

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組 生活與應用科學(一)科

探究精神獎

082809

3D 列印排笛

學校名稱：高雄市小港區太平國民小學

作者：	指導老師：
小六 簡菟嫻	石明龍
小六 林羿宏	林世恆
小六 洪繹凱	
小六 楊翊鑫	

關鍵詞：3D 列印、排笛、Scratch

壹、 摘要

一般國小的自然課堂上都是使用市售的吸管製作排笛的笛管，但如果封口的填充物不對，要吹出有音階的聲音很難，實驗可操控的因素也有侷限性。本專題的構想是利用 3D 列印機來製作排笛的笛管，找出管長、管壁厚度、管徑、管形對聲音輸出的影響，並和傳統的國小自然課常使用的市售吸管製作的排笛做比較，再依據實驗的結果利用 Scratch 寫出一支程式，只要輸入想要製作的音頻，就能計算出 3D 列印笛管需要的長度及可行的管壁厚度、管徑和管形，最後再利用 3D 列印出一支有音階規律的排笛，透過它能演奏一首簡單的歌曲。

貳、 研究動機

五年級的自然課有一個單元是聲音的探討，課堂中老師教我們用吸管、濕棉花及竹筷子製作鳥笛，但可以吹出有音階聲音的同學其實很少，大部分都是氣音，後來老師用學校的 3D 列印機做了一個排笛，當作獎勵品，我們拿來試吹之後，發現很容易就吹出有音階的聲音，但因為老師當初製作排笛時，只是隨意的製作，所以吹出來的聲音雖然有音階，但很混亂沒有規律，所以就想趁今年的科展，研究如何利用 3D 印表機製作一個有音階規律的排笛，真的能透過它演奏一首簡單的歌曲。

市面上的吸管雖然很多樣，但用它來進行排笛的製作及實驗是有限制的，因為我們只能操控吸管的長度，管壁厚度、管徑、甚至是管形都無法操控，但透過 3D 列印機製作的排笛，除了長度，管壁厚度、管徑、管形都可隨意變化，可以很輕易地列印出不同樣式的笛管。另外，相較於以其他方式手作的實驗器材及平台，3D 列印的最大優勢在於精度、穩定度及再現性都非常的好，本專題的構想是利用 3D 列印的優點找出影響笛管發聲的因素，最後列印出有音階規律的排笛。

參、 研究目的

前期研究

- 研究一：探討不同的3D列印機製作的笛管是否會對輸出的聲音產生影響。
- 研究二：探討笛管底層的厚度是否會對輸出的聲音產生影響。

探討笛管的樣式

- 研究三：探討「管壁厚度」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究四：探討「管徑」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究五：探討「管長」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究六：探討「管形」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究七：3D列印笛管和吸管笛管發聲的比較。

製作成品

- 研究八：撰寫Scratch程式，輸入頻率就能顯示所需的管長及建議的管厚、管徑和管形。
- 研究九：製作一支3D列印的排笛。

肆、 研究設備及器材

一、設備:

設備名稱
3D 印表機 2 台(Ender-3S&CR-8)
Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP Version:1.6.9

二、軟體

軟體名稱
Tinkercad(3D 線上繪圖軟體)
Scratch
Word 2016
Excel 2016

三、材料

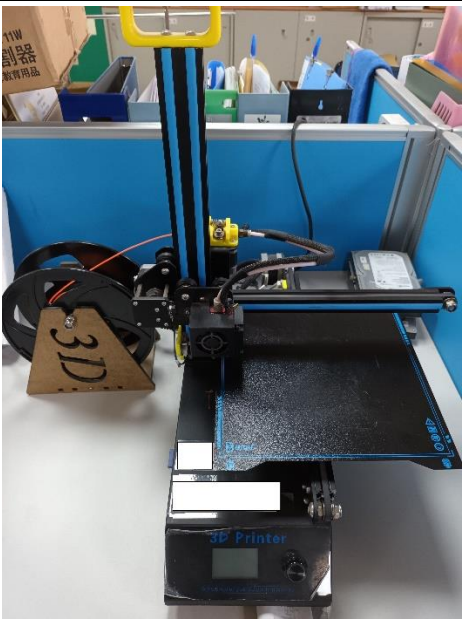
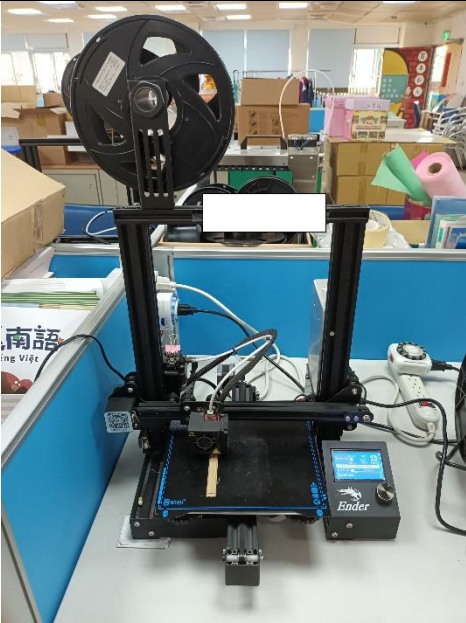
材料名稱
3D 列印線材(1.75mm PLA)
管徑 10mm 吸管
濕黏土
熱熔槍

伍、 研究過程及方法

研究一：探討不同的 3D 列印機製作的笛管是否會對輸出的聲音產生影響。

一、 實驗說明

學校有兩種型號的 3D 列印機，廠牌都是 Creality(創想三維)，一台型號為 CR-8，一台型號為 Ender-3S，因為研究的過程需要列印大量的笛管，為了節省列印等待的時間，想要使用兩台列印機同時列印，因此開始後續的研究之前，想要確認使用這兩台不同的列印機來列印相同規格的笛管，它們的發聲是否會有差異，以決定後續的研究是否使用兩台列印機來列印笛管。

3D 列印機(一)	3D 列印機(二)
	
CR-8	Ender-3S

二、 實驗方法

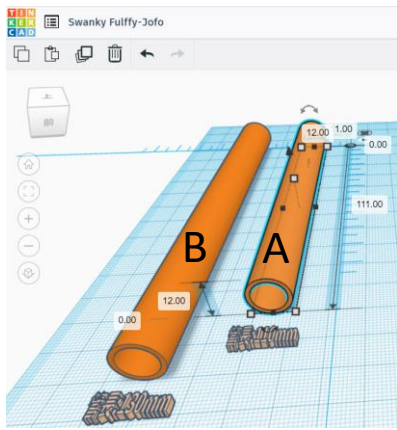
1. 利用線上 Tinkercad 軟體繪製二個不同規格的笛管分別為:

笛管 A：長-110mm,口徑-10mm,管厚-1mm

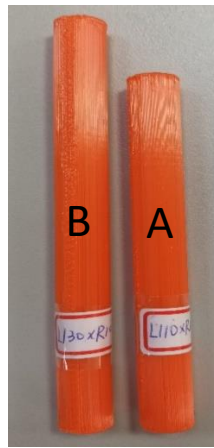
笛管 B：長-130mm,口徑-10mm,管厚-1mm

2. 3D 列印機(一)及(二)都列印出笛管 A 及 B，共 4 支笛管。

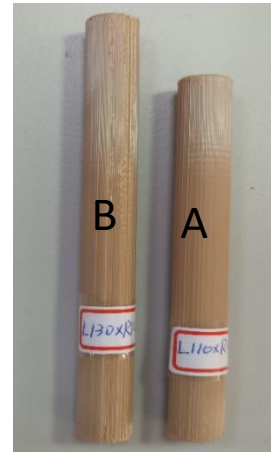
3. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄 4 支笛管吹出的音頻和波形。



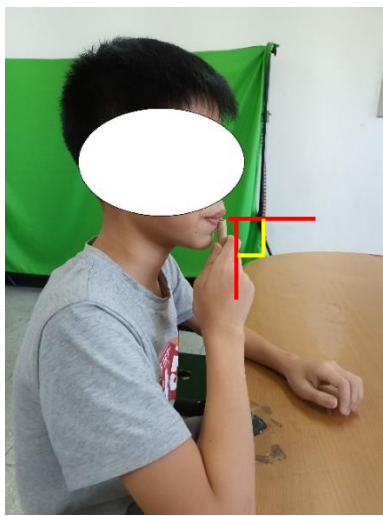
Tinkercad 軟體繪製笛管 A 和 B



CR-8 列印笛管 A 和 B



Ender-3S 列印笛管 A 和 B







吹氣方式-笛管和嘴巴約成 90 度

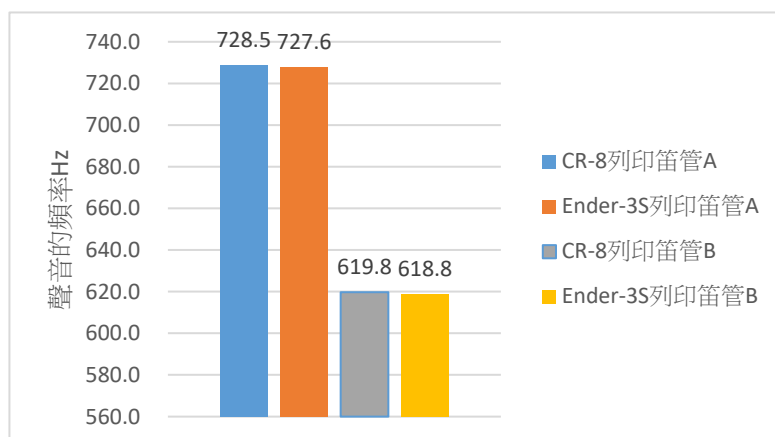
三、實驗紀錄

笛管	測量的頻率(單位: Hz)			
	CR-8	Ender-3S	CR-8	Ender-3S
實驗次數	笛管 A	笛管 A	笛管 B	笛管 B
第一次	727.6	729.2	619.1	617.0
第二次	728.9	727.1	620.2	618.7
第三次	729.1	726.5	620.1	620.8
平均	728.5	727.6	619.8	618.8
相差	0.9		1.0	

