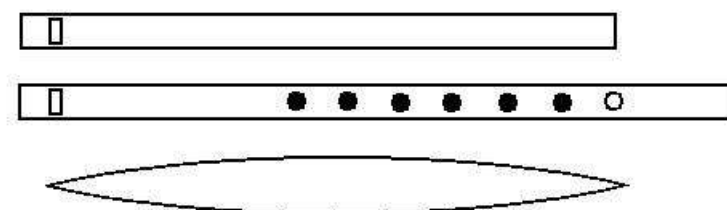


圖14 開放音孔與音管長度的關係

一個開放音孔就像是外面的空氣產生“短路”，所以先開音洞的作用幾乎好像長笛被“鋸斷”的基調孔的位置附近，其關係如圖14所示。

(4) 製笛理論公式：

粗看起來，笛子一端閉塞，一端開口，直覺上容易認為它是“閉管”，以往許多學者，就往往把它作“閉管”來分析研究。實際上，由於在吹孔處，管內空氣柱已與大氣接通，其振動方式，與開管類似。因此，必須把它作“開管”來進行分析研究。

為了證明直笛是“開管”而不是“閉管”，取一支管徑 15mm 的竹子，製成管長 30cm 的直笛，吹奏測其頻譜分析，得到結果如圖 15 所示：

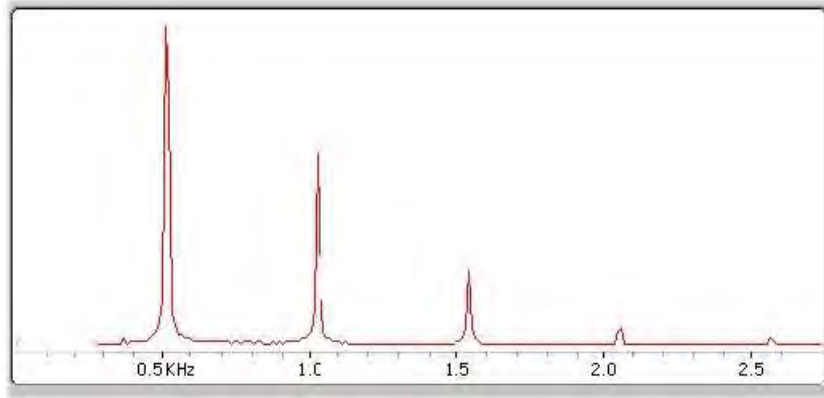


圖 15 開管直笛的頻譜分析

由圖 15 得知泛音為基音的整數倍與理論相符。將音管末端以軟墊塞住使其成為管長為 13cm 的閉管笛，吹奏測其頻譜分析，得到結果如圖 16 所示：

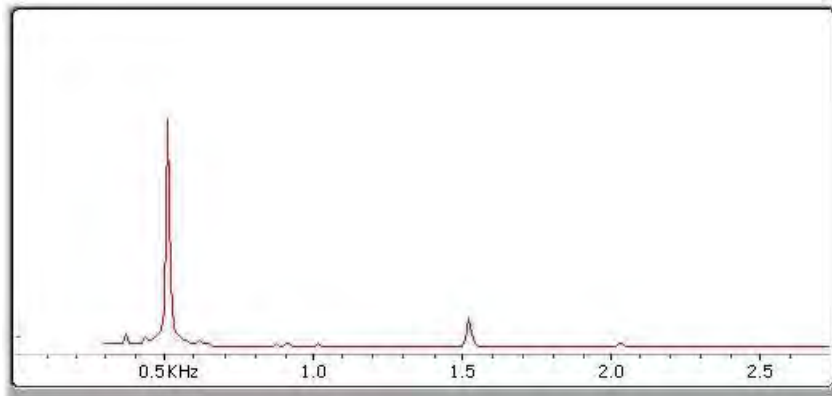


圖 16 閉管直笛的頻譜分析

由圖 16 得知泛音為基音的 3 倍與理論相符。而理論公式亦談到欲得到相同頻率的直笛管長，閉管笛所需的長度約為開管笛的一半即可，在此也可得到驗證。

趙松庭在〈橫笛頻率計算與應用〉中提到，其管長修正數的計算公式與方法如下：

開管頻率公式 $F = N \frac{C}{2L}$ 公式 1

L 為有效管長，而 $N=1$ (基音), 2 (泛音一), 3 (泛音二)...

聲速公式： $C = 331 + 0.6T^{\circ}C$ 公式 2

設實際管長為" l "， R_1 為吹氣端管半徑， R_2 為末端管口半徑，則

$$L = \text{實際管長 } l + \text{吹氣端修正 } \delta_1 + \text{管口修正 } \delta_2 \quad \dots\dots \text{公式 3}$$

$$\text{若笛唇邊緣為平面，則吹氣端修正可簡化為 } \delta_1 = 1.7r \left(\frac{R_1}{r} \right)^2$$

" r "為圓形吹孔的平均半徑，而直笛與本實驗用笛的氣窗均為方形，則

$$\text{採其 } r = \sqrt{\frac{\text{長} \times \text{寬}}{\pi}} \text{ 計算之。}$$

$$\text{管口修正 } \delta_2 = 0.6R_2$$

$$\text{實際管長 } l = (346000/2F) - 1.7r \times (R_1/r)^2 - 0.6R_2 \quad \dots\dots \text{公式 4}$$

為了計算方便和切合實際需要，身在台灣溫度的標準取 25℃。即聲速 $C = 331 + 0.6 \times 25 = 346$ 米/秒。在公式中 r ：氣窗的折合半徑， R_1 ：吹口處音管半徑， R_2 ：管口處音管半徑，以上均可測量得知，而 F (筒音頻率) 可由表 1 查知，因此可經由計算求得各調值的實際管長 l (單位 mm)。

二、各種音調直笛的孔位調查與記錄

孔位與孔徑為影響音階頻率的主要因素，為製作各音調竹笛的音階，特針對現有的中音笛以下各種音調的直笛做調查 (表 2)，以做為製笛的參考依據。

表 2 各種音調的直笛調查記錄

編號	孔位 笛別	0	1	2	3	4	5	6	7	氣窗	管長	管徑 前/後	備註
		l/r	l/r	l/r	l/r	l/r	l/r	l/r	l/r				
1	中音 F	140	148	180	212	249	281	303	330	3.8× 12.2	407	18.2	COMTEX
		0.344	0.364	0.442	0.521	0.612	0.690	0.744	0.811			11	
2	高音 C	93	98	120	142	164	186	207	233	3.6×10	281	13.4	YAMAHA (B)
		0.331	0.349	0.427	0.505	0.584	0.662	0.737	0.829			8.8	
3	高音 C	94	99	120	142	165	190	208	233	3.6×10	281	13.6	YAMAHA (G)
		0.335	0.352	0.427	0.505	0.587	0.676	0.740	0.829			8.6	
4	高音 F	69	73	90	106	123	142	155	174	3×7.2	210	10.0	AULOS 507B-E (B)
		0.329	0.348	0.429	0.505	0.586	0.676	0.738	0.829			6.4	
孔位長度比 r		0.335	0.353	0.431	0.509	0.592	0.676	0.740	0.824				

長度單位：mm

三、音管的設計與製作

(一)音管吹嘴的設計

參考各音調的直笛吹嘴尺寸，設計音管的吹嘴，其設計圖如圖 17 所示：

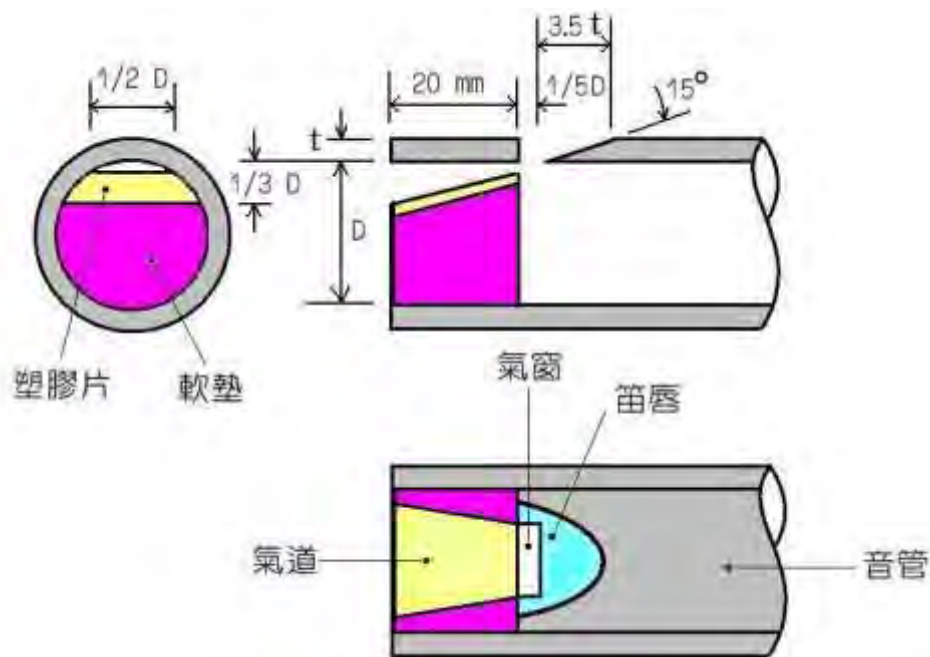


圖 17 音管吹嘴設計圖
(圖片取自：知「竹」嘗「樂」)

(二)音管的孔位設計

依表 2 各種音調的直笛調查記錄，所設計音管的孔位比，來開挖音孔位置，其設計圖如圖 18 所示：

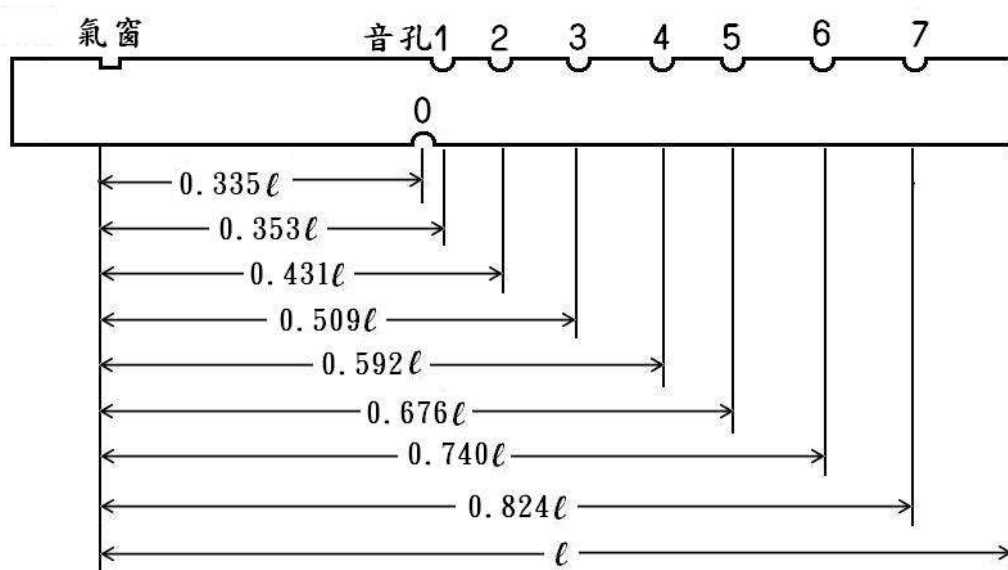


圖 18 音管的孔位長度比

(三)音管的製作流程

首先選擇音管的材料，測量音管前後內徑(R_1 與 R_2)，取其平均內徑的8~20倍長當笛管，依公式4 計算符合製作的音調所需長度，依調查各音調直笛的音孔與管長比做為開挖音孔的依據，以電腦校音軟體Syaku 8由孔7起依序檢測，調整孔徑大小直至音準，音管的製作流程圖如圖19 所示：

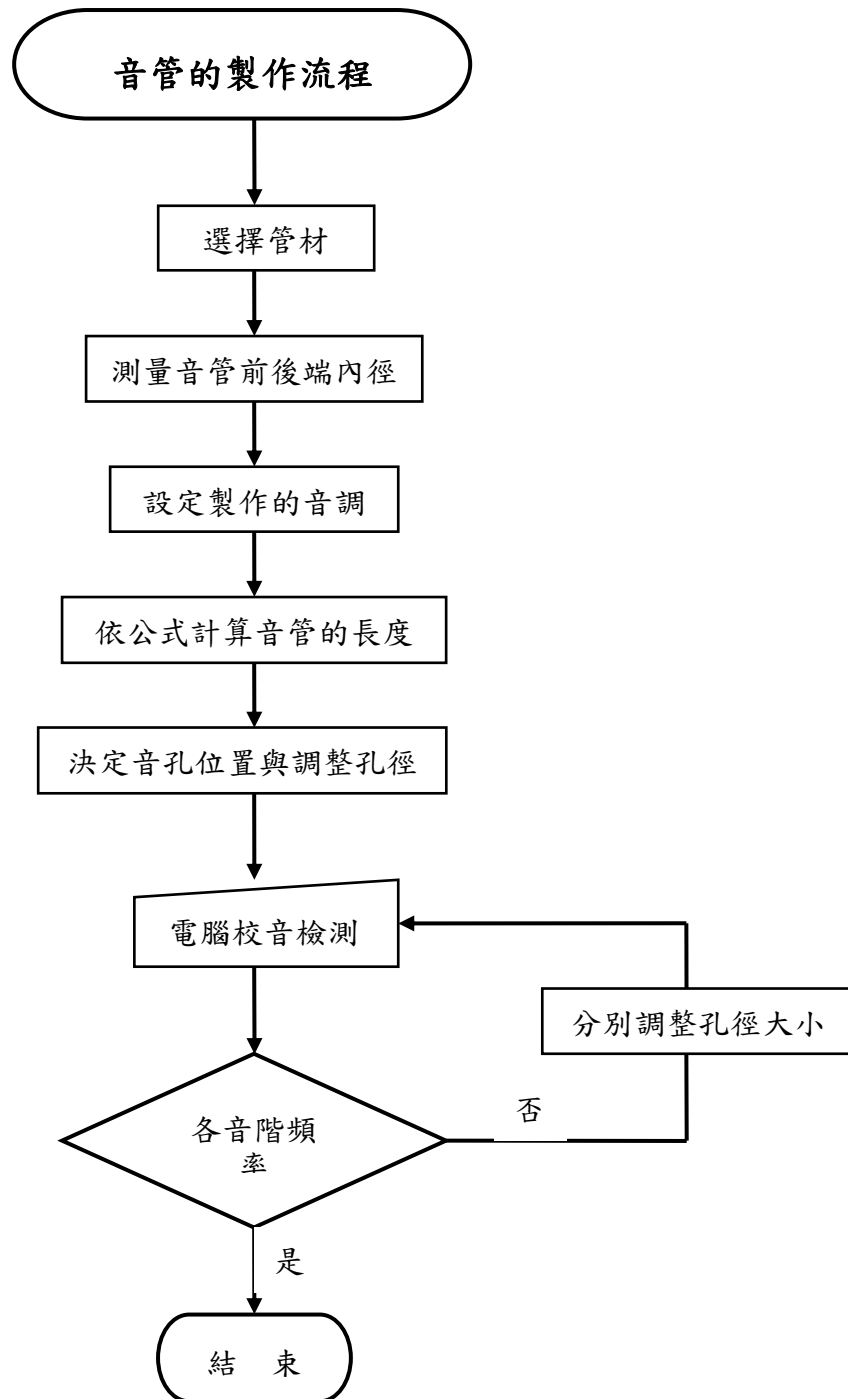


圖 19 音管的製作流程圖

四、研究主題

研究一：探討管長、管徑與吹口氣窗對基音頻率理論和實測的相關性。

1. 要改變的項目：(1) 音管長短：參考高音 F5~中音 F 直笛的管長，氣窗末端至音管末端的長度，由 20~40 cm，水準值 2 cm，共分 11 個水準。