不同列印機列印相同的笛管其頻率比較表

3D 列印機(一)列印的笛管 A	3D 列印機(二)列印的笛管 A
	
3D 列印機(一)列印的笛管 B	3D 列印機(二)列印的笛管 B
	

不同列印機列印相同的笛管其音頻頻譜表



不同列印機列印相同的笛管其頻率比較圖

四、實驗發現

- 二台不同列印機列印相同的笛管 A 吹出的聲音，平均頻率只有相差 0.9Hz，波形也沒有明顯的差異；不同列印機列印相同的笛管 B，吹出的聲音平均頻率只有相差 1.0Hz，波形也沒有明顯的差異。
- 兩台列印機列印相同規格的笛管，對吹出的聲音頻率及波形並沒有明顯的影響，所以往後實驗的笛管可使用不同列印機列印。

研究二：探討笛管底層的厚度是否會對輸出的聲音產生影響。

一、實驗說明

3D 列印的物品除非設定的填充率為 100%，否則都不是實心，一般是格子狀，用意是減少材料的使用及縮短列印時間。笛管的一端因為需要密封，要有一定的厚度，在進行主要的實驗之前，想要知道使用 3D 列印的笛管，封底的一端厚度是否會對輸出的聲音產生影響，想讓底層的厚度盡可能的薄，以減少笛管列印的時間、材料的消耗且不會對聲音的輸出產生明顯的影響。

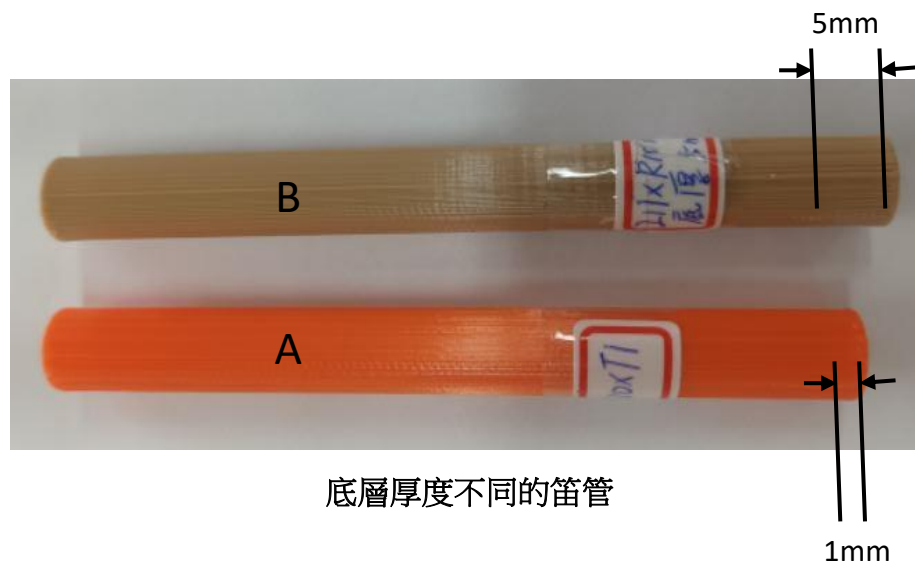
二、實驗步驟

1. 利用線上 Tinkercad 軟體繪製二個不同規格的笛管分別為:

笛管 A → 長:110mm,口徑:10mm,管厚:1mm,管底厚:1mm

笛管 B → 長:110mm,口徑:10mm,管厚:1mm,管底厚:5mm

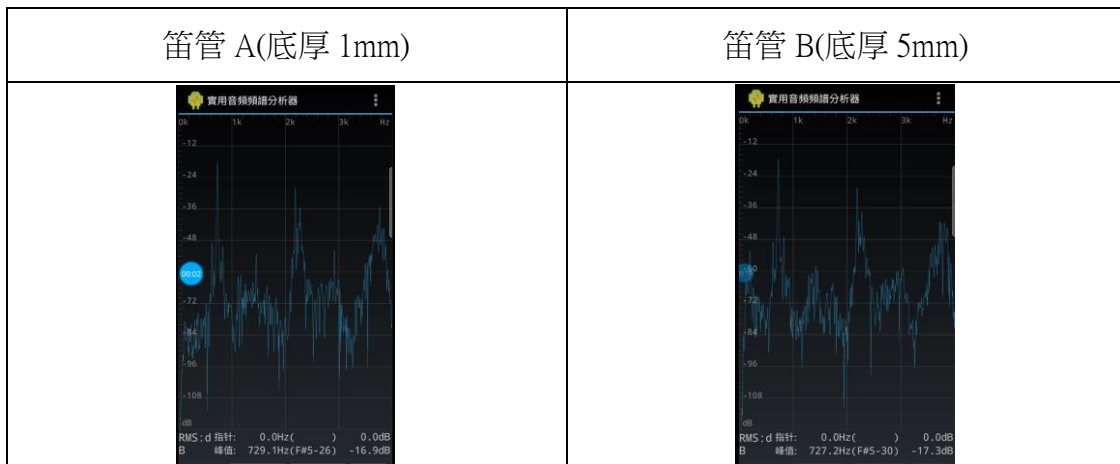
2. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄 2 支笛管吹出的音頻和波形。



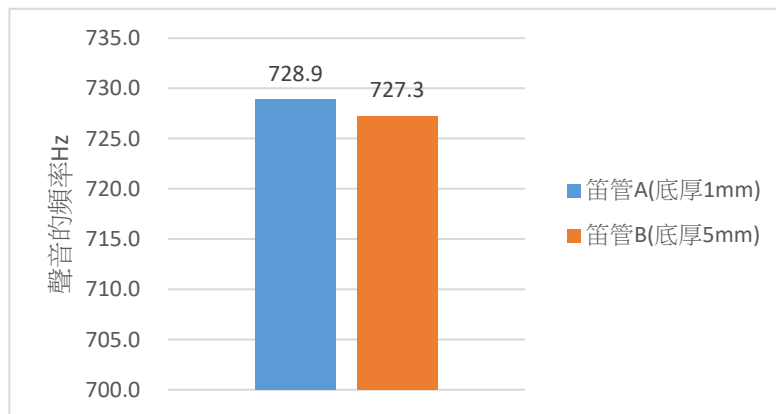
三、實驗記錄

笛管 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)	
	笛管 A	笛管 B
第一次	729.1	727.2
第二次	729.5	728.5
第三次	728.2	726.1
平均	728.9	727.3
相差	1.6	

不同底厚的笛管其頻率比較表



底層厚度不同的笛管其音頻頻譜表



底層厚度不同的笛管其頻率比較圖

四、實驗發現

- 笛管 A 和笛管 B 吹出的聲音，平均頻率只有相差 1.6Hz，波形也沒有明顯的差異，之後實驗的笛管底層厚度可以只用 1mm 來製作。

研究三：探討「管壁厚度」不同的笛管，對發聲的影響。

一、實驗說明

利用 Tinkercad 軟體設計管形、管徑、管長都相同，但管壁厚度不同的笛管，測量它們的音頻及波形。

二、實驗步驟

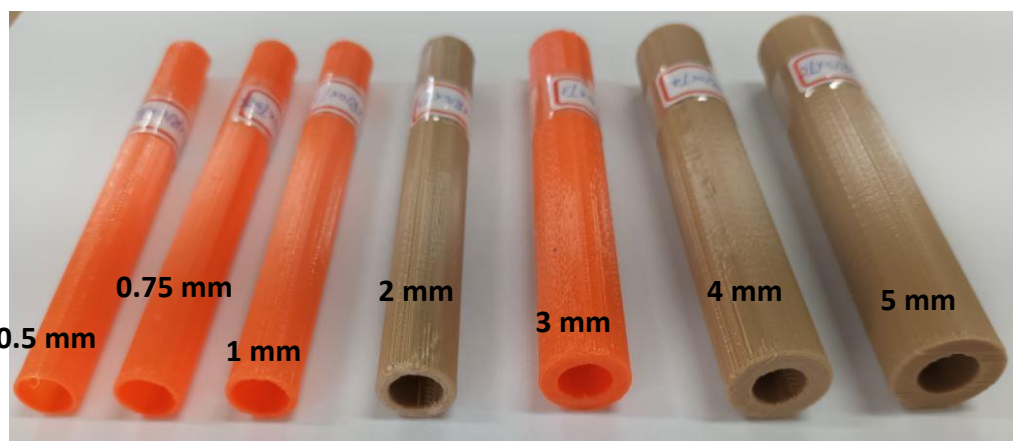
1. 控制的笛管管形、管長及管徑為：

管形	管長	管徑
圓形	110mm	10 mm

2. 利用 Tinkercad 繪製不同管壁厚度的笛管 3D 圖，分別有 0.5mm、0.75mm、1mm、2mm、3mm、4mm、5mm。

3. 利用 3D 列印機列印所有的笛管。

4. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄所有笛管吹出的音頻及波形。

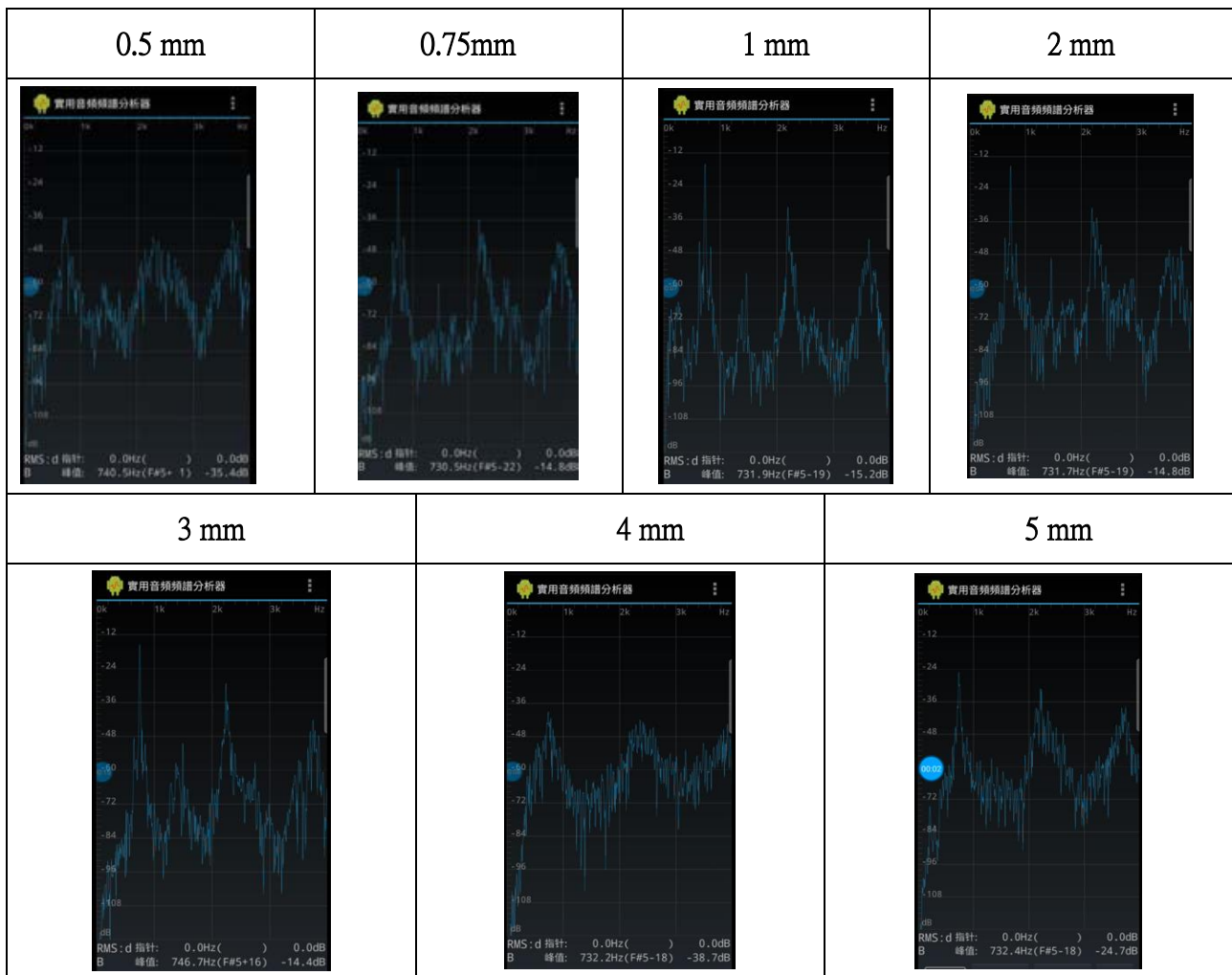


3D 列印不同管壁厚度的笛管

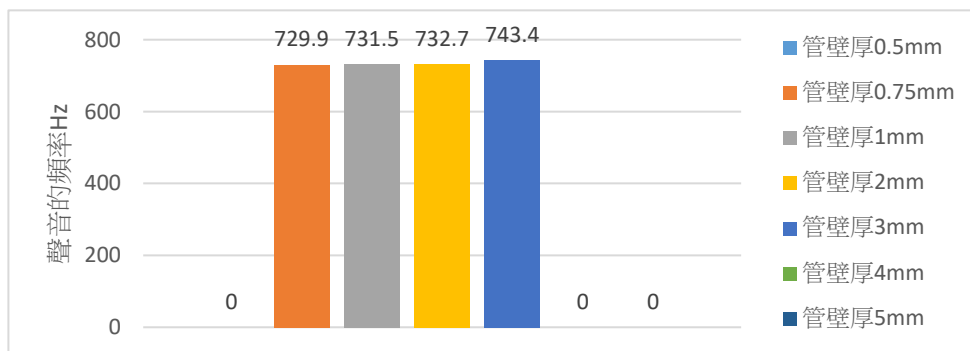
三、實驗記錄

管壁厚度 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)						
	0.5mm	0.75mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
第一次	X	730.5	731.9	731.7	746.7	X	X
第二次	X	729.8	730.2	732.5	743.9	X	X
第三次	X	729.4	732.4	733.9	742.9	X	X
平均	X	729.9	731.5	732.7	743.4	X	X

不同管壁厚度的笛管其頻率比較表



不同管壁厚度的笛管其音頻頻譜表



不同管壁厚度的笛管其頻率比較圖

四、實驗發現

- 管壁厚度 0.75mm、4mm、5mm 只能產生氣音，音波形狀也明顯和其他能正常吹出音階的笛管不同且有多個震幅相當的波峰。
- 管壁厚度 0.75mm、1mm、2mm 平均音頻只相差 2.8Hz，管壁厚度 3mm 的音頻則明顯高出至少 10Hz，波形則差異不大。

研究四：探討「管徑」不同的笛管，對發聲的影響。

一、實驗說明

利用 Tinkercad 軟體設計管形、管長、管壁厚度、都相同，但管徑不同的笛管，測量它們的音頻及波形。

二、實驗步驟

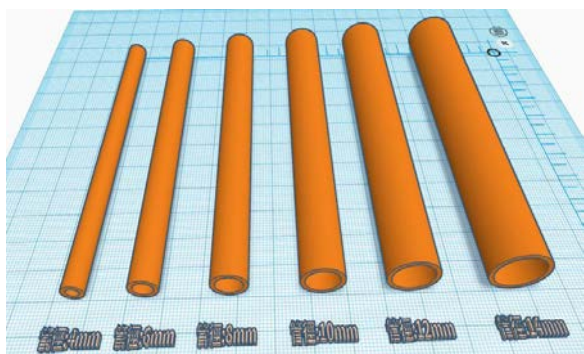
1. 控制的笛管管形、管長及管壁厚度為：

管形	管長	管壁厚度
圓形	110mm	1 mm

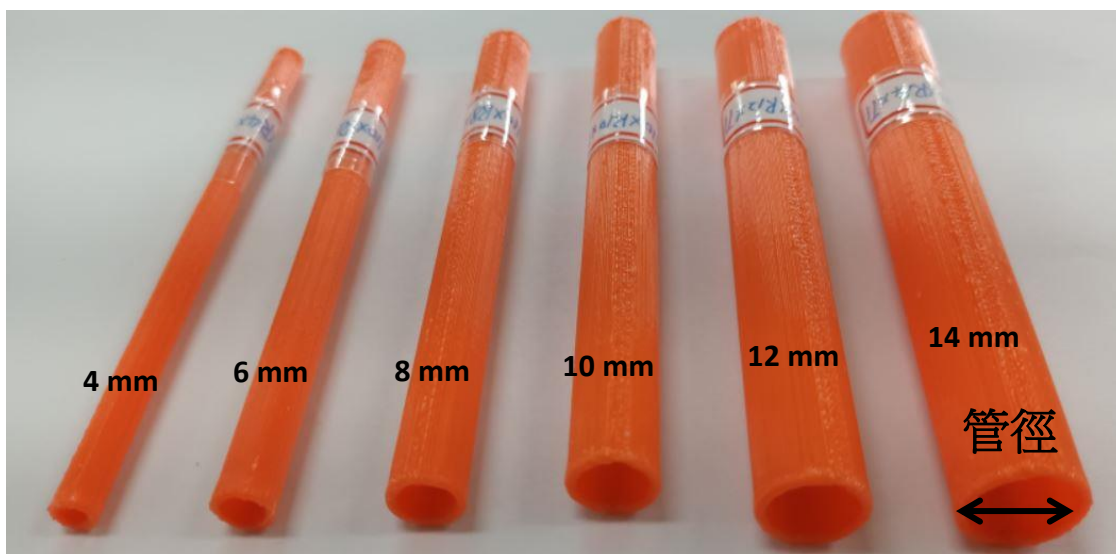
2. 利用 Tinkercad 繪製不同管徑的笛管 3D 圖，分別有 14mm、12mm、10mm、8mm、6mm、4mm。