(2) 音管粗細：選用粗管(16mm 水管，內徑 17.6mm) 與細管(13mmE 管內徑 14.8mm) 的塑膠管，共 2 個水準。

2. 要觀察的項目：音高

3. 保持不變的項目：吹奏者、使用相同的吹嘴、氣溫高低、錄音場所。

研究二：探討以孔位長度比來製笛的適用性。

分別使用高 C、高 F 與超高 C 之音管來進行實驗。

1. 要改變的項目：

(1) 音孔的位置：參考直笛長度 l 與孔位，孔位長度比 r 分別為 0.335 l 、0.353 l 、0.431 l 、0.509 l 、0.592 l 、0.676 l 、0.740 l 與 0.824 l ，共 8 個水準。

(2) 音孔的大小：分別調整各孔徑大小，由小到大，直至音階頻率吻合。

2. 要觀察的項目：音調

3. 保持不變的項目：吹奏者、氣溫高低、錄音場所。

研究三：探討主管與副管(和音管)在各音階上的和音音色

主管吹奏主要旋律，副管則發出持續的和音，原則上主管的基音響度(振動強度)要大於副管，為了解主管與副管(和音管)在各音階上的頻譜分析，特進行下列的實驗。

實驗一：以現有直笛改裝進行實驗



圖 20 利用現有直笛改裝進行實驗

1. 要改變的項目：音管組合
分主管(C5)與管(C5)、主管(C5)與副管(F5)、主管(C5)與副管(G5)、主管(C5)與副管(E5、G5)三管組合，共 4 個水準。
2. 要觀察的項目：頻譜分析
3. 保持不變的項目：吹奏者、氣溫高低、錄音場所。

實驗二：以膠管笛進行實驗



圖 21 利用各種膠管製成複管笛進行實驗

1. 要改變的項目：音管組合

分主管(C5)與副管(C5)、主管(F5)與副管(F5)、主管(C6)與副管(C6)，共 3 個水準。

2. 要觀察的項目：頻譜分析

3. 保持不變的項目：吹奏者、氣溫高低、錄音場所。

研究四：以自製複管竹笛進行實驗，製作和諧程度最佳的「複管樂器」。

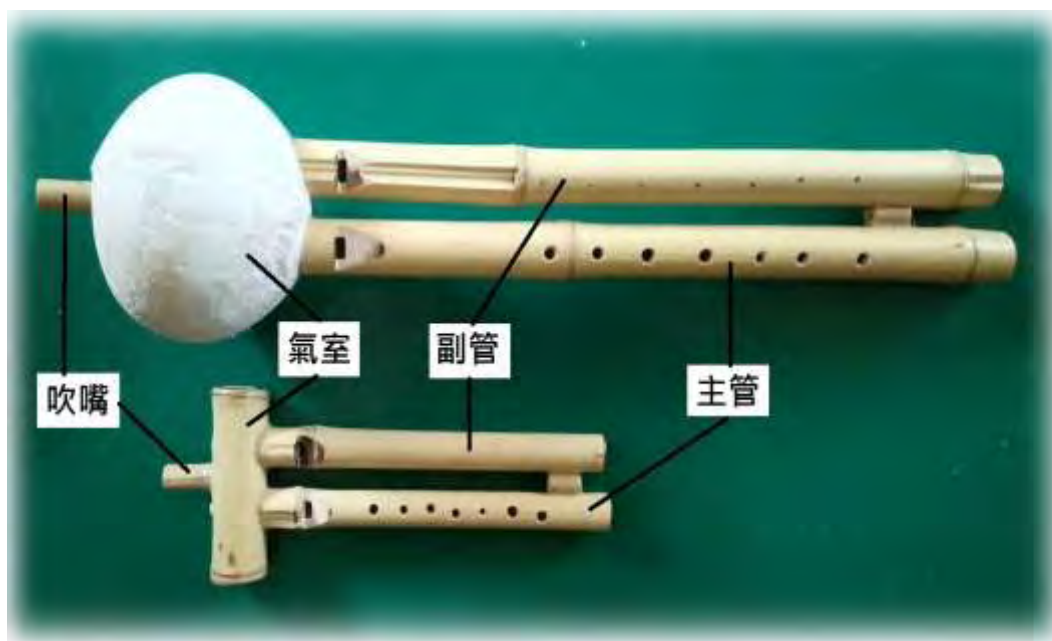


圖 22 利用椰子殼與竹子製成複管笛進行實驗

1. 要改變的項目：音管組合

分主管(C5)與副管(C5)、主管(C6)與副管(C6)，共 2 個水準。

2. 要觀察的項目：頻譜分析

3. 保持不變的項目：吹奏者、氣溫高低、錄音場所。

4. 製作和諧程度最佳的「複管樂器」。

伍、研究結果分析與討論

一、探討管長、管徑與吹口氣窗對基音頻率理論和實測的相關性

為快速求得實際管長與基音頻率的推測值，應用 Microsoft Excel 試算軟體(圖 23)將公式 4 寫入儲存格內，分別將各已知條件輸入來進行推估。



圖 23 利用 Microsoft Excel 試算軟體

由細管（13mmE 管）與粗管（16mm 水管）的各水準頻率推估計算與實測頻率誤差記錄，如表 3 所示：

表 3 不同管徑各水準頻率推估計算與實測頻率誤差記錄

管長	推估頻率		實測頻率		推估誤差%	
	細管	粗管	細管	粗管	細管	粗管
20	736.0	714.4	745.9	724.7	1.33	1.42
22	678.3	659.9	683.2	671.2	0.72	1.68
24	629.0	613.1	637.0	627.1	1.26	2.23
26	586.3	572.5	592.3	581.3	1.01	1.51
28	549.1	537.0	553.1	542.3	0.72	0.98
30	516.3	505.6	525.6	505.8	1.77	0.04
32	487.3	477.7	492.9	486.1	1.14	1.73
34	461.3	452.7	463.3	457.6	0.43	1.07
36	437.9	430.2	441.8	430.6	0.88	0.09
38	416.8	409.8	420.3	409.1	0.83	-0.17
40	397.7	391.2	399.7	387.6	0.50	-0.93

結果一：由表 3 得知，在未開音孔的條件下，細管（內徑 14.8mm）的筒音平均推估誤差 0.96%、粗管（內徑 17.6mm）平均推估誤差 0.88%。

結果二：細音管與粗音管其誤差均小於 2%，直笛的筒音有效管長（公

式 3) $L = l + \delta_1 + 0.6R$ 得到驗證。因此，由公式 4 可以求得各音調的實際管長。

結果三：將表 3 的資料進行統計分析，得到結果如圖 24~25 所示：

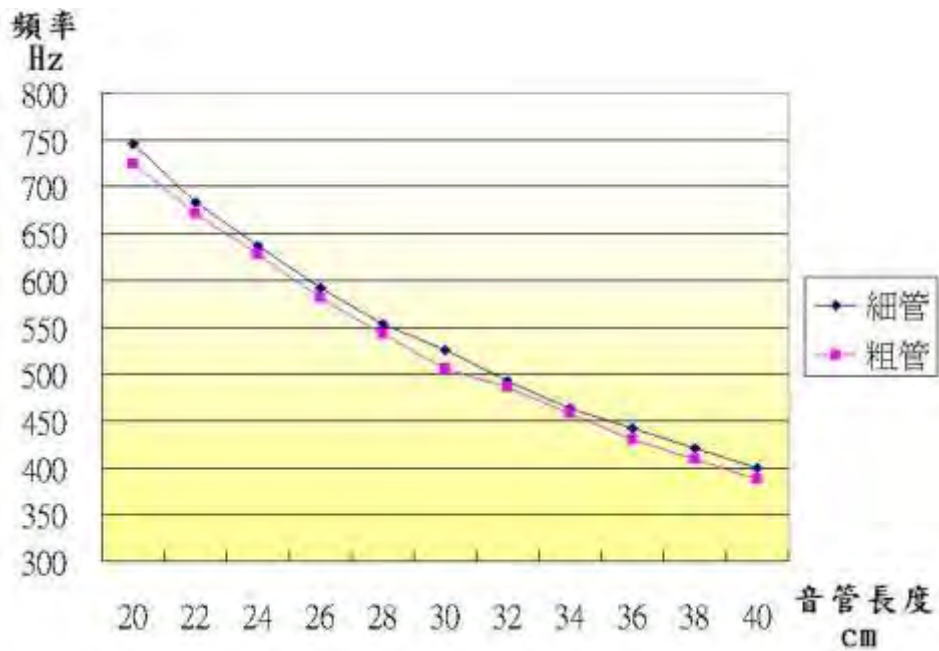


圖 24 音管長短、粗細與音高的關係

結論一：由圖 24 得知，不論音管粗細都具有管長愈長則頻率愈低，管長與頻率成反比的關係。而在音管長度相同時，管徑愈大則頻率也愈低，音管粗細與頻率亦成反比的關係。

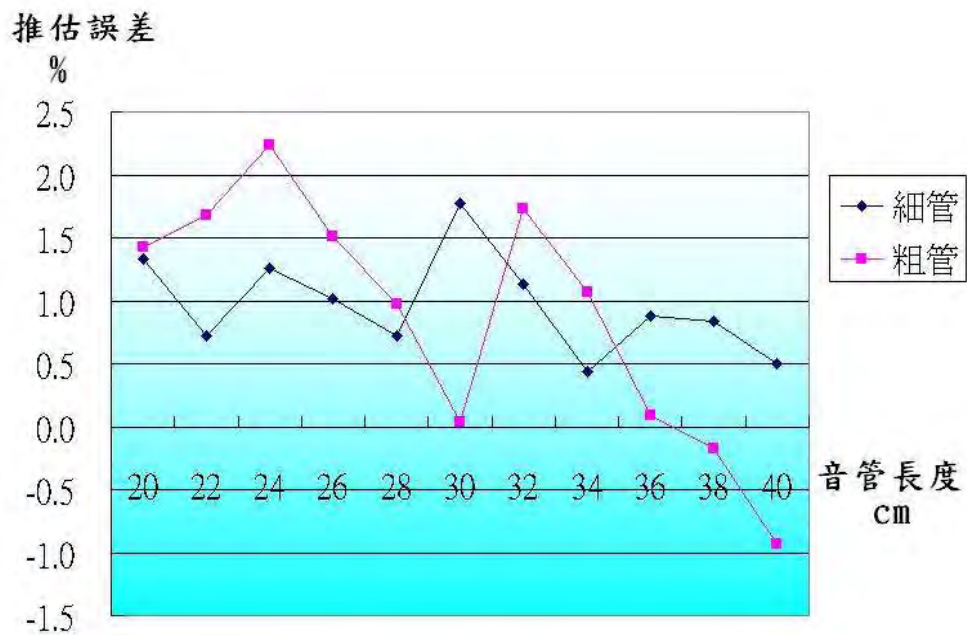


圖 25 音管長短、粗細與推估頻率的誤差分析

結論二：由圖 25 得知，粗音管與細音管在不同長度時，其推估頻率的

誤差都在 3% 以內。

二、探討以孔位長度比來製笛的適用性

已知條件為音管前後內徑(R_1 、 R_2) 與氣窗大小，依公式 4 計算出高 C、高 F 與超高 C 的音管所需長度，得到結果如表 4 所示：

表 4 不同調性笛的管長推估計算結果

管別	管徑	氣窗	C5		F5		C6	
			頻率	l	頻率	l	頻率	l
細_13mm 電線導管	14.4	3.5×8	523.3	296.8	698.5	213.8	1046.5	131.5
粗_16mm 自來水管	17.6	4×10	523.3	288.4	698.5	205.5	1046.5	123.1

單位：mm

結果：依調查各音調直笛的音孔與管長比做為開挖音孔的依據，以電腦校音軟體 Syaku 8 由孔 7 起依序檢測，調整孔徑大小直至音準。各音調笛調整孔徑後的檢驗結果，如表 5~7 所示：

表 5 高音 C 笛調整孔徑後的檢驗結果

音調 管別	C5	D5	E5	F5	G5	A5	B5	C6
粗	○	○	○	○	○	○	○	○
細	○	○	○	○	○	○	○	○

表 6 高音 F 笛調整孔徑後的檢驗結果

音調 管別	F5	G5	A5	b B5	C6	D6	E6	F6
粗	○	○	○	○	○	○	○	○
細	○	○	○	○	○	○	○	○

表 7 超高音 C 笛調整孔徑後的檢驗結果

音調 管別	C6	D6	E6	F6	G6	A6	B6	C7
粗	○	○	○	○	○	○	○	○
細	○	○	○	○	○	○	○	○

結論：由表 5~7 得知，不同調性笛以孔位長度比來開挖音孔，各音孔在調音後，均能達到所需的音準，故我們可以孔位長度比來製笛，

是無庸置疑的。

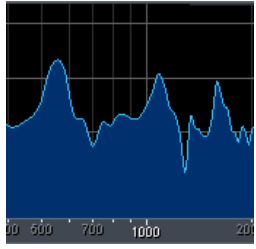
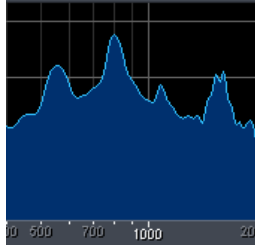
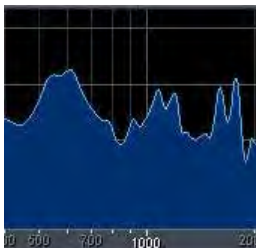
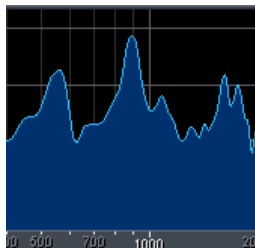
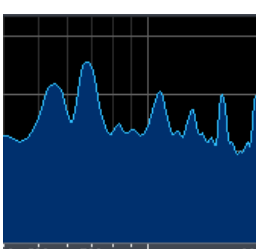
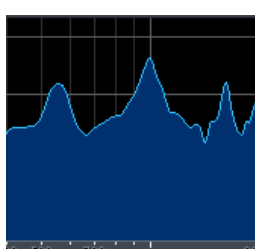
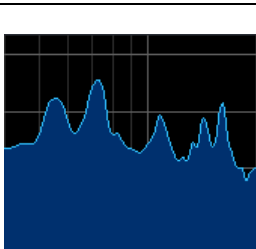
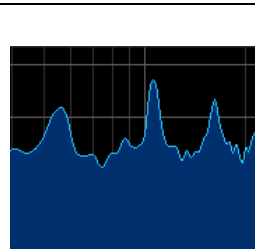
三、探討主管與副管(和音管)在各音階上的和音音色