3. 利用 3D 列印機列印所有的笛管。

4. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄所有笛管吹出的音頻和波形。



Tinkercad 繪製不同管徑的笛管

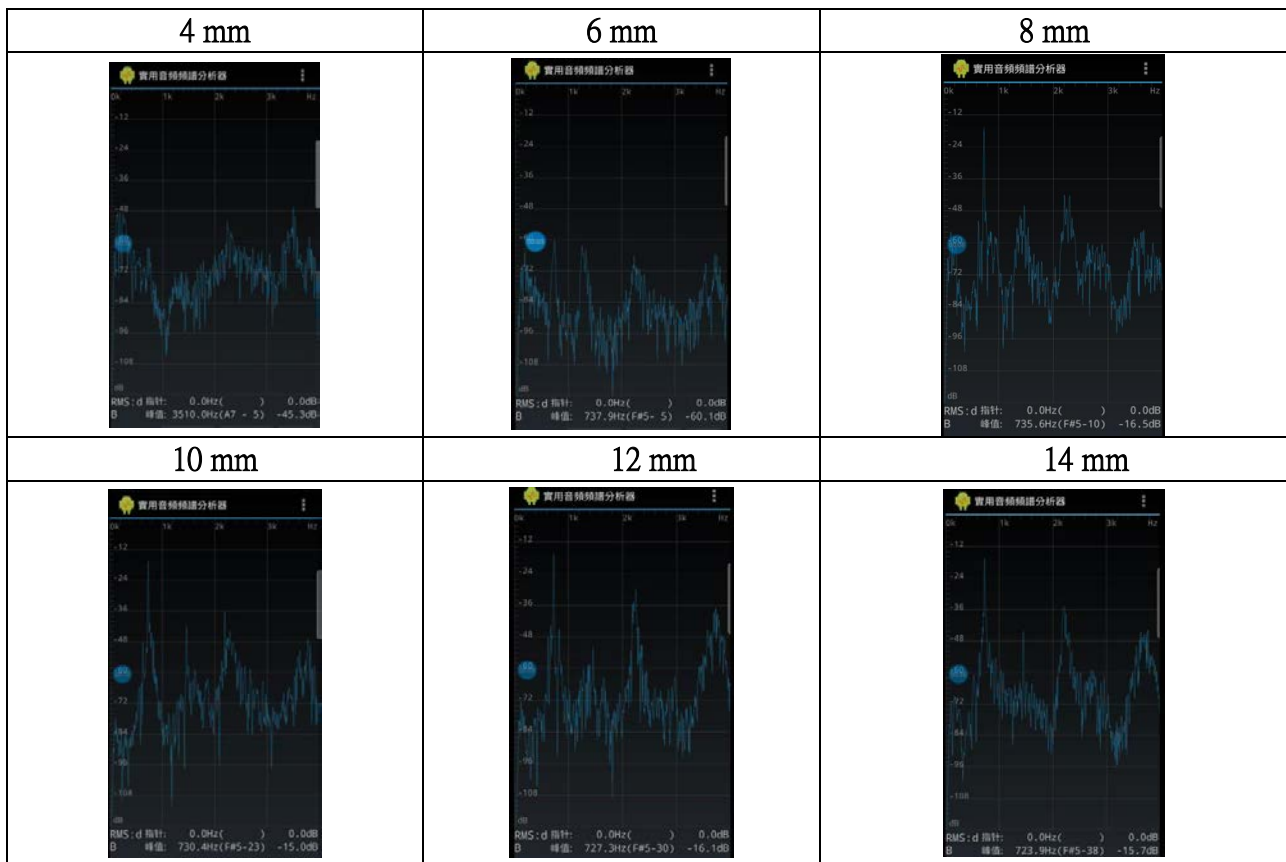


3D 列印不同管徑的笛管

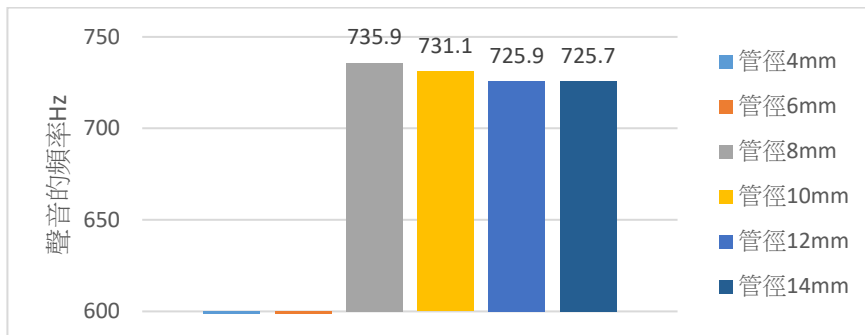
三、實驗記錄

管徑 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)					
	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm	14 mm
第一次	X	X	735.6	730.4	727.3	723.9
第二次	X	X	734.9	733.3	728.3	726.8
第三次	X	X	737.2	729.7	723.5	726.5
平均	X	X	735.9	731.1	725.9	725.7

不同管徑的笛管其頻率比較表



不同管徑的笛管其音頻頻譜表



不同管徑的笛管其音頻比較圖

四、實驗發現

- 管徑 4mm、6mm 只能產生氣音，音波形狀也明顯和其他能正常吹出音階的笛管不同且有多個震幅相當的波峰。
- 管徑 8mm、10mm、12mm、14mm 都能輕易吹出有音階的聲音，管徑越小音頻有增加的趨勢，管徑 14mm 和 8mm 平均音頻相差了 10.2Hz。

研究五：探討「管長」不同的笛管，對發聲的影響。

一、實驗說明

利用 Tinkercad 軟體設計管形、管徑、管壁厚度都相同，但管長不同的笛管，測量它們的音頻及波形。

二、實驗步驟

1. 控制的笛管管形、管徑及管壁厚度為：

管形	管徑	管壁厚度
圓形	10mm	1 mm

2. 利用 Tinkercad 繪製不同管長的笛管 3D 圖，分別有 70mm、75mm、80mm、85mm、90mm、95mm、100mm、105mm、110mm、115mm、120mm、125mm、130mm、135mm、140mm、145mm、150mm、155mm、160mm。
3. 利用 3D 列印機列印所有的笛管。
4. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄所有笛管吹出的音頻和波形。



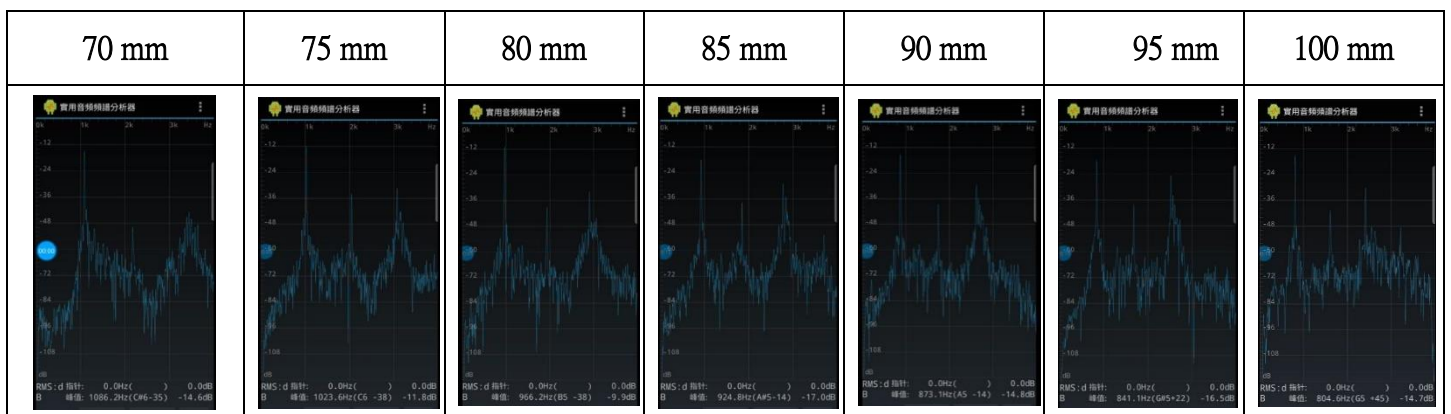
3D 列印不同管長的笛管

三、實驗記錄:

管長(mm) 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)									
	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
第一次	1086.2	1023.6	966.2	924.8	873.1	841.1	804.6	765.3	729.2	700.8
第二次	1082.5	1026.1	964.3	922.3	875.1	839.1	802.9	766.3	731.1	699.7
第三次	1083.2	1028.5	968.5	925.5	872.9	840.6	803.1	764.8	730.3	697.1
平均	1084.0	1026.1	966.3	924.2	873.7	840.3	803.5	765.5	730.2	699.2

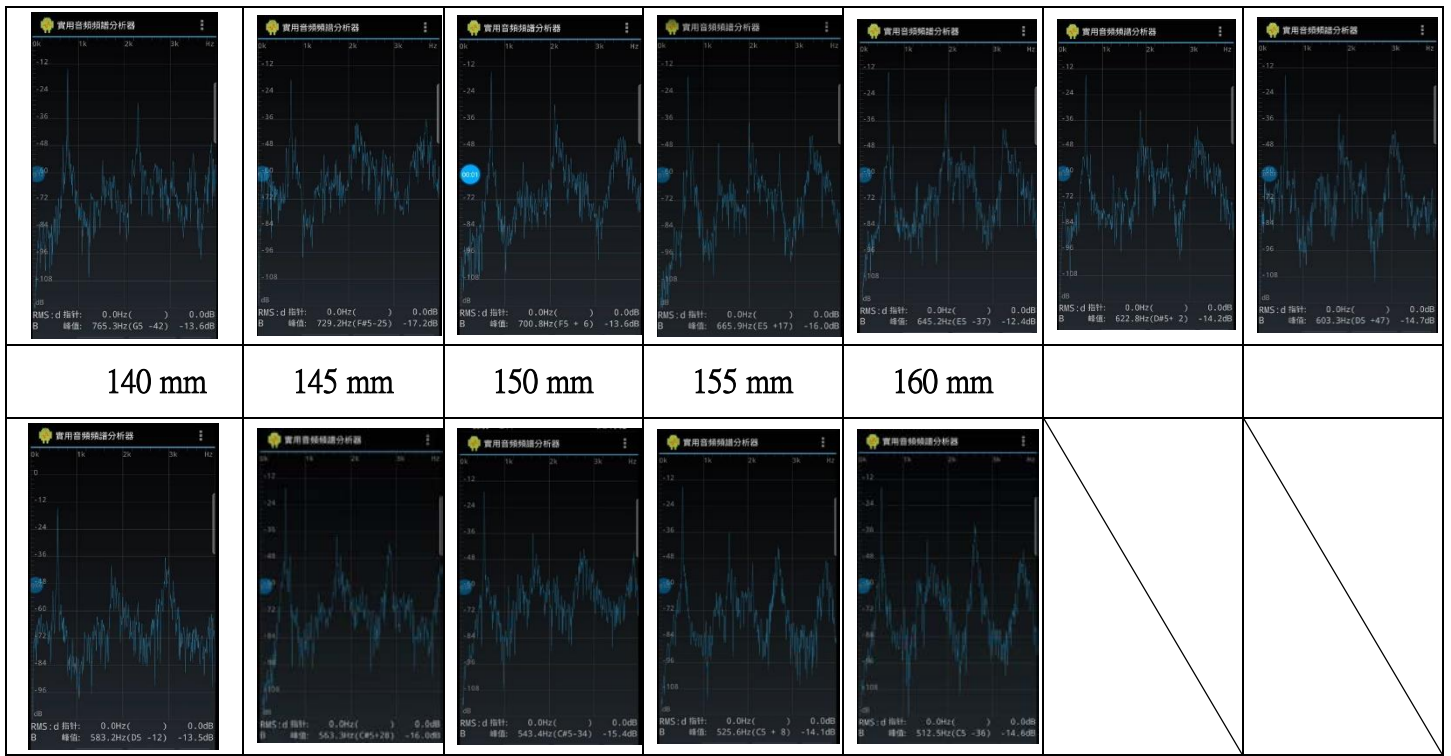
管長(mm) 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)									
	120	125	130	135	140	145	150	155	160	
第一次	665.9	645.2	622.8	603.3	583.2	563.3	543.4	525.6	512.5	
第二次	664.1	646.6	621.5	604.4	582.3	561.4	540.5	526.4	511.7	
第三次	663.7	644.9	620.8	602.8	581.2	562.4	541.9	525.8	511.8	
平均	664.6	645.6	621.7	603.5	582.2	562.4	541.9	525.9	512.0	

不同管長的笛管其頻率比較表

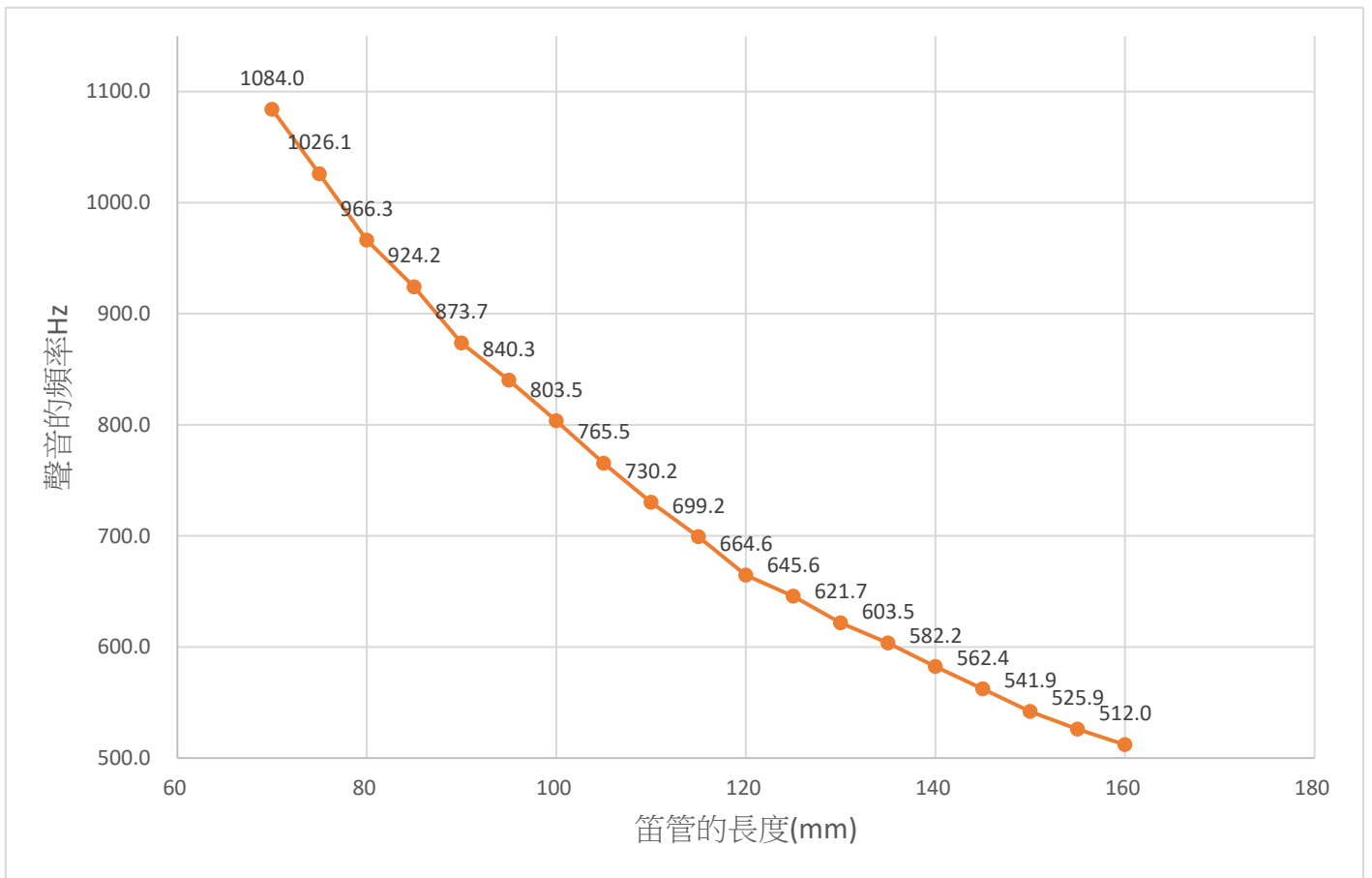


不同管長的笛管其音頻頻譜表(一)

105 mm	110 mm	115 mm	120 mm	125 mm	130 mm	135 mm
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------



不同管長的笛管其音頻頻譜表(二)



笛管的長度和聲音的頻率關係圖

四、實驗發現

- 同樣 5mm 管長的變化，笛管越短即音頻越高，音頻的改變幅度越大；相反的，笛管越長即音頻越低，音頻的改變幅度也越小。
- 雖然大範圍的管長和音頻的關係不是直線而是曲線，但如果把每 5mm 的管長和頻率的關係當作直線，以此建立頻率計算管長的公式如下：

$$L(\text{長度}) = L(\text{高頻點}) + (F(\text{高頻點}) - F(\text{輸入的頻率})) \times 5 / (F(\text{高頻點}) - F(\text{低頻點}))。$$

例子 若要計算頻率 570Hz 的管長，該段的高頻點長度(L(高頻點))是 140mm，高頻點頻率(F(高頻點))是 582.2Hz，低頻點頻率(F(低頻點))是 562.4Hz，計算出來的長度(L)為：

$$L = 140 + (582.2 - 570) \times 5 / (582.2 - 562.4) \rightarrow L = 143.1 \text{ (四捨五入取小數點第一位)}$$

研究六：探討「管形」不同的笛管，對發聲的影響。

一、實驗說明

利用 Tinkercad 軟體設計管長、管徑、管壁厚度都相同，但管形不同的笛管，測量它們的音頻及波形。

二、實驗步驟

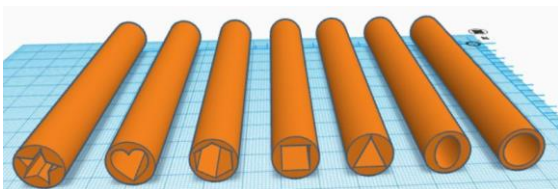
1. 控制的笛管管形、管長及管徑為：

管長	管徑	管壁厚度
110mm	10mm	1 mm

2. 利用 Tinkercad 繪製不同管形的笛管 3D 圖，分別有圓形、橢圓形、三角形、正方形、六角形、愛心形、星形。

3. 利用 3D 列印機列印所有的笛管。

4. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄除了圓形笛管以外所吹出的音頻和波形，圓形音頻數據採用研究五的實驗記錄。



Tinkercad 繪製不同管形的笛管

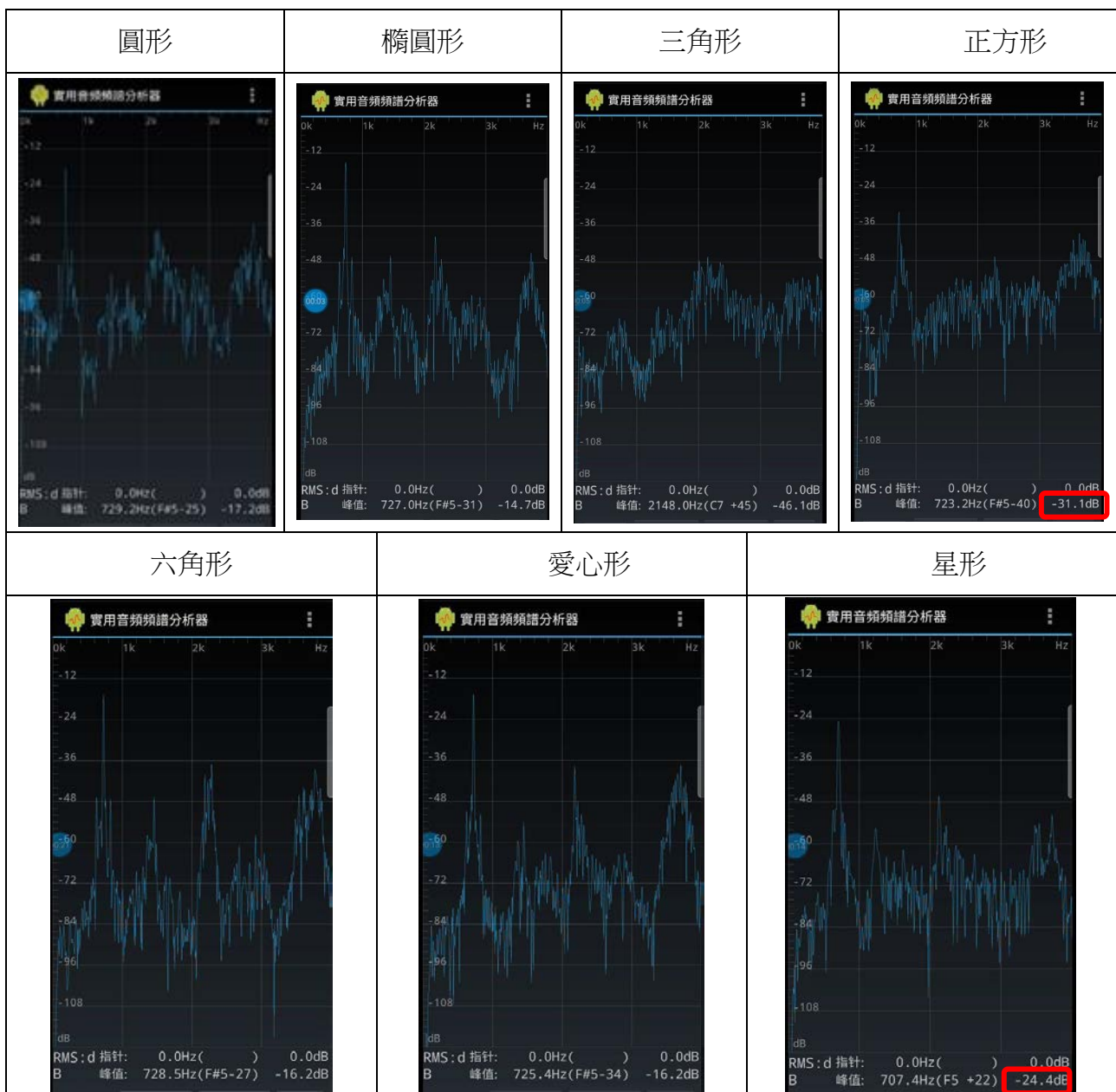


3D 列印不同管形的笛管

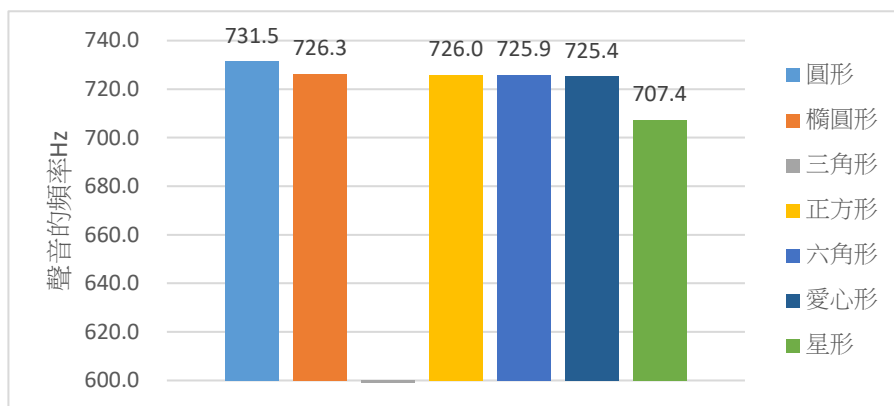
三、實驗記錄:

管形 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)						
	圓形	橢圓形	三角形	正方形	六角形	愛心形	星形
第一次	729.2	727.0	X	X	728.5	725.4	X
第二次	731.1	725.6	X	723.2	725.5	724.1	X
第三次	730.3	726.4	X	728.7	726.2	726.6	707.4
平均	730.2	726.3	X	726.0	725.9	725.4	707.4

不同管形的笛管其頻率比較表



不同管形的笛管其音頻頻譜表



不同管形的笛管其音頻比較圖

四、實驗發現

- 從三角形笛管的音波形狀可以看出很難吹有音階的聲音，都是氣聲。
- 正方形及星形笛管也不是很容易能吹出有音階的聲音，就算能吹出有音階的聲音，聲音的震幅(大小)相對也比較弱，因很難吹出音階，音頻就沒有參考價值。
- 圓心、橢圓形、六角形、愛心形很容易就吹出有音階的聲音，其平均頻率最大只有相差 6.1Hz，還在相同的音階內。

研究七：3D 列印笛管和吸管笛管發聲的比較。

一、實驗說明

市面上管徑比較寬的是波霸奶茶的吸管，管徑約 10mm，管壁則小於 0.5mm，依據”中華民國第 50 屆中小學科學展覽會國小組物理科-排笛排敵”的作品說明，吸管填塞物使用熱熔膠及溼黏土會有比較好的發聲效果，這個實驗想要製作管徑及管長相同的 3D 列印和吸管笛管，比較它們發聲的差異。