(一) 以現有直笛改裝進行實驗

1. 主管(C5)與副管(C5)的頻譜分析

以 Cool Edit Pro 2 測得音管組合 C5-C5 各音階的基音與泛音頻譜分析如表 8 所示：

表 8 音管組合 C5-C5 各音階的基音與泛音頻譜分析(Cool Edit Pro 2)

音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析	主要 音頻	音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析	主要 音頻
1-1		516 (1076)	5-1		516 775 (1076) (1550)
2-1		516 559 (1076) (1162)	6-1		516 861 (1076) [1593]
3-1		516 645 (1076) (1335)	7-1		516 990 [1593] (1937)
4-1		516 689 (1076) (1421)	̇1-1		516 1033 [1593] (2069)

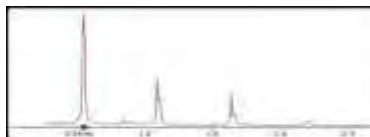

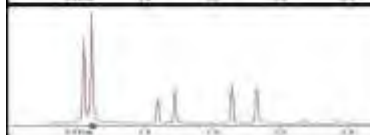

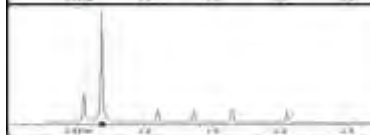
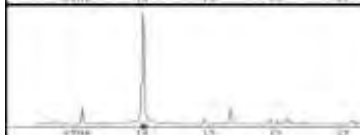
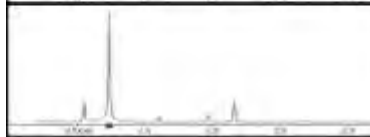
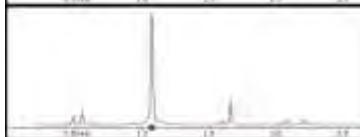
註：()表泛音一、[] 表泛音二

結果一：由表 8 頻譜分析得知，主管的各音階基音響度均大於副管與泛音，而在主管發出 La、Si 與高音 Do 時，則副管的泛

音二明顯出現。

結果二：音管組合 C5-C5 各音階的基音與泛音頻譜分析，另以 Syaku 8 測得結果如表 9 所示：

表 9 音管組合 C5-C5 各音階的基音與泛音頻譜分析(Syaku 8)

音管組合 C5-C5		音管組合 C5-C5	
音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析	音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析
1-1		5-1	
2-1		6-1	
3-1		7-1	
4-1		i-1	

◦：主音管的頻率

以 Cool Edit Pro 2 進行頻譜分析，可以得到較精準的各音管的基音與泛音頻率，然在頻譜分析的橫軸(頻率)卻非以等距的線性呈現，無法一眼就看出基音與泛音的倍頻相關性。而利用 Syaku 8 來分析各音管的基音與泛音強度與倍頻關係則顯而易見，礙於篇幅，接下來的實驗均以 Syaku 8 軟體來進行頻譜分析。頻譜分析的說明如圖 26 所示：

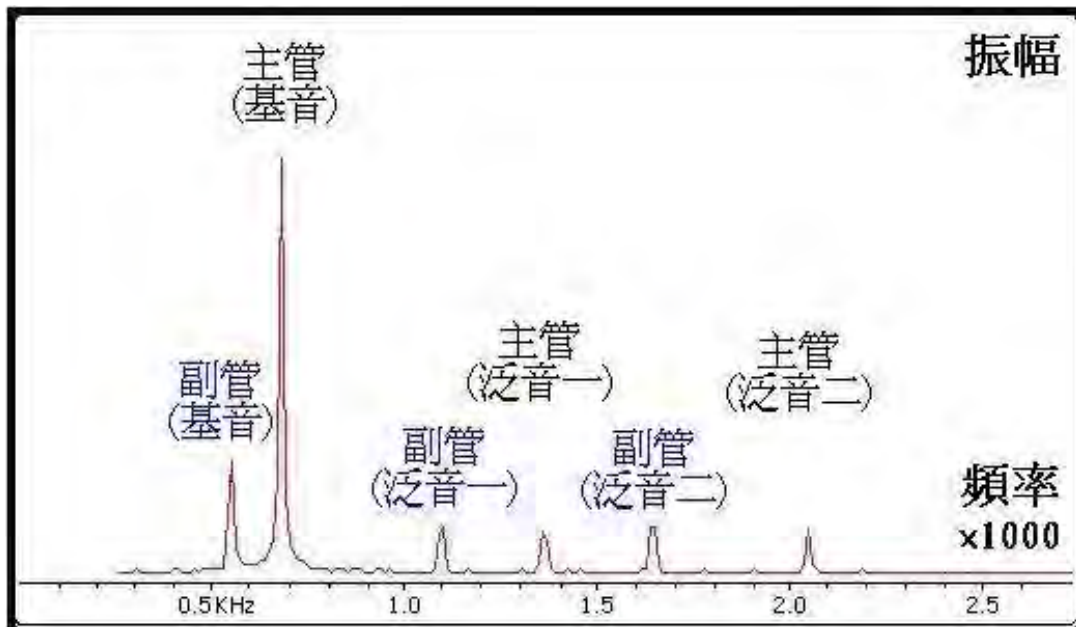


圖 26 以表 9 的音管組合 3-1 做範例的示意圖

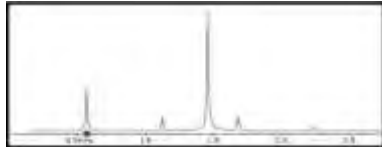



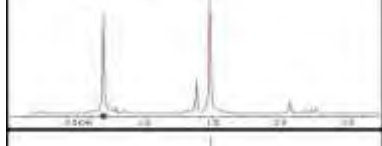


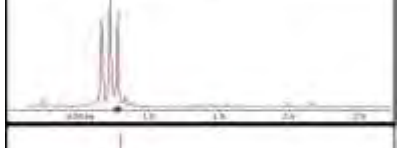
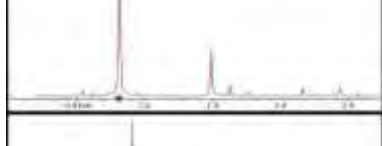

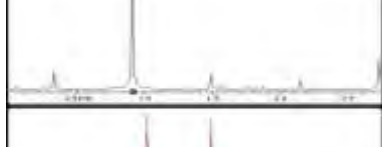
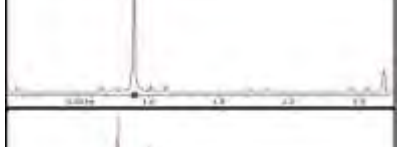


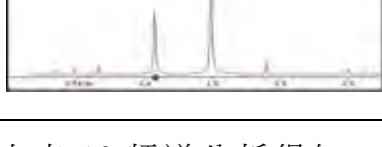
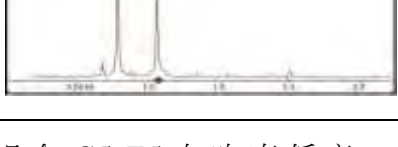
結果三：由圖 26 的音管組合示意圖可以看出，主管的基音強度最強，伴隨著主管的泛音一、泛音二與副管的基音、泛音一、泛音二……等，組成了完美的音色組合。

結果四：由表 9 各音階的基音與泛音頻譜分析，得到主管的各音階基音強度均大於副管與泛音，與我們的期待相同。

唯一美中不足的是在主管發出 Re 時，因 Re 與 Do 之間的音程為 2 度音(不和諧音程)，使其和音之間和諧度有些影響。

2. 主管(C5)與副管(F5)、主管(C5)與副管(E5、G5) 的頻譜分析

表 10 音管組合 C5-C5 各音階的基音與泛音頻譜分析

音管組合 C5-F5		音管組合 C5-E5-G5	
音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析	音管組合 (主-副-副)	頻 譜 分 析
1-4		1-3-5	
2-4		2-3-5	
3-4		3-3-5	
4-4		4-3-5	
5-4		5-3-5	
6-4		6-3-5	
7-4		7-3-5	
i-4		i-3-5	

結果一：由表 10 頻譜分析得知，長短笛音管組合 C5-F5 在吹奏低音時，副管 F5 的基音 F5 並不明顯，而是以 F6(泛音一)呈現，使得聲音變得較高亢。而吹奏 Re 時，其音程超過 3 度音，其和音效果佳，在吹奏 Mi 與 Sol 時，其音程雖小於 3 度音，但副管的基音 F5 不明顯，使得和音效果亦顯得合諧。

結果二：在音管組合 C5-E5-G5 三管情形下，主管吹奏 Re 與 Fa 時，其音程組合皆小於 3 度音，顯得音色複雜且和音強過主音。

(二) 以膠管笛進行實驗

以膠管笛 C5-C5、F5-F5 與 C6-C6 三種組合進行實驗，其結果如表 11 所示：

表 11 不同音調膠管笛組合下的基音與泛音頻譜分析

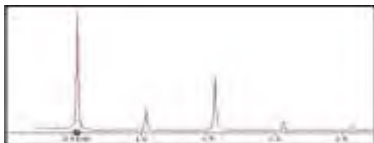
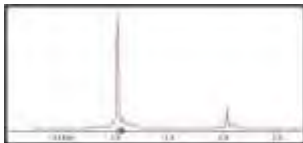
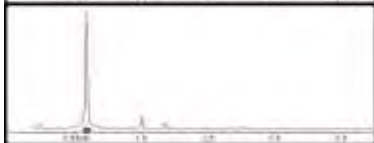
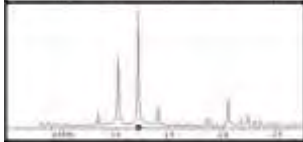
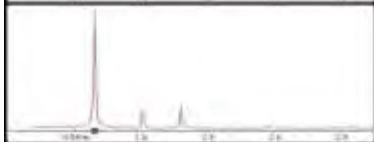
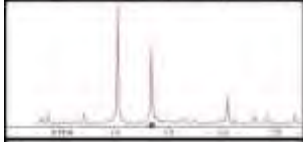
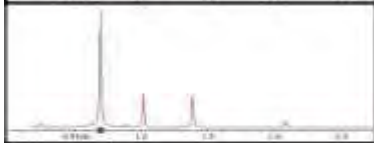
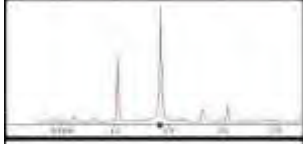
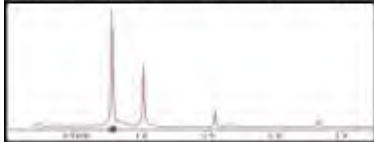

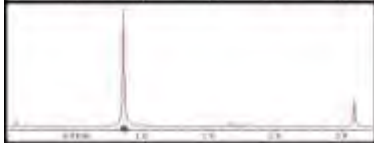

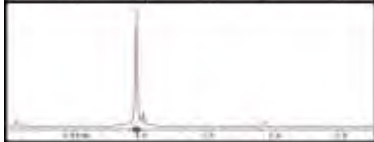



膠管笛 C5-C5		膠管笛 F5-F5		膠管笛 C6-C6	
1 + 1		4 + 4		$\dot{1}$ + $\dot{1}$	
2 + 1		5 + 4		$\dot{2}$ + $\dot{1}$	
3 + 1		6 + 4		$\dot{3}$ + $\dot{1}$	
4 + 1		7 + 4		$\dot{4}$ + $\dot{1}$	
5 + 1		$\dot{1}$ + 4		$\dot{5}$ + $\dot{1}$	
6 + 1		$\dot{2}$ + 4		$\dot{6}$ + $\dot{1}$	
7 + 1		$\dot{3}$ + 4		$\dot{7}$ + $\dot{1}$	
$\dot{1}$ + 1		$\dot{4}$ + 4		$\dot{1}$ + $\dot{1}$	

結論：由表 11 得知，膠管笛 C5-C5 在吹奏低音時產生倍頻現象，研判應是吹奏時用力過大所致。而膠管笛 F5-F5 在吹奏第 2 主音時，因主管與複管的音程差異小於 3 度音，亦有點不和諧。在吹奏高音膠管笛 C6-C6 時，和音管 F6 的音量過大，使主旋律較不明顯。

四、以自製複管竹笛進行實驗，製作和諧程度最佳的「複管樂器」

以自製複管竹笛 C5-C5 與 C6-C6 進行實驗，其結果如表 12 所示：

表 12 自製複管竹笛的基音與泛音頻譜分析

自製 C5-C5 複管笛		自製 C6-C6 複管笛	
音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析	音管組合 (主-副)	頻 譜 分 析
1-1		$\dot{1}-\dot{1}$	
2-1		$\dot{2}-\dot{1}$	
3-1		$\dot{3}-\dot{1}$	
4-1		$\dot{4}-\dot{1}$	
5-1		$\dot{5}-\dot{1}$	
6-1		$\dot{6}-\dot{1}$	
7-1		$\dot{7}-\dot{1}$	
$\dot{1}-1$		$\dot{\dot{1}}-\dot{1}$	

再次以自製複管竹笛 C5-C5 與 C6-C6 進行實驗，由表 12 頻譜分析得到結果與膠管笛雷同，複管竹笛 C5-C5 的主管所發出的旋律明顯且音色較為柔和優美，而複管竹笛 C6-C6 的副管和音強烈，整體的音色則顯得較高亢響亮。

陸、結論與建議

一、結論

本研究嘗試利用生活中隨手可得的廢棄椰子殼與竹子(掃把柄)，研發製作出融合「複管鼻笛」與「葫蘆絲」優點的一種深具獨特性「複管樂器」。經由要因分析與實驗設計來進行實驗，綜合研究結果分析與討論，得到下列結果：

1. 不論音管長短、粗細，其筒音頻率實測和理論值的誤差均小於 2%，故可由公式 4 求得各音調的實際管長。
2. 音管粗細不同都具有管長愈長則頻率愈低，管長與頻率成反比的關係。而在音管長度相同時，管徑愈大則頻率也愈低，音管粗細與頻率亦成反比關係。
3. 不同調性笛以孔位長度比來開挖音孔，各音孔在調音後，以電腦校音軟體 Syaku 8 檢測均能達到所需的音準，故我們可依孔位長度比來製笛，以便吹奏不同的音階。
4. 以複管 C5-C5 的組合較佳，其主管的各音階基音響度均大於副管與泛音，呈現良好的和諧關係。吹奏高音時隨著吹奏力道的增加，副管的基音會減弱，而改由泛音一與泛音二逐漸取代之，亦不失為完美的組合。

二、建議

(一) 製作出類似複管鼻笛的音色，以較長的等長音管來設計自製複管笛

由實驗結果得知，自製的雙管複管笛較三管笛的和音音色佳，而雙管笛中又以管長較長的音管組合，其主旋律強度會較為明顯。採用類似複管鼻笛的等長音管，來設計自製複管笛，所吹出的音色較為柔和優美。為了演奏類似鼻笛具有音色柔合纖細、清雅傳情的原音，經由史料得知其尺寸長約為一尺 3 寸到二尺(38~61cm)之間。今製作中音 G 笛(音管長約 40cm)，因笛體

本身過長，為了方便吹奏與按壓音孔可將吹嘴改向，且因應清潔之需並加裝排水栓，其構造如圖 27 所示。



圖 27 吹嘴改開在後方的中音 G 笛

(二) 以閉管方式製作出類似葫蘆絲較短的副管來設計自製三管笛

使用不同長短的主、副管來設計自製複管笛，其副管會以倍頻的泛音一來呈現，使得聲音變得較高亢響亮，為解決此問題，可將副管改為閉管笛。

選用閉管笛當副管，其優點有：

1. 吹出與主管相同的筒音，所需管長只需約一半的管長即可。
2. 閉管笛所吹出的響度較小，不會凌駕於主管的旋律音。
3. 閉管笛所吹出的筒音，與陶笛類似，不易產生泛音。
4. 閉管笛可依需求，自由的調整筒音頻率。

閉管笛雖有以上的優點，然它也有長徑比不得大於 8 的限制，否則會產生氣音。副管採用閉管方式來設計的自製雙管笛，其構造如圖 28 所示。



圖 28 採用可調式閉管笛當副管的自製雙管笛

在研究探討中提到，音管組合 C5-E5-G5 三管情形下，部分音程組合小於 3 度音，顯得音色複雜且和音強過主音。為能製作出類似葫蘆絲較短的副管來設計自製三管笛，首要之務乃使主旋律強度能較明顯些，為達此目的，除將副管改為閉管外，改變副管的粗細或氣窗的大小，似乎亦是可行之道。自製三管笛，其構造如圖 29 所示。



圖 29 製作類似葫蘆絲的三管笛構造

為了解相同長度的中音 G4 雙管笛 (圖 27)與不同長度、管徑且具雙副管閉管 G5 笛的高音 C 三管笛 (圖 29 上)，在吹奏吹奏主音 C5 時，能否達到主旋律強度能比和聲管明顯些？特以校音軟體--Syaku 8 進行頻譜分析來驗證，得到結果如圖 30~31 所示。

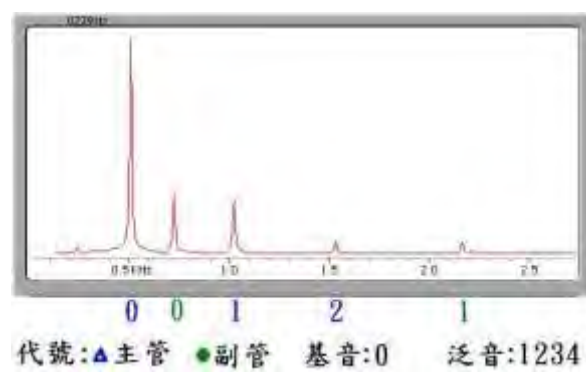
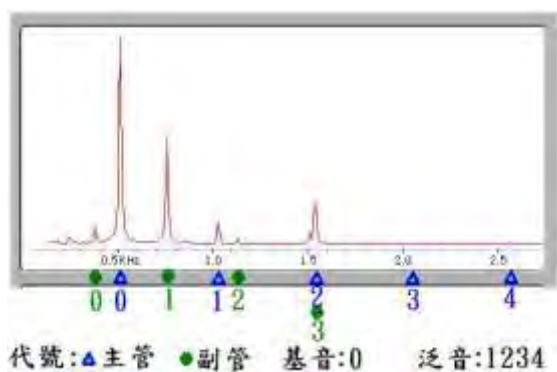


圖 30 中音 G 雙管笛(副管開管笛 G4)吹奏主音 C5 所發出的頻譜分析

圖 31 高音 C 三管笛(雙副管閉管笛 G5)吹奏主音 C5 的頻譜分析

由圖 30 可以看出主音管 C5 的基音明顯，同時也出現泛音 1 與泛音 2；而扮演和聲角色的副管 G4，其基音與泛音也都能完美的呈現，整體而言，其音色是非常完美無暇的。而圖 31 中亦可看出主音管 C5 的基音明顯，同時也出現泛音 1 與泛音 2；而扮演和聲角色的雙副管 G5 閉管笛，雖是雙管發聲，其基音強度比主音管來的小些，符合所要求的條件，而泛音 1 出現在高 12 度音處，與閉管公式吻合，整體而言，其音色是相當優美合諧的。

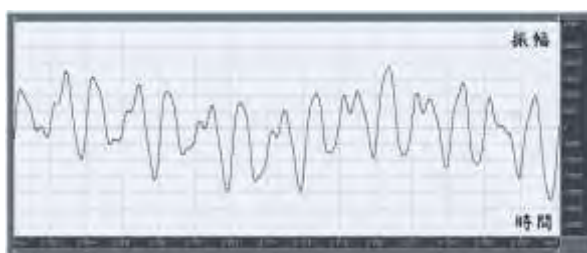


圖 32 中音 G 雙管笛(副管開管笛 G4)吹奏主音 C5 所發出的聲音波形

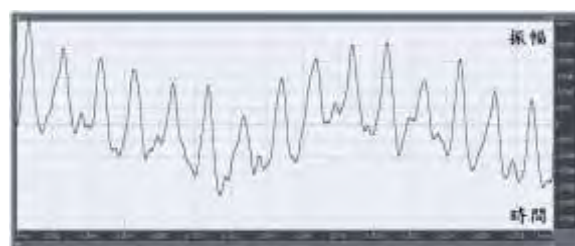


圖 33 高音 C 三管笛(雙副管閉管笛 G5)吹奏主音 C5 所發出的聲音波形

而聲音波形變化則以頻譜分析軟體--Cool Edit Pro 2 進行分析，得到結果如圖 32~33 所示。由圖 32、33 可以看出，中音 G 雙管笛所發出的聲音波形比高音 C 三管笛所發出的聲音波形來的複雜些，此結果亦可由圖 30、31 的頻譜分析看出端倪。

柒、參考資料

曾麗芬。重要傳統藝術「排灣族口笛、鼻笛」傳承現況－以傳習計畫（2012－2014）為例。

趙松庭（1973）。橫笛的頻率計算與應用。樂器科技簡訊 No. 2。

知「竹」嘗「樂」。高雄市第 57 屆中小學科學展覽會作品說明書，高中組物理科。

「笛」擋不住的魅力。高雄市第 56 屆中小學科學展覽會作品說明書，國小組物理科。

黃韻蓁（2011）。排灣族雙管鼻笛之樂器型制、演奏與應用。屏東縣政府文化局。

陳炳亨（2013）。國民中學自然與生活科技－第三冊。翰林出版事業股份有限公司。

原理分析。國立臺灣師範大學物理學系。取自

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=teacher/sound/sound5>

Benade, Arthur H.(1990)。Fundamentals of Musical Acoustics。Dover Pubns。

【評語】 080115

1. 研究利用生活中隨手可得的水管、研發出能同時發出旋律音與持續音的特殊樂器。研究產生的音色和諧度的變化。
2. 將日常生活中常見樂器，進一步的實驗設計和改進，能詳細探究其原因。
3. 能利用分析軟體探究發聲頻譜。作品具鄉土性及日常生活應用性。

摘要

本研究利用生活中隨手可得的水管、廢棄椰子殼與竹子(掃把柄)，嘗試研發製作能同時發出旋律音與持續音的特殊樂器，並探討其旋律音與持續音之間所產生的音色和諧度的變化。

由於「雙管鼻笛」與「葫蘆絲」的構造比較特殊，我們除了探討相關文獻，了解笛類樂器的發聲頻率公式外，還實際操作器械，藉由自製的水管笛驗證管長、管徑與吹嘴對基音頻率理論的可行性。電腦頻譜軟體，除了可以分析主管與副管(和音管)在各音階的的和諧程度外，更可以作為我們自製樂器微調管長或音孔大小的依據。

研究動機

在課堂中，我們從影片中看見了原住民鼻笛的演奏與介紹，並對其特殊的音響效果感到好奇。在請教老師的過程中我們發現，笛類樂器通常都是單管演奏的，而能夠同時發出兩個音或兩個音以上的樂器很少，除了雙管鼻笛外，還有中國的葫蘆絲，這兩個樂器在演奏的樂曲大多緩慢悠揚，具有獨特的韻味。這對平時只接觸西洋直笛的我們來說，真是大開眼界。在這次的研究中，我們除了要了解這一類樂器的構造外，還想探討不同的開管笛和閉管笛組合音響效果到底有甚麼不同。

研究目的

1. 探討管長、管徑與吹口氣窗對基音頻率理論和實測的相關性。
2. 探討以直笛孔位長度比來製笛的適用性。
3. 探討主管與副管(和音管)在各音階上的和音效果。
4. 自製和諧程度最佳的「複管樂器」。

研究設備與器材

- (一)設備：電腦、麥克風。
- (二)軟體：錄音與頻譜分析軟體--Cool Edit Pro 2(圖1)、校音軟體--Syaku 8(圖2)
- (三)器材：廢棄椰子殼、竹子(掃把柄)、塑膠瓶、塑膠軟墊、塑膠管。
- (四)工具：60cm長尺、游標尺、圓管切割器、圓口刀、圓形切割器、美工刀、鑽孔刀、銼刀、砂輪機、鋸子和剪刀。



圖1 頻譜分析軟體--Cool Edit Pro 2

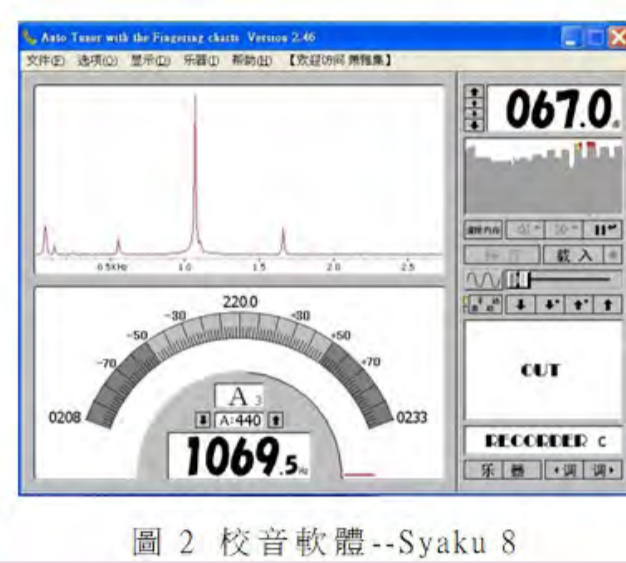
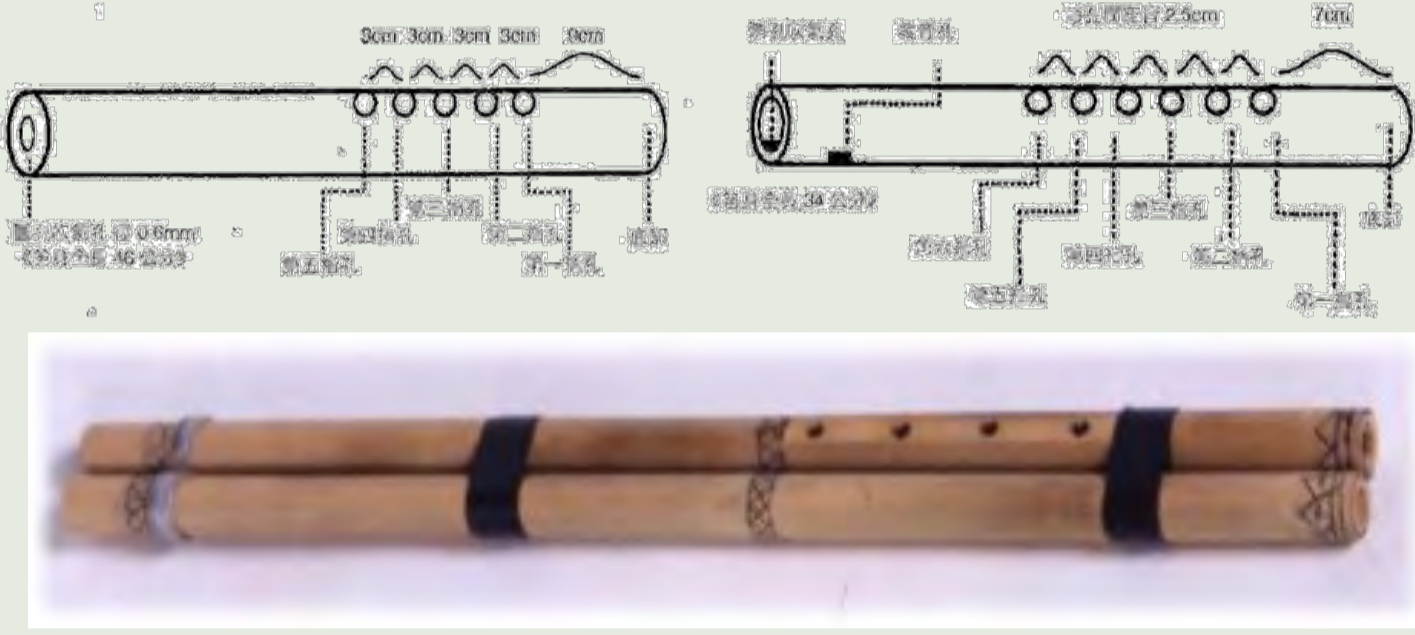