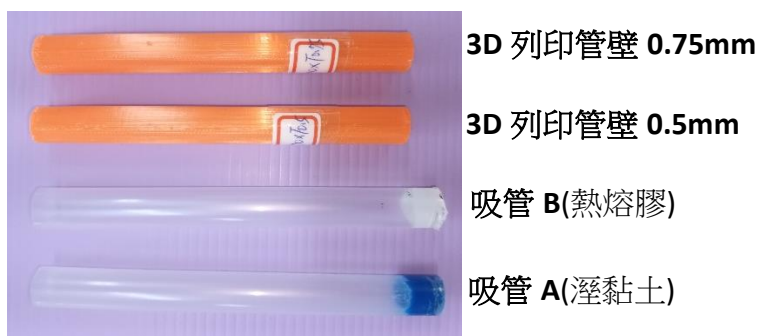
二、實驗步驟

1. 3D 列印和吸管製作的笛管管長及管徑皆為：

管長	管徑
110mm	10mm

2. 將兩根吸管裁切為 120mm，吸管 A 填充溼黏土約 10mm，吸管 B 填充熱熔膠約 10mm。
3. 利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄吸管 A 和吸管 B 吹出的音頻和波形。



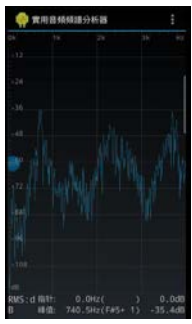

4. 比較四支笛管的音頻和波形，分別為吸管 A、吸管 B、3D 列印管壁厚度為 0.5mm 及 0.75mm 的笛管，3D 列印的笛管音頻數據採研究三的實驗記錄。



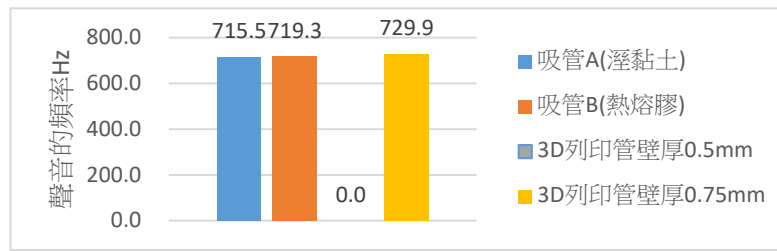
三、實驗記錄

管材 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)			
	吸管		3D 列印笛管	
	A (溼黏土)	B (熱熔膠)	管壁厚 0.5mm	管壁厚 0.75mm
第一次	714.1	716.7	X	730.5
第二次	713.6	720.1	X	729.8
第三次	718.7	718.5	X	729.4
平均	715.5	719.3	X	729.9

3D 列印和吸管製作的笛管其頻率比較表

吸管 A (溼黏土)	吸管 B (熱熔膠)
	
3D 列印管壁厚 0.5mm	3D 列印管壁厚 0.75mm
	

3D 列印和吸管製作的笛管其音頻頻譜表



3D 列印和吸管製作的笛管其音頻比較圖

四、實驗發現

- 吸管以熱熔膠為填充物，比較不容易吹出有音階的聲音，就算吹出有音階的聲音振幅(聲音的大小)也比較弱，吸管以溼黏土為填充物則相對容易吹出有音階的聲音。
- 3D 列印笛管管壁厚 0.75mm 和吸管以溼黏土為填充物，其平均音頻相差了 14.4Hz 約半個音階。
- 依實際的測試吹出有音階聲音的笛管，由易到難為：
3D 列印管壁厚 0.75mm > 吸管 A (溼黏土) > 吸管 B (熱熔膠) > 3D 列印管壁厚 0.5mm

研究八：撰寫 Scratch 程式，輸入頻率就能顯示所需的管長及建議的管厚、管徑和管形。

一、製作說明

依據實驗結果撰寫一支 Scratch 程式，輸入頻率就能顯示 3D 列印笛管所需要的長度及建議可行的管壁厚度、管徑範圍和管形，後續再利用程式執行的結果，製作及列印 3 支不同長度的笛管，最後再測試這 3 支笛管是否能吹奏出所需要的頻率。管長的計算方式依研究五的實驗發現說明，把每 5mm 的管長和頻率的關係當作直線。

二、製作步驟

1. 利用 Scratch 撰寫程式，功能為輸入頻率就能顯示 3D 列印笛管所需要的長度及建議可行的管壁厚度、管徑範圍和管形。
2. 執行程式輸入 3 組不同的頻率，會獲得 3 組不同的笛管長度。
3. 依據步驟 2 獲得的 3 組笛管長度，利用 Thinkercad 繪製並列印出笛管。
4. 吹奏 3 組笛管，利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄音頻和波形。
5. 比較實際吹出的音頻和預期的音頻差異。

三、製作的結果

1. 程式執行畫面及程式碼

程式執行畫面



計算按鍵程式碼



主程式、音頻計算管長函數及管壁厚度、管徑及管形建議函式



當收到訊息 開始計算

變數 音頻 設為 --

變數 管壁厚度 設為 --

變數 管徑 設為 --

變數 管形 設為 --

變數 管長 設為 --

詢問 請輸入笛管想要吹出的頻率 並等待

變數 音頻 設為 詢問的答案

如果 音頻 > 400 且 音頻 < 1100 那麼

管壁厚度、管徑及管形建議

頻率計算長度 音頻

說出 笛管製作規格如上

否則

說出 您輸入的聲音頻率不正確或超出範圍

定義 頻率計算長度 頻率

變數 目前在第幾項 設為 1

重複 清單 音頻清單 的長度 - 1 次

如果 頻率 < 音頻清單 的第 目前在第幾項 項 或 頻率 = 音頻清單 的第 目前在第幾項 項 那麼

如果 頻率 > 音頻清單 的第 目前在第幾項 + 1 項 或 頻率 = 音頻清單 的第 目前在第幾項 + 1 項 那麼

變數 管長和頻率的比值 設為 5 / 音頻清單 的第 目前在第幾項 項 - 音頻清單 的第 目前在第幾項 + 1 項

變數 管長 設為 管長清單 的第 目前在第幾項 項 + 音頻清單 的第 目前在第幾項 項 - 頻率 * 管長和頻率的比值

停止 全部

變數 目前在第幾項 改變 1

變數 管長 設為 頻率超出範圍

如果 頻率 > 音頻清單 的第 1 項 那麼

變數 管長 設為 管長清單 的第 1 項 + 音頻清單 的第 1 項 - 頻率 * 5 / 音頻清單 的第 1 項 - 音頻清單 的第 2 項

如果 頻率 < 音頻清單 的第 19 項 那麼

變數 管長 設為 管長清單 的第 18 項 + 音頻清單 的第 18 項 - 頻率 * 5 / 音頻清單 的第 18 項 - 音頻清單 的第 19 項

2. 在程式中依序輸入 3 組聲音頻率分別為 570Hz、780Hz、980Hz，執行計算後獲得管長應為 143.1mm、103.1mm、78.9mm，執行畫面如下：

輸入聲音頻率為 570Hz	輸入聲音頻率為 780Hz	輸入聲音頻率為 980Hz
<p>您輸入的聲音頻率為: <input type="text" value="570"/></p> <p>管壁厚度範圍: 0.75 ~ 2 mm</p> <p>管徑範圍: 8 ~ 14 mm</p> <p>可用管形: 圓形、橢圓形、六角形、愛心形</p> <p>依據您輸入的音頻計算的管長為: 143.080808</p> <p><input type="button" value="計算"/></p>	<p>您輸入的聲音頻率為: <input type="text" value="780"/></p> <p>管壁厚度範圍: 0.75 ~ 2 mm</p> <p>管徑範圍: 8 ~ 14 mm</p> <p>可用管形: 圓形、橢圓形、六角形、愛心形</p> <p>依據您輸入的音頻計算的管長為: 103.092105</p> <p><input type="button" value="計算"/></p>	<p>您輸入的聲音頻率為: <input type="text" value="980"/></p> <p>管壁厚度範圍: 0.75 ~ 2 mm</p> <p>管徑範圍: 8 ~ 14 mm</p> <p>可用管形: 圓形、橢圓形、六角形、愛心形</p> <p>依據您輸入的音頻計算的管長為: 78.854515</p> <p><input type="button" value="計算"/></p>

3. 依據上面管長計算結果，經 Thinkercad 繪製及 3D 列印笛管後吹奏測試獲得的音頻如下：



3D 列印可吹出預期頻率的笛管

管長(mm)	測量的頻率(單位: Hz)		
	143.1mm	103.1mm	78.9mm
實驗次數			
第一次	571.8	779.3	981.5
第二次	569.5	781.5	982.3
第三次	569.9	782.1	981.3
平均	570.4	781.0	981.7
預期的頻率	570.0	780.0	980.0
相差	0.4	1.0	1.7

實際吹出的頻率和預期的頻率比較表

- 3 組笛管實際吹奏出來的頻率和預期的頻率只相差 0.4Hz ~ 1.7Hz。

研究九：製作一支 3D 列印的排笛。

一、製作說明

依據音階頻率對照表將 B4~C6 等 9 個音階的頻率，透過研究八製作的程式計算相對應的笛管長度，再透過 Tinkercad 繪製圓形及愛心形兩種不同管形的排笛並列印出來，最後再測試每根笛管吹奏出來的音頻是否接近預期的音階頻率。