圖2 校音軟體--Syaku 8

文獻探討與調查

(一)雙管鼻笛與葫蘆絲的探討



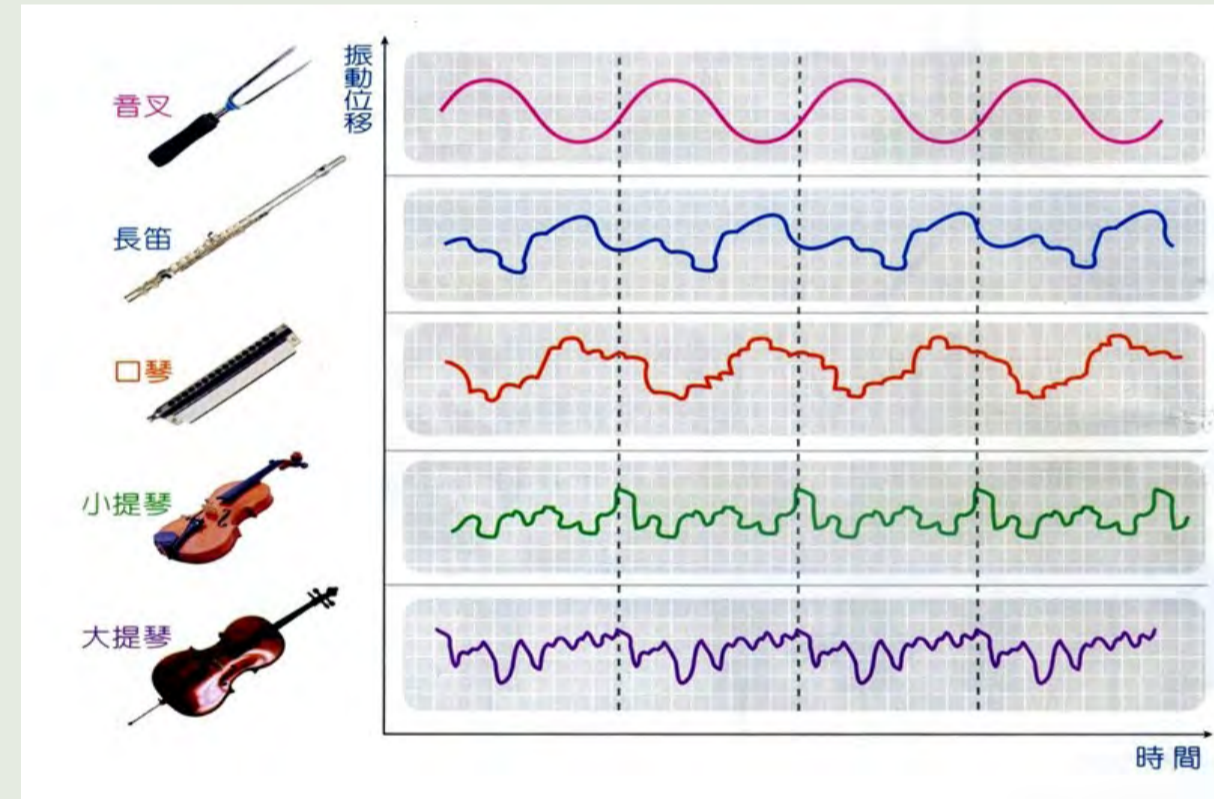
排灣族的雙管鼻笛(左圖)，兩管等長，其中一管無按孔，另外一管多為3~4個按孔，有指孔一管可吹奏旋律，另一管則為持續低音。由於製作材料的關係，較難有統一的規格尺寸，由史料得知其尺寸長約為一尺3寸到二尺之間。

吹奏者表示「有孔一管有如『在說話』，無孔一管則為在旁『配音』」，此不但與排灣族歌謠「一人領唱，其他人配唱」複音唱法相互輝映，亦體現排灣族階層文化的特殊關連。

葫蘆絲(右圖)是雲南少數民族特有的樂器之一。這種樂器用小葫蘆作為音箱，以三根長短不一的竹管並排插在葫蘆下端，竹管嵌有銅質簧片，中間較長的一根竹管開七孔。吹奏時口吹葫蘆細端，指按中間竹管的音孔，在奏出旋律的同時，左右兩根竹管同時發出固定的單音，與旋律構成和音。其音樂輕柔細膩，圓潤質樸，極富表現力，深受大家的喜愛。



(二)聲音的探討



樂音有三大要素，即響度、音調和音色。聲音的強弱程度稱為響度，響度和聲波的振幅大小有關，聲波的振幅愈大，所聽到的聲音也就愈大。而聲音的高低稱為音調，聲音的頻率愈大，則聽到的聲音也就愈高昂；頻率愈小，聽到的聲音也就愈低沉。發聲體的發音特性稱為音色，其決定因素為發聲體所發出聲波的波形，若波形不同，則音色也不一樣。對於不同的樂器所發出的聲音，即使頻率都一樣，但波形不同則音色亦不相同。圖左為五種不同的樂器，以相同頻率所發出的聲音波形。

閉管笛的波形單純穩定與陶笛類似(圖7)，而直笛會因壓力而產生變化波形(圖8)，所發出的聲音乃是由基音和多組不同頻率的泛音複合而成的複合波，其中泛音的頻率必為基音頻率的整數倍。基音與泛音所組成的複合波形如下圖所示：

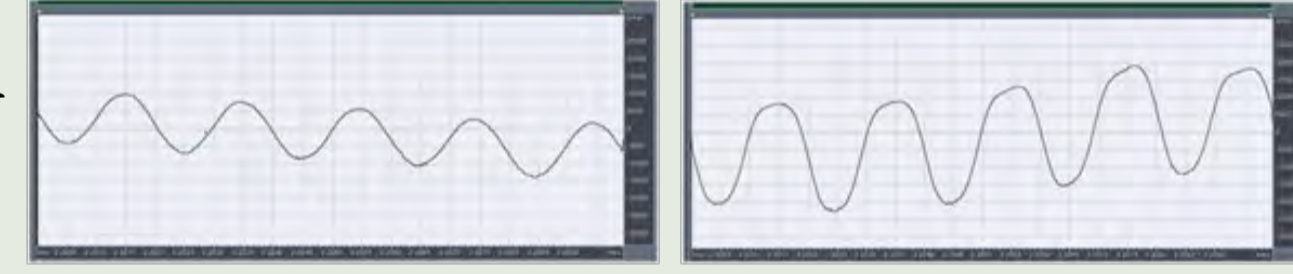
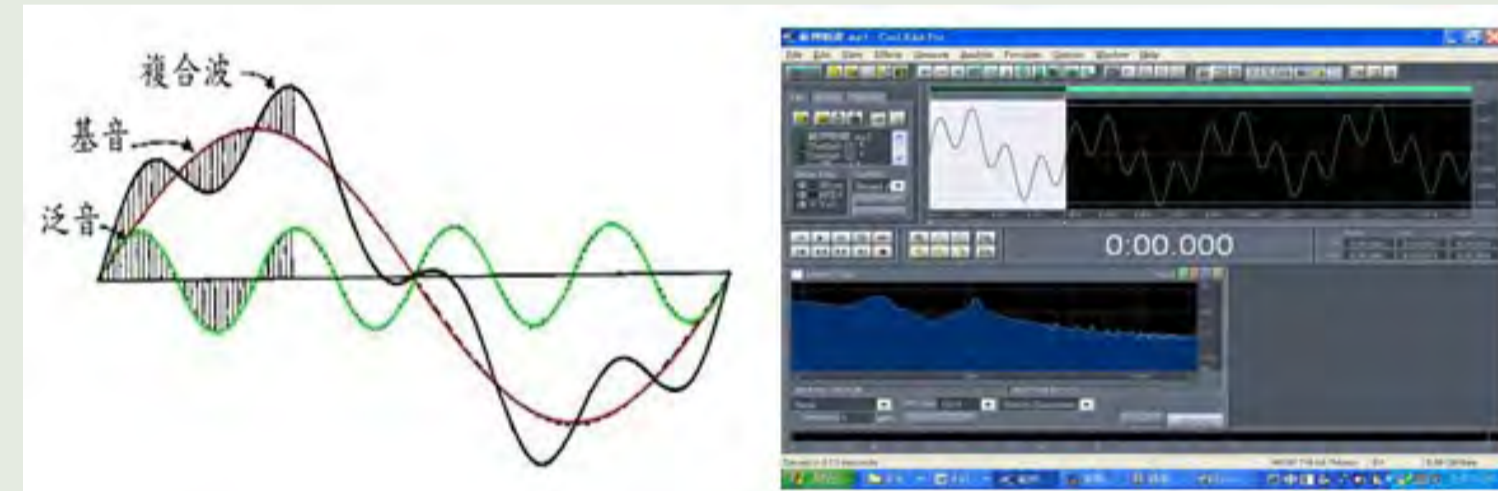


圖7 閉管笛的波形單純穩定

圖8 直笛因壓力而產生變化波形

左圖所述基音與泛音所組成的複合波形，是由C4(261.3Hz)和C6(1046.5Hz)所合成，利用



音樂半日通軟體發出C4和C6和音，得到結果如圖10所示，理論與實測符合。

本研究所採用的音高值，是以國際標準音的頻率(單位：赫茲Hz)來表示各音階相對的頻率。

(三)製笛理論公式的探討

(1) 閉管空氣柱形成駐波：

外來的干擾(如吹氣)經由此開口端使管內的空氣柱發生振動形成駐波(圖11)，以管內介質(即空氣分子質點)的振動位移而言，開口端為波腹，閉口端則為波節，其間可以另有波節，也可以沒有波節，故當空氣柱形成駐波時，管長為四分之一個波長的奇數倍，見右圖。設管長為 l ，波長為 λ ，則

$$l = n \left(\frac{\lambda}{4} \right) \quad n=1, 3, 5, 7, \dots$$

當 $n=1$ 時的聲音稱為基音，其頻率稱為基頻，

當 $n=3, 5, 7, \dots$ 時的聲音稱為泛音，其頻率稱為泛頻。

(2) 開管空氣柱形成駐波：

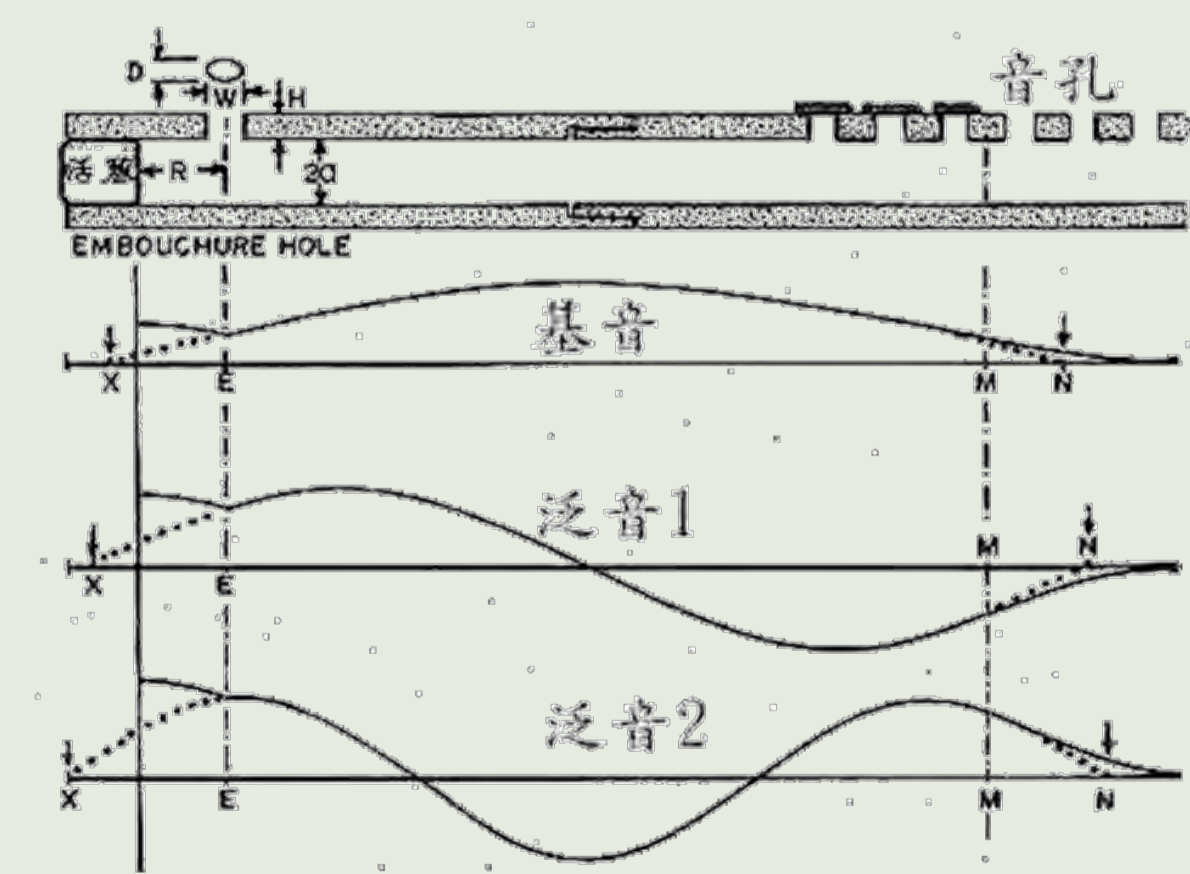
若為開管(兩端皆須打開)，以管內介質(即空氣分子質點)的位移而言，兩端均為波腹，其間可以另有波節，也可以沒有波節，故當空氣柱形成駐波時，管長為二分之一個波長的整數倍，如圖12所示。設管長為 l ，波長為 λ ，則

$$l = n \left(\frac{\lambda}{2} \right) \quad n=1, 2, 3, 4, \dots$$

當 $n=1$ 時的聲音稱為基音，其頻率稱為基頻，

當 $n=2, 3, 4, \dots$ 時的聲音稱為泛音，其頻率稱為泛頻。

(3) 有效管長的修正

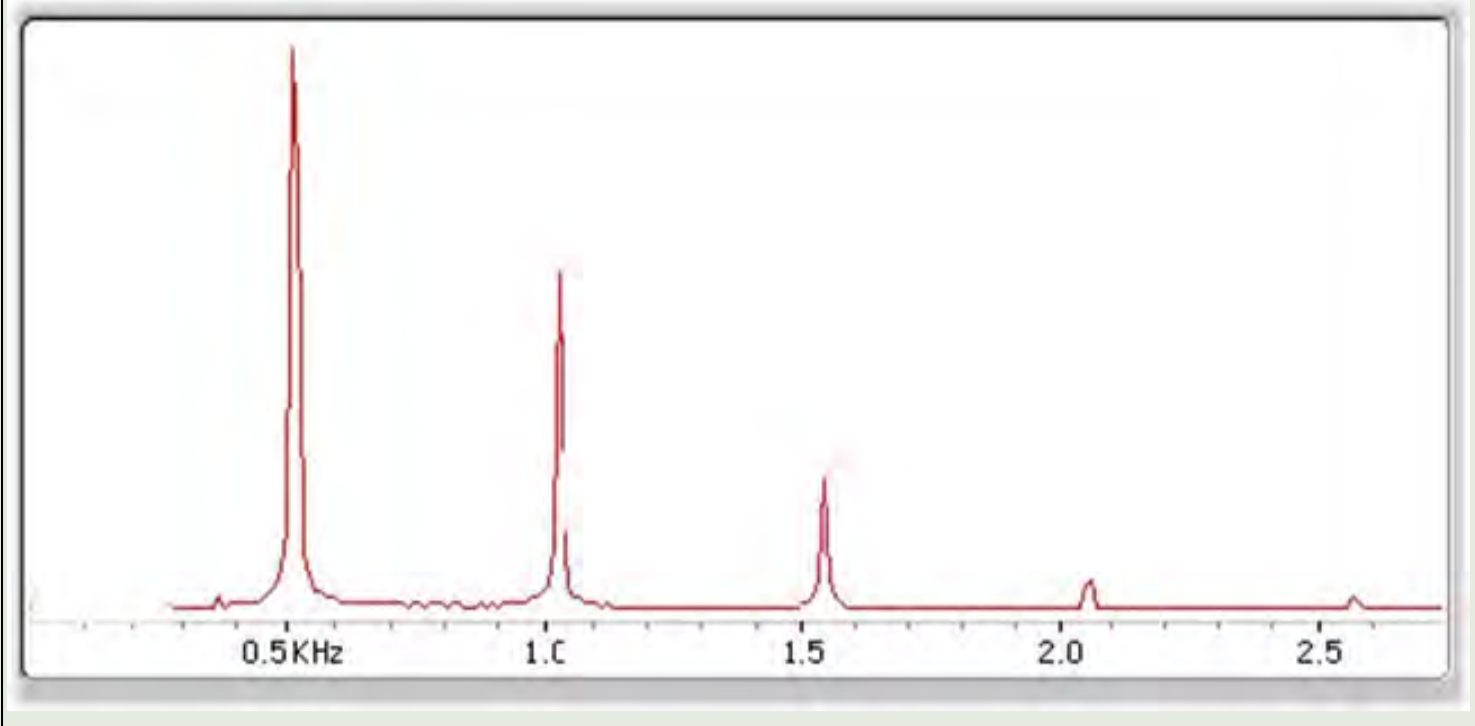


吹奏長笛時，內部空氣會產生疏密波，在E、M兩孔位置上，因空氣可以流通，故壓力會較接近外界的壓力。

理論上來講此疏密波的波長應是E、M兩孔距離的兩倍，因E、M兩孔在平衡位置上，中間剛好有一個波峰，形成半個波長，不過從上圖可看出，在實際狀況下E、M兩孔不會在平衡位置上，而是向兩側延伸至平衡位置X、N的虛線才是真正的半個波長，由此可知，長笛實際吹奏時波長會有一定的誤差。而上圖的泛音1，其向兩側延伸的平衡位置X、N，略大於基音。

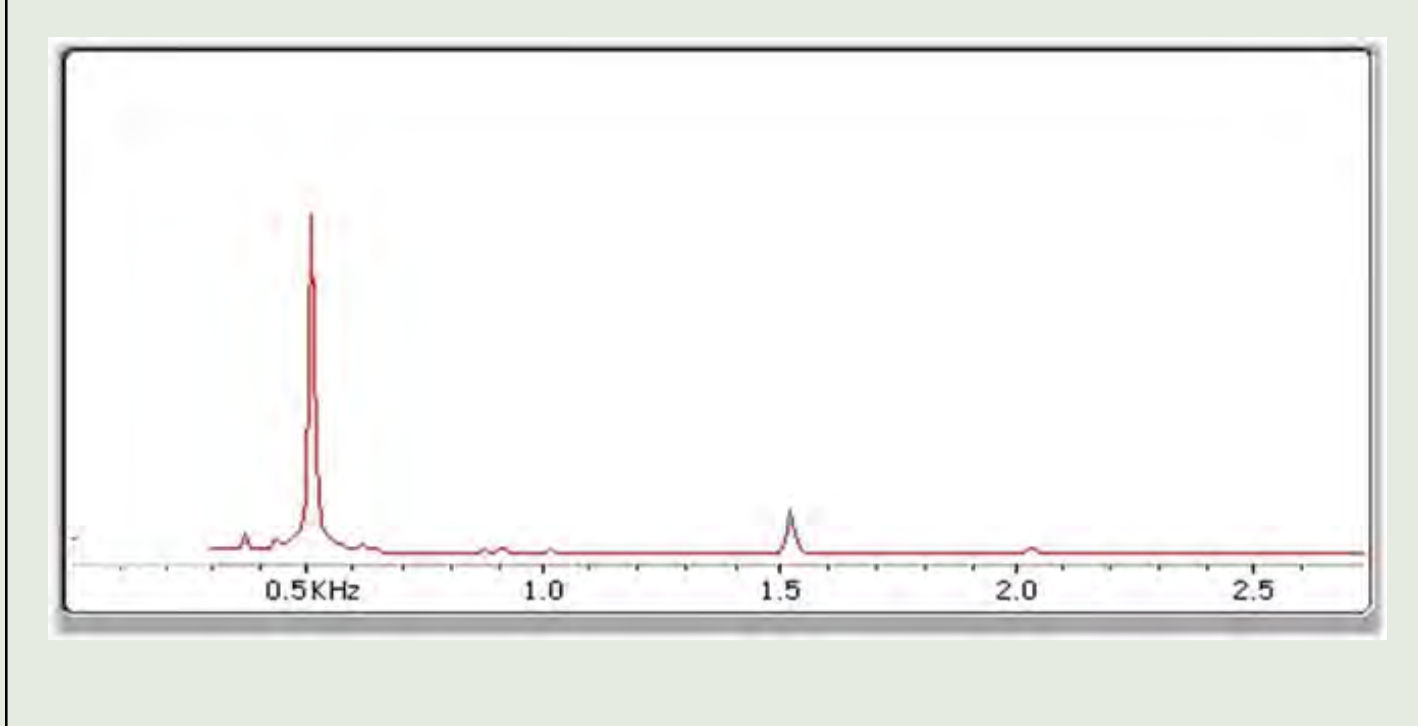


為了證明直笛是"開管"而不是"閉管"，取一支管徑15mm的竹子，製成管長30cm的直笛，吹奏測其頻譜分析，得到結果如下圖所示：



上圖顯示泛音為基音的整數倍與理論相符。

將音管末端以軟墊塞住使其成為管長為13cm的閉管笛，吹奏測其頻譜分析，得到結果如下圖所示：



上圖顯示泛音為基音的奇數倍與理論相符

(4) 製笛理論公式：

音符	頻率	音符	頻率	音符	頻率	音符	頻率
C4	261.63	C5	523.25	C6	1046.50	C7	2093.00
D4	293.66	D5	587.33	D6	1174.66	D7	2349.32
E4	329.63	E5	659.26	E6	1328.51	E7	2637.02
F4	349.23	F5	698.46	F6	1396.91	F7	2793.83
G4	392.00	G5	783.99	G6	1567.98	G7	3135.96
A4	440.00	A5	880.00	A6	1760.00	A7	3520.00
B4	493.88	B5	987.77	B6	1975.53	B7	3951.07

F=國際標準音的頻率(單位:赫茲 Hz)

趙松庭在《橫笛頻率計算與應用》中提到，其管長修正數的計算公式與方法如下：

開管頻率公式 $F = N \frac{V}{2L}$ 公式 1

L為有效管長，而N=1(基音), 2(泛音一), 3(泛音二)...

聲速公式: $V = 331 + 0.6T$ (T:°C) 公式 2

身在台灣溫度的標準取 25°C。即聲速 $V = 331 + 0.6 \times 25 = 346$ 米/秒。

設實際管長為"l"，R₁為吹氣端管半徑，R₂為末端管口半徑，則

$L = \text{實際管長} l + \text{吹氣端修正} \delta_1 + \text{管口修正} \delta_2$ 公式 3

若笛唇邊緣為平面，則吹氣端修正可簡化為 $\delta_1 = 1.7r$ (r 為圓形吹孔的平均半徑)

"r"為圓形吹孔的平均半徑，而直笛與本實驗用笛的氣窗均為方形，則

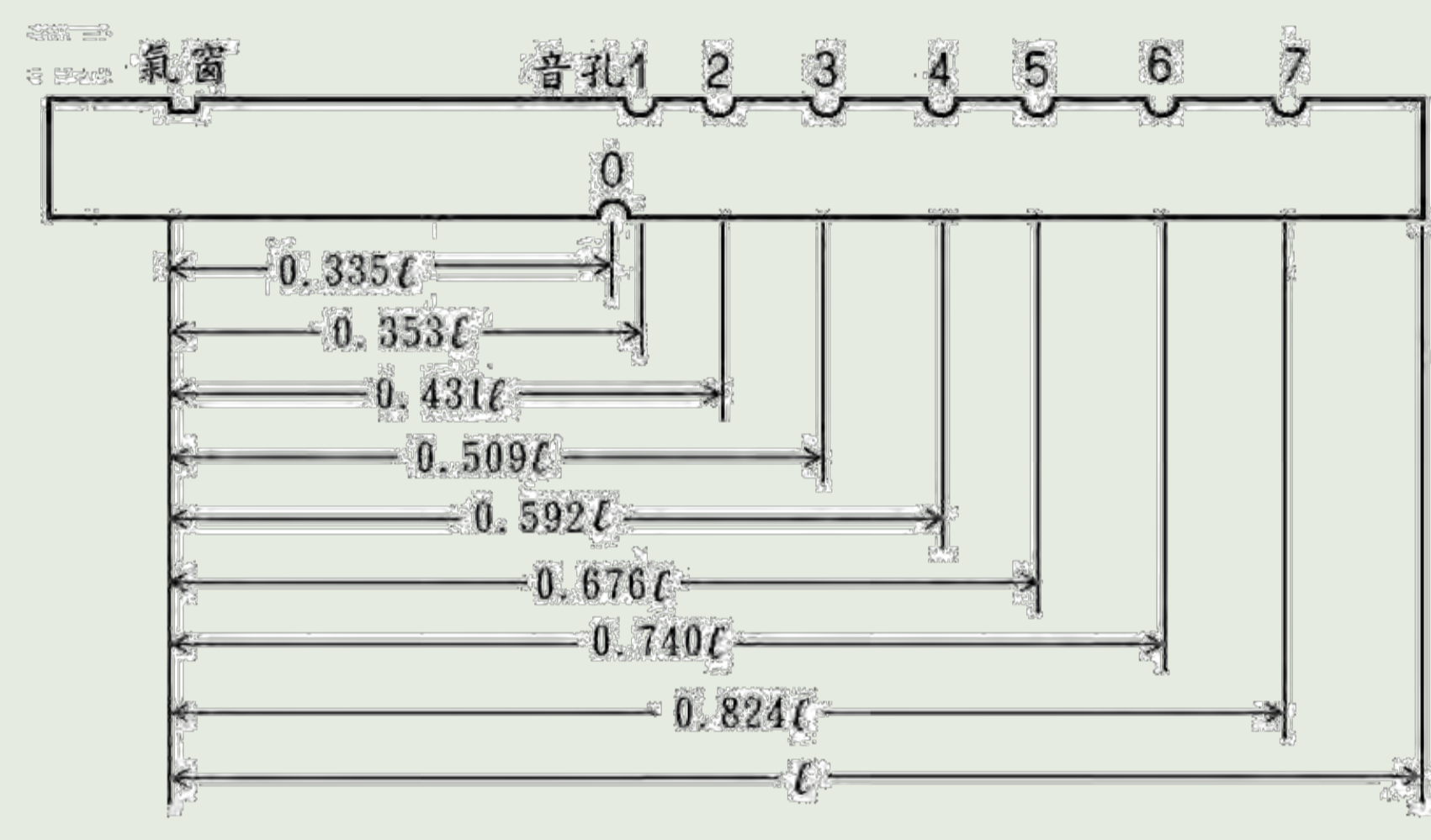
採其 $r = \sqrt{\frac{\text{長} \times \text{寬}}{\pi}}$ 計算之。管口修正 $\delta_2 = 0.6R_2$

實際管長 $l = (346000/2F) - 1.7rx(R_1/r)^2 - 0.6R_2$ 公式 4

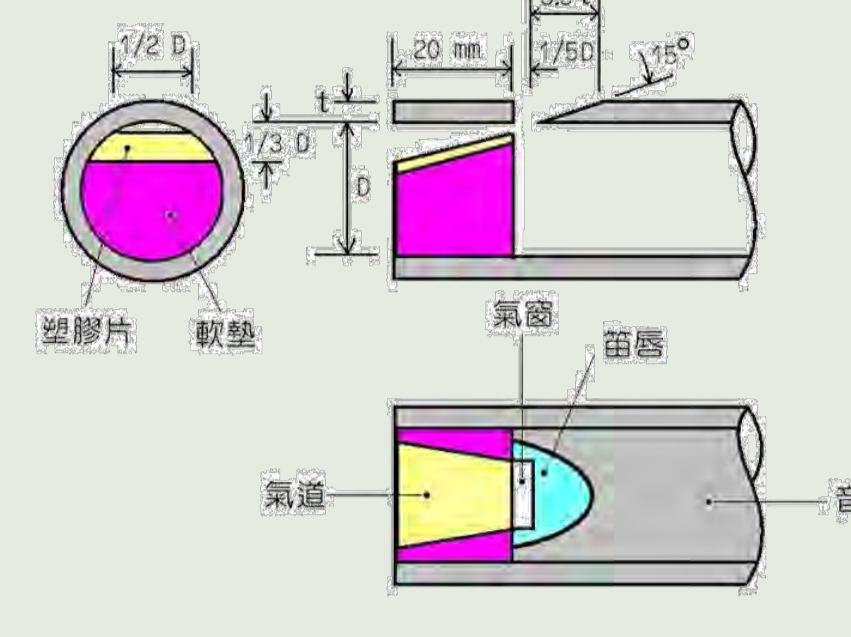
在公式中 r：氣窗的折合半徑，R₁：吹口處音管半徑，R₂：末端管口處音管半徑，以上均可測量得知，而 F(筒音頻率)可由查表得知，因此可經由計算求得各調值的實際管長 l (單位 mm)。

(7) 音管的孔位設計

依各種音調的直笛調查記錄，所設計音管的孔位比，來開挖音孔位置，並進行主題二實驗。其設計圖如右圖所示：



(5) 音管吹嘴的設計



參考各音調的直笛吹嘴尺寸，設計音管的吹嘴，其設計圖如左圖所示：

在直徑 1/3 處往上以 15 度的角度切割軟墊，並使軟墊不會堵住氣窗。

(參考資料:知「竹」嘗「樂」)

(6) 調查與記錄各種音調直笛的孔位

編號	孔位	0	1	2	3	4	5	6	7	氣窗	管長	管徑前/後	備註
		l/r	l/r	l/r	l/r	l/r	l/r	l/r	l/r				
1	中音 F	140	148	180	212	249	281	303	330	3.8x	407	18.2	COMTEX
		0.344	0.364	0.442	0.521	0.612	0.690	0.744	0.811	12.2		11	
2	高音 C	93	98	120	142	164	186	207	233	3.6x10	281	13.4	YAMAHA (B)
		0.331	0.349	0.427	0.505	0.584	0.662	0.737	0.829			8.8	
3	高音 C	94	99	120	142	165	190	208	233	3.6x10	281	13.6	YAMAHA (G)
		0.335	0.352	0.427	0.505	0.587	0.676	0.740	0.829			8.6	
4	高音 F	69	73	90	106	123	142	155	174	3x7.2	210	10.0	AULOS
		0.329	0.348	0.429	0.505	0.586	0.676	0.738	0.829			6.4	507B-E (B)
孔位長度比 r		0.33	0.35	0.43	0.50	0.59	0.67	0.74	0.82				

長度單位: mm



實驗過程與結果: 主題一

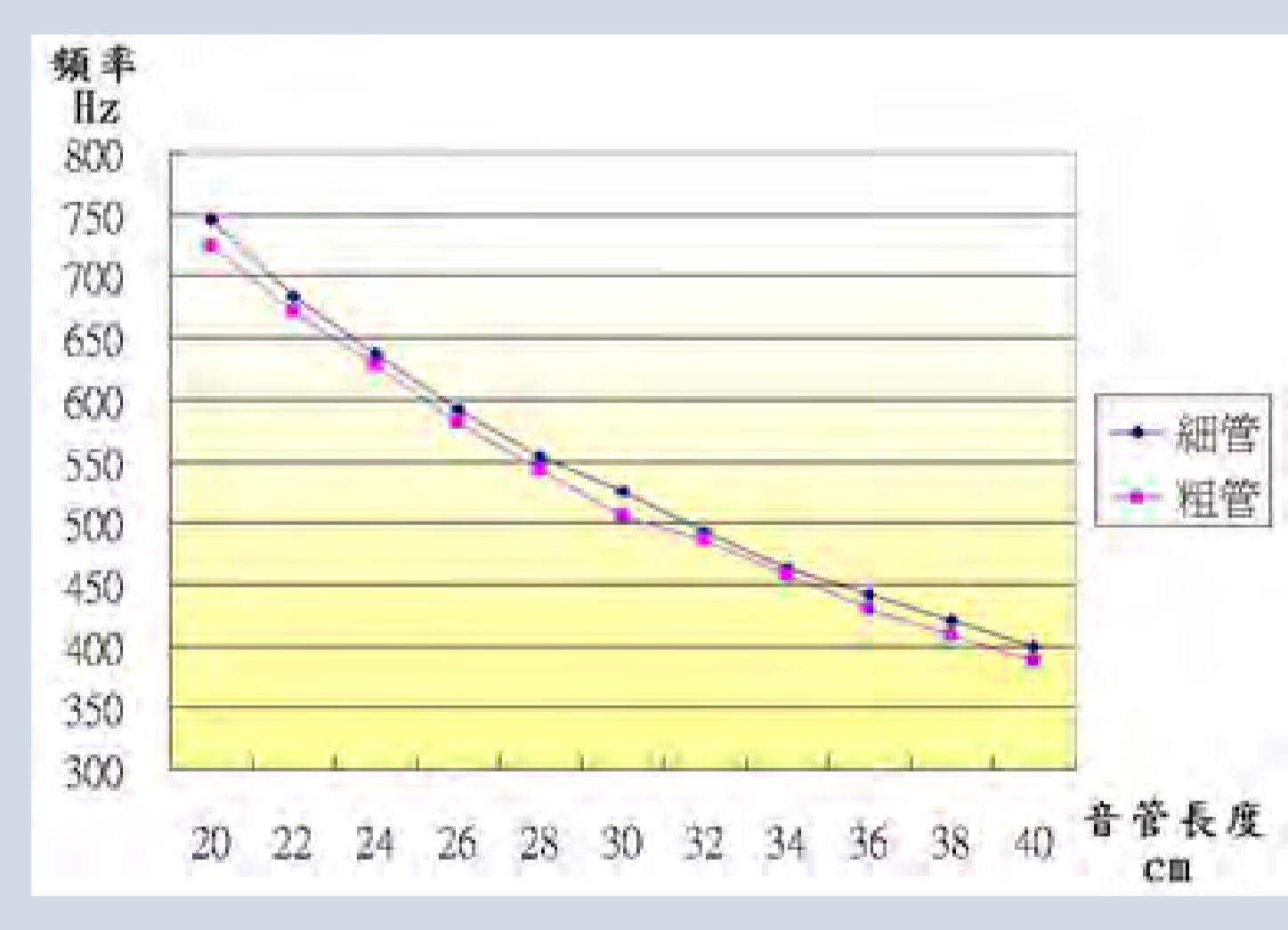
主題一：管長到底怎麼來？

驗證趙松庭先生的管長計算公式: 將公式輸入 Excel 軟體中，計算管長與實際頻率的誤差

查驗管長、管徑與吹口氣窗對基音頻率理論和實測的相關性。觀察不同粗細的水管(管內直徑 16mm 及 13mm)在不同長度的管長中(從氣窗末端往音管末端每 2cm 測量一次)的音高變化。

並得到以下結果：

管長	推估頻率		實測頻率		推估誤差%	
	細管	粗管	細管	粗管	細管	粗管
20	736.0	714.4	745.9	724.7	1.33	1.42
22	678.3	659.9	683.2	671.2	0.72	1.68
24	629.0	613.1	637.0	627.1	1.26	2.23
26	586.3	572.5	592.3	581.3	1.01	1.51
28	549.1	537.0	553.1	542.3	0.72	0.98
30	516.3	505.6	525.6	505.8	1.77	0.04
32	487.3	477.7	492.9	486.1	1.14	1.73
34	461.3	452.7	463.3	457.6	0.43	1.07
36	437.9	430.2	441.8	430.6	0.88	0.09
38	416.8	409.8	420.3	409.1	0.83	-0.17
40	397.7	391.2	399.7	387.6	0.50	-0.93



1. 無論是粗管或細管，不同長度管長所推估出來的頻率與實際頻率的誤差值均小於 2.5% (驗證公式 4)。
2. 無論是粗管或細管，管長越長頻率就會越低。且音管長度相同時，粗管聲音略低於細管。

音管越短，推估值的誤差越大，由文獻資料得知，管長:直徑的比值最好大於 8，可減少誤差

實驗過程與結果: 主題二

主題二：驗證不同音孔位置與音調的變化: 分別以不同粗細的水管先依公式 4 算出不同音調所需的音管長度，並依據觀察的比例結果於旋律笛管上鑿挖音孔。

管別	管徑	氣窗	C5		F5		C6	
			頻率	l	頻率	l	頻率	l
細_13mm	14.4	3.5x8	523.3	296.8	698.5	213.8	1046.5	131.5
粗_16mm	17.6	4x10	523.3	288.4	698.5	205.5	1046.5	123.1

單位: mm

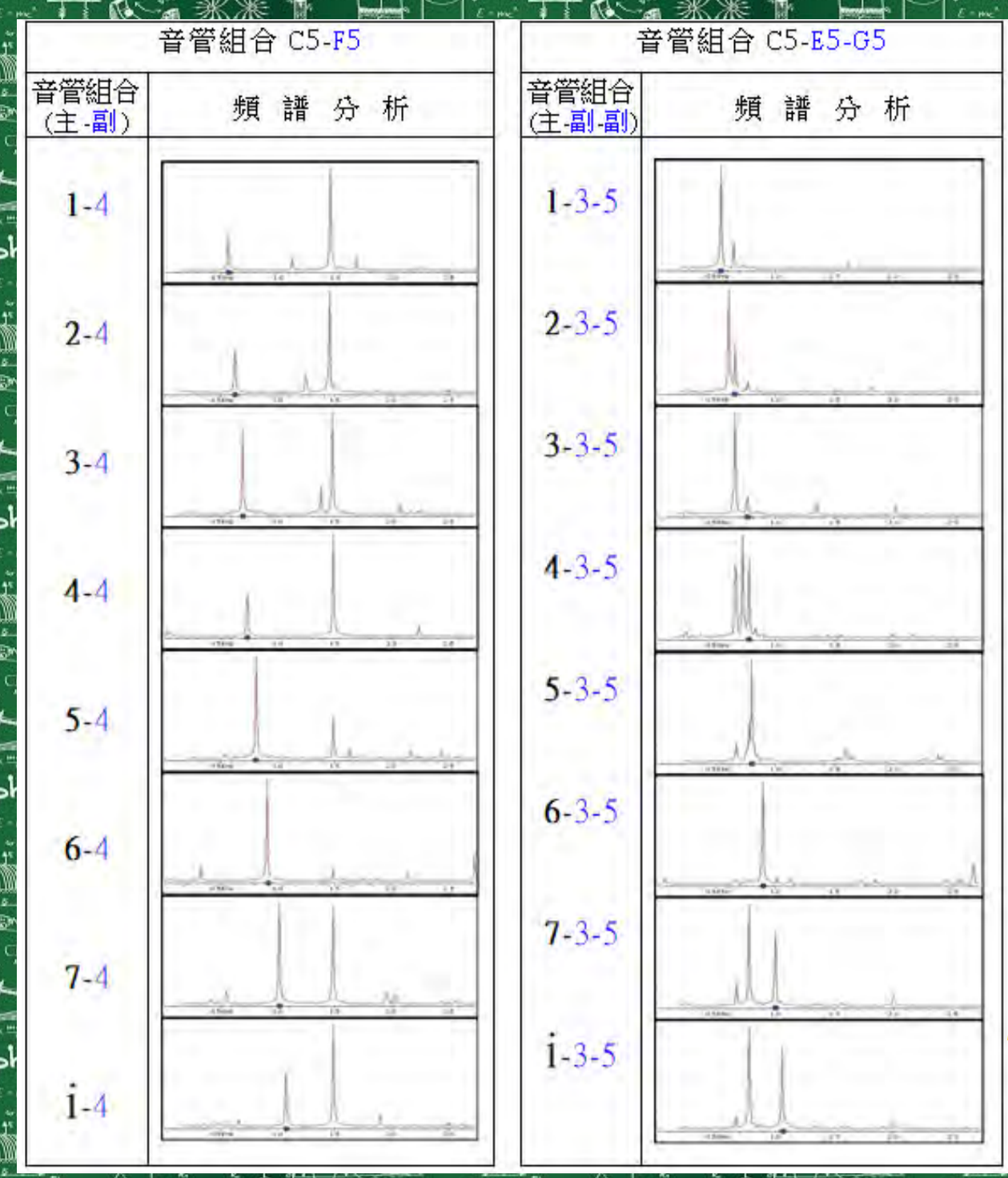
高音 C 笛調整孔徑後的檢驗結果								
音調	C5	D5	E5	F5	G5	A5	B5	C6
粗	○	○	○	○	○	○	○	○
細	○	○	○	○	○	○	○	○

高音 F 笛調整孔徑後的檢驗結果								
音調	F5	G5	A5	B5	C6	D6	E6	F6
粗	○	○	○	○	○	○	○	○
細	○	○	○	○	○	○	○	○

超高音 C 笛調整孔徑後的檢驗結果								
音調	C6	D6	E6	F6	G6	A6	B6	C7
粗	○	○	○	○	○	○	○	○
細	○	○	○	○	○	○	○	○

結果: 不同調性笛以孔位長度比來開挖音孔，各音孔在測量音準並進行調音後(略為調整音孔大小)，均能達到所需的音準，證實我們推斷的音孔位置的比例關係還算準確。

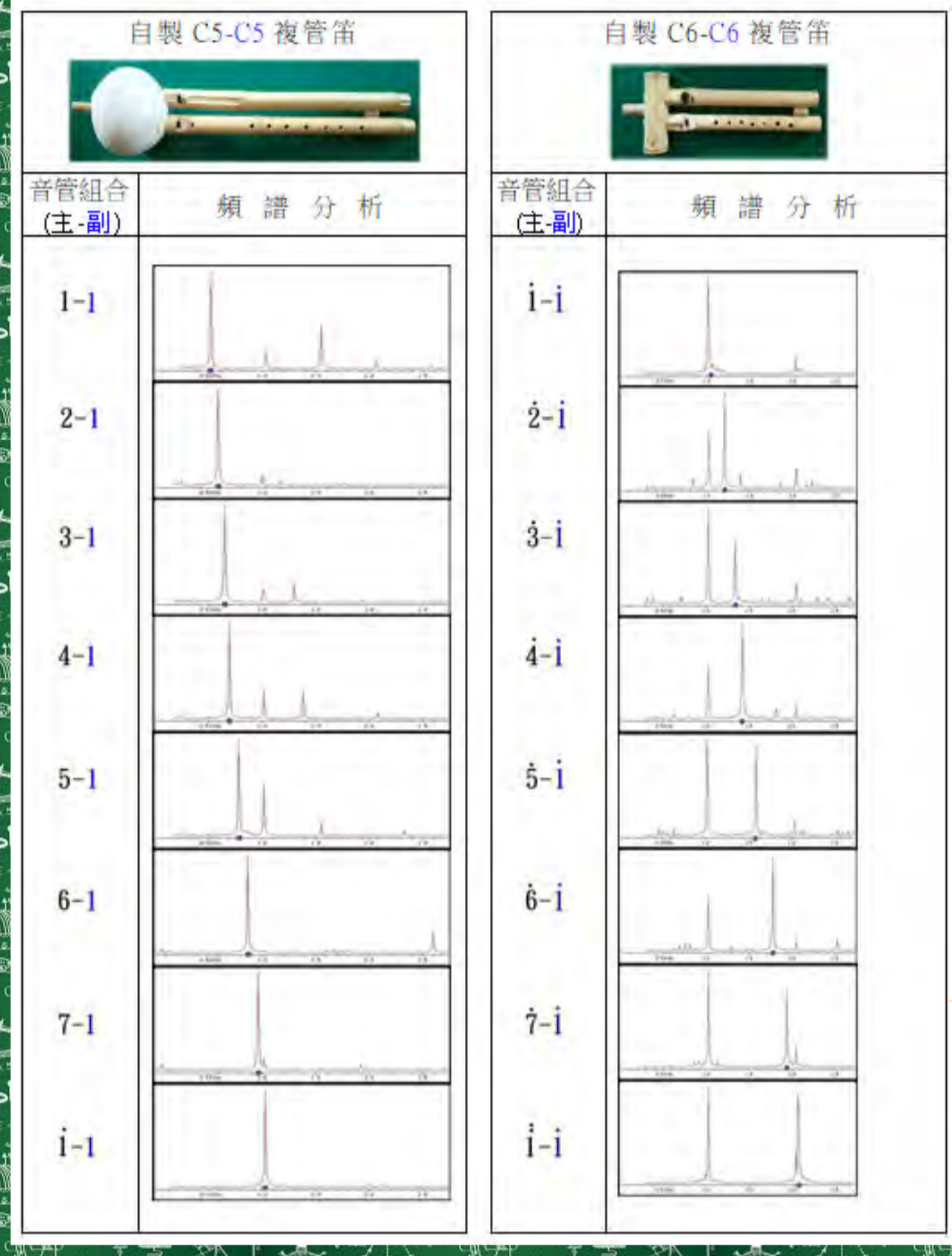
實驗過程與結果:主題三 分別以複管直笛、複管膠管笛、複管竹笛以 Syaku8 軟體測試其和聲之音色



主管(C5)與副管(F5)、主管(C5)與副管(E5、G5)的直笛頻譜分析

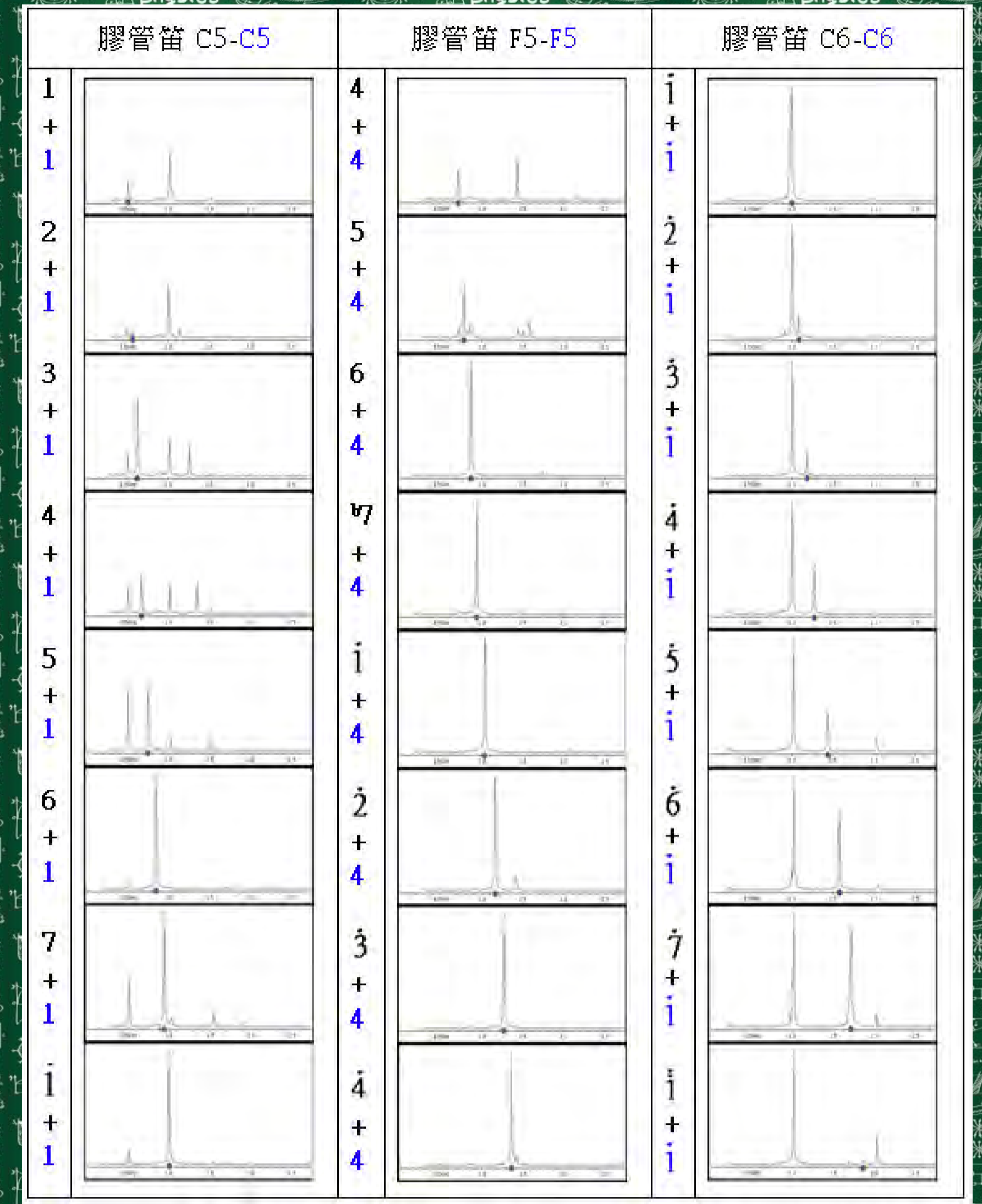
結果一：由表 10 頻譜分析得知，長短笛音管組合 C5-F5 在吹奏低音時，副管 F5 的基音 F5 並不明顯，而是以 F6(泛音一)呈現，使得聲音變得較高亢。而吹奏 Re 時，其音程超過 3 度音，其和音效果佳，在吹奏 Mi 與 Sol 時，其音程雖小於 3 度音，但副管的基音 F5 不明顯，使得和音效果亦顯得和諧。

結果二：在音管組合 C5-E5-G5 三管情形下，主管吹奏 Re 與 Fa 時，其音程組合皆小於 3 度音，顯得音色複雜且和音強過主音。



自製複管竹笛 C5-C5 與 C6-C6 的基音與泛音頻譜分析

以自製複管竹笛 C5-C5 與 C6-C6 進行實驗，由表 12 頻譜分析得到結果與膠管笛雷同，複管竹笛 C5-C5 的主管所發出的旋律明顯且音色較為柔和優美，而複管竹笛 C6-C6 的副管和音強烈，整體的音色則顯得較高亢響亮。



以膠管笛 C5-C5、F5-F5 與 C6-C6 組合下的基音與泛音頻譜分析

由上表得知，膠管笛 C5-C5 在吹奏低音時產生倍頻現象，研判應是吹奏時用力過大所致。而膠管笛 F5-F5 在吹奏第 2 主音時，因主管與複管的音程差異小於 3 度音，亦有點不和諧。在吹奏高音膠管笛 C6-C6 時，和音管 C6 的音量過大，使主旋律較不明顯。

結論與建議

結論

本研究嘗試利用生活中隨手可得的廢棄椰子殼與竹子(掃把柄)，研發製作出融合「複管鼻笛」與「葫蘆絲」優點的一種深具獨特性「複管樂器」。經由要因分析與實驗設計來進行實驗，綜合研究結果分析與討論，得到下列結果：

1. 不論音管長短、粗細，其筒音頻率實測和理論值的誤差均小於 2%，故可由公式 4 求得各音調的實際管長。
2. 音管粗細不同都具有音管愈長頻率愈低，音管愈短頻率越高的關係。而在音管長度相同時，管徑愈大則頻率也會愈低。
3. 不同調性笛以孔位長度比來開挖音孔，各音孔在調音後，以電腦校音軟體 Syaku 8 檢測均能達到所需的音準，故我們可依孔位長度比來製笛，以便吹奏不同的音階。
4. 以複管 C5-C5 的組合較佳，其主管的各音階基音響度均大於副管與泛音，呈現良好的和諧關係。吹奏高音時隨著吹奏力道的增加，副管的基音會減弱，而改由泛音一與泛音二逐漸取代之，雖不穩定亦不失為完美的組合。

建議



由實驗結果得知，自製的雙管複管笛較三管笛的和音音色佳，而雙管笛中又以管長較長的音管組合，其主旋律強度會較為明顯。採用類似複管鼻笛的等長音管，來設計自製複管笛，所吹出的音色較為柔和優美。今製作中音 G 笛(音管長約 40cm)，因笛體本身過長，為了方便吹奏與按壓音孔可將吹嘴改向，且因應清潔之需並加裝排水栓，其構造如左圖所示。

使用不同長短的開管笛來設計自製複管笛，其副管會以倍頻的泛音一來呈現，使得聲音變得較高亢響亮，為解決此問題，可將副管改為閉管笛。選用閉管笛當副管，其優點有以下 4 點：

1. 吹出與主管相同的筒音，所需管長只需約一半的管長即可。
2. 閉管笛所吹出的響度較小，不會凌駕於主管的旋律音。
3. 閉管笛所吹出的筒音，與陶笛類似，不易產生泛音。
4. 閉管笛可依需求，自由的調整筒音頻率。閉管笛雖有以上的優點，然它也有長徑比不得大於 8 的限制，否則會產生氣音。副管採用閉管方式來設計的自製雙管笛，其構造如右圖所示。



音管組合 C5-E5-G5 三管情形下，部分音程組合小於 3 度音，顯得音色複雜且和音強過主音。為能製作出類似葫蘆絲較短的副管來設計自製三管笛，首要之務乃使主旋律強度能較明顯些，為達此目的，除將副管改為閉管外，改變副管的粗細或氣窗的大小，似乎亦是可行之道。自製三管笛，其構造如左圖所示。為了解相同長度的中音 G4 雙管笛(圖 27)與不同長度、管徑且具雙副管閉管 G5 笛的高音 C 三管笛(左圖上)，在吹奏吹奏主音 C5 時，能否達到主旋律強度能比和聲明顯些？特以校音軟體--Syaku 8 進行頻譜分析來驗證，得到結果如下圖。

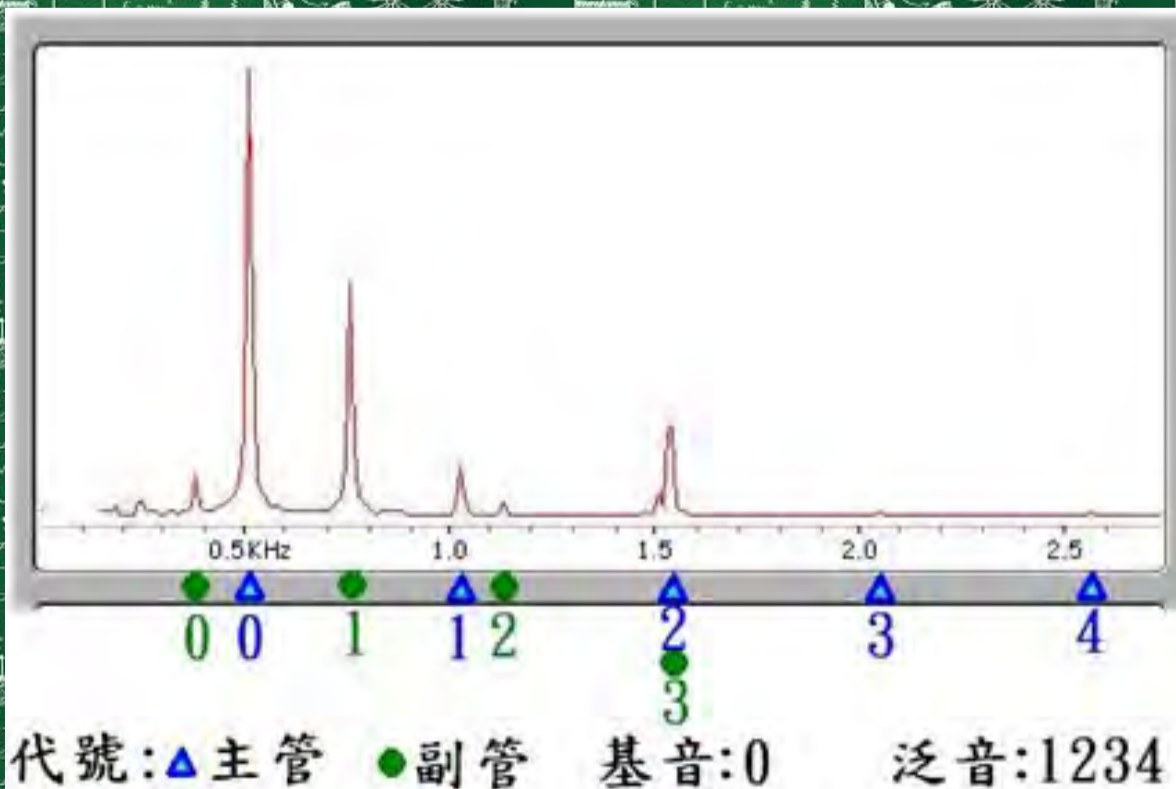


圖 A 中音 G 雙管笛(副管閉管笛 G4)吹奏主音 C5 所發出的頻譜分析

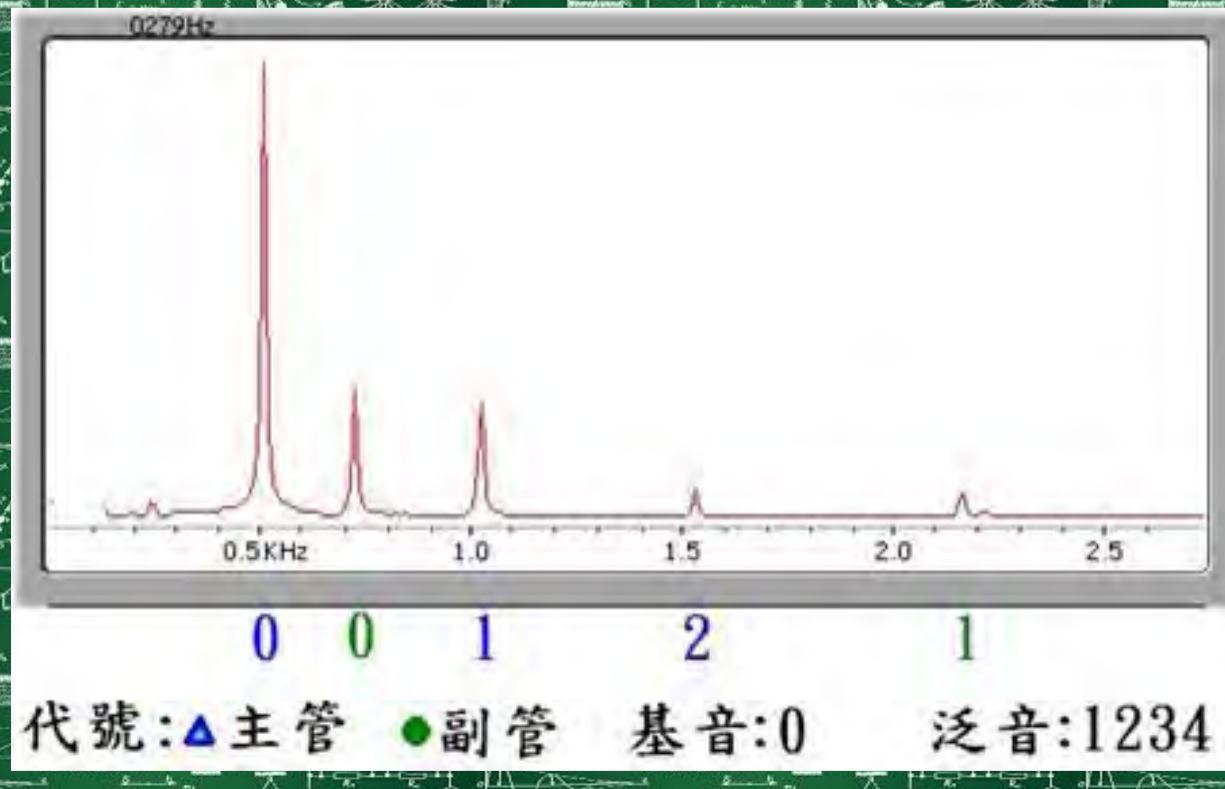


圖 B 高音 C 三管笛(雙副管閉管笛 G5)吹奏主音 C5 的頻譜分析

由圖 A 可以看出主音管 C5 的基音明顯，同時也出現泛音 1 與泛音 2；而扮演和聲角色的副管 G4，其基音與泛音也都能完美的呈現，整體而言，其音色是非常完美無暇的。而圖 B 中亦可看出主音管 C5 的基音明顯，同時也出現泛音 1 與泛音 2；而扮演和聲角色的雙副管 C5 閉管笛，雖是雙管發聲，其基音強度比主音管來的小些，符合所要求的條件，而泛音 1 出現在高 12 度音處，與閉管公式吻合，整體而言，其整體音色是相當和諧的。

參考文獻

- 曾麗芬。重要傳統藝術「排灣族口笛、鼻笛」傳承現況—以傳習計畫(2012 - 2014)為例。趙松庭(1973)。橫笛的頻率計算與應用。樂器科技簡訊 No. 2。知「竹」嘗「樂」。高雄市第 57 屆中小學科學展覽會作品說明書，高中組物理科。「笛」擋不住的魅力。高雄市第 56 屆中小學科學展覽會作品說明書，國小組物理科。黃韻蓁(2011)。排灣族雙管鼻笛之樂器型制、演奏與應用。屏東縣政府文化局。陳炳亨(2013)。國民中學自然與生活科技—第三冊。翰林出版事業股份有限公司。原理分析。國立臺灣師範大學物理學系。取自 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/html.php?html=teacher/sound/sound5>
- Benade, Arthur H.(1990)。Fundamentals of Musical Acoustics。Dover Pubns。