二、製作步驟

1. 依據音階頻率對照表，透過研究八的程式計算頻率 494(B4)、523(C5)、587(D5)、659(E5)、698(F5)、784(G5)、880(A5)、988(B5)、1047(C6)等 9 個音階所需的 3D 列印笛管長度。

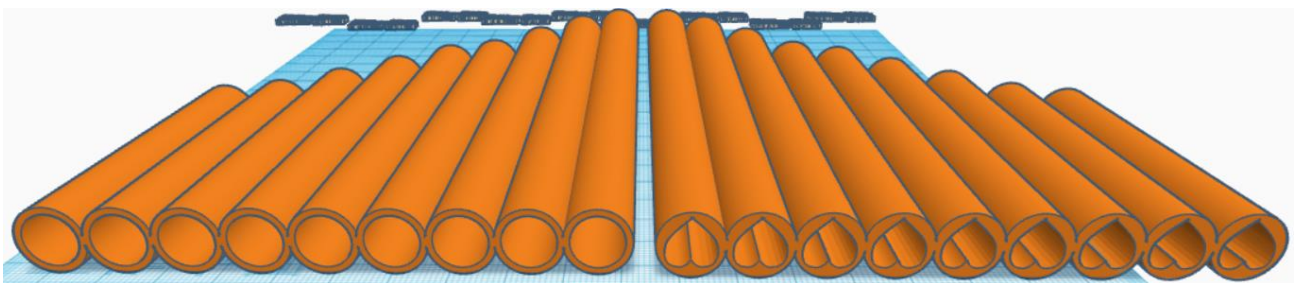
八度音域	半音	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	唱名	Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	So	So#	La	La#	Si
	代號	C	CS	D	DS	E	F	FS	G	GS	A	AS	B
2	頻率	65	69	73	78	82	87	93	98	104	110	117	123
3	頻率	131	139	147	156	165	175	185	196	208	220	233	247
	簡譜	1		2		3	4		5		6		7
4	頻率	262	277	294	311	330	349	370	392	415	440	466	494
	簡譜	1		2		3	4		5		6		7
5	頻率	523	554	587	622	659	698	740	784	83	880	932	988
	簡譜	1		2		3	4		5		6		7
6	頻率	1047	1109	1175	1245	1319	1397	1480	1568	1661	1760	1865	1976

音階頻率對照表

音階	B4	C5	D5	E5	F5	G5	A5	B5	C6
頻率(Hz)	494	523	583	659	698	784	880	988	1047
計算的管長(mm)	166.5	156.1	138.9	121.5	115.2	102.6	89.4	78.2	73.2

音階、頻率及管長對照表

2. 依據程式計算出來的 9 支笛管長度，透過 Tinkercad 繪製排笛並列印出來，共列印圓形及愛心形兩種。9 支笛管的管徑皆為:10mm、管壁厚度皆為 1mm。



Tinkercad 繪製排笛



3D 列印圓形排笛



3D 列印愛心形排笛

3. 吹奏排笛的笛管，利用 Android 手機+實用音頻頻譜分析器 APP 測量並記錄音頻。

三、製作的結果

管長 (mm) 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)								
	166.5	156.1	138.9	121.5	115.2	102.6	89.4	78.2	73.2
第一次	493.3	521.7	585.7	661.4	700.2	782.1	883.9	982.5	1051.4
第二次	492.4	522.9	584.5	658.1	698.5	782.6	881.2	987.1	1048.9
第三次	493.1	523.7	585.6	657.8	700.5	781.7	882.7	985.5	1050.3
平均	492.9	522.8	585.3	660.3	699.7	782.1	882.6	985.0	1050.2
預期的音階	Si (B)	Do (C)	Re (D)	Mi (E)	Fa (F)	So (G)	La (A)	Si (B)	Do (C)
預期的頻率	494	523	587	659	698	784	880	988	1047
相差	-1.1	-0.2	-1.7	1.3	1.7	-1.9	2.6	-3.0	3.2

「圓形排笛」的笛管實際吹奏出來的頻率和預期的頻率比較表

管長 (mm) 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)								
	166.5	156.1	138.9	121.5	115.2	102.6	89.4	78.2	73.2
第一次	491.8	524.7	584.8	660.6	697.7	782.6	883.9	992.2	1049.4
第二次	491.2	525.2	585.3	662.7	699.7	783.9	884.2	990.4	1050.7
第三次	490.6	526.3	584.4	659.5	700.2	782.2	883.3	991.9	1049.8
平均	491.2	525.4	584.8	660.3	699.2	782.9	883.8	991.5	1050.0
預期的音階	Si (B)	Do (C)	Re (D)	Mi (E)	Fa (F)	So (G)	La (A)	Si (B)	Do (C)
預期的頻率	494	523	587	659	698	784	880	988	1047
相差	-2.8	2.4	-2.2	1.3	1.2	-1.1	3.8	3.5	3.0

「愛心形排笛」的笛管實際吹奏出來的頻率和預期的頻率比較表

- 圓形排笛的笛管所吹奏出來的音頻和預期的頻率誤差最大只有 3.2Hz。
- 愛心形排笛的笛管所吹奏出來的音頻和預期的頻率誤差最大只有 3.8Hz。

陸、討論

一、探討不同的 3D 印列機」製作的笛管是否會對輸出的聲音產生影響。

- 依據實驗結果不同型號的 3D 列印機列印出來的笛管，不會對吹奏出聲音的難易度、音頻及波形產生明顯的影響，所以不同的列印機不會影響笛管列印的再現性。

二、探討笛管底層的厚度是否會對輸出的聲音產生影響。

- 由實驗可以發現笛管的底層厚度，不會對吹奏出的聲音產生明顯的影響。因實驗只是想找出相對比較薄的底層厚度進行之後的實驗，因此只進行 1mm 和 5mm 的比較。因為要節省材料及列印時間，所以選擇 1mm 當作後續實驗及排笛的底厚。

三、探討「管壁厚度」不同的笛管，對發聲的影響。

- 管壁厚度太薄或太厚都會造成不容易吹奏出有音階的聲音
- 要吹奏出有音階的聲音，管壁的建議範圍為 0.75mm ~ 2mm。

四、探討「管徑」不同的笛管，對發聲的影響。

- 管徑太小會造成不容易吹奏出有音階的聲音。
- 管徑越大音頻有越小的趨勢，依實驗結果管徑的建議範圍為 8mm~14mm。

五、探討「管長」不同的笛管，對發聲的影響。

- 笛管長度越長聲音頻率越低，長度越短聲音頻率越高，這是大家已知的事實。
- 大範圍的音頻及管長不是直線關係，但把每 5mm 的管長和頻率的關係當作直線來看，是一種比較簡單能從頻率找出管長的方法。

六、探討「管形」不同的笛管，對發聲的影響。

- 能製作不同管形的笛管，是 3D 列印相較於其他排笛製作最大的優點。
- 管形對音頻及波形沒有太明顯的影響，會影響的是容不容易吹出有音階的聲音，管形較圓滑越容易吹出有音階的聲音。
- 要吹奏出有音階的聲音，建議的波形為：圓心、橢圓形、六角形、愛心形。

七、3D 列印笛管和吸管笛管發聲的比較。

- 相同長度的 3D 列印和吸管製作的笛管平均音頻相差 14.4Hz，約半個音階，這有可能是製作吸管笛管時，管長不容易精準地控制所造成。
- 3D 列印的笛管只要管壁厚度適中，比吸管製作的笛管容易吹奏。

八、撰寫 Scratch 程式，輸入頻率就能顯示所需的管長及建議的管厚、管徑和管形。

- 從製作的成果來看，依據研究五的實驗結果，把5mm的管長和頻率的關係當作直線，以此建立頻率計算管長的公式，所製作出來的笛管其所吹奏出來的音頻和預期的音頻相差不大，代表這公式是可行的。

九、製作一支 3D 列印的排笛。

- 製作的圓形及愛心形排笛中，笛管所吹奏出來的音頻和預期的頻率誤差最大的只有 3.8Hz，音階也都在希望的音階內，代表本研究的 3D 列印排笛製作方式是可行的。

柒、 結論

1. 3D 列印排笛比吸管排笛有以下幾個優點:

- 笛管的長度可以精準地控制。
- 比較容易吹奏。
- 可以製作不同的管形。
- 雖然列印時間較長，但能大量製作而且品質相同。

2. 利用 3D 列印排笛，製作的相關條件建議為:

管形	管壁厚度	管徑
圓形、橢圓形、六角形、愛心形	0.75mm ~ 2 mm	8mm ~ 14mm

聲音頻率和管長的公式為:

$$L(\text{長度}) = L(\text{高頻點}) + (F(\text{高頻點}) - F(\text{輸入的頻率})) \times 5 / (F(\text{高頻點}) - F(\text{低頻點}))。$$

3. 未來發展:

- 建立範圍更大的聲音頻率和 3D 列印笛管管長關係表。

捌、 參考資料

【歷屆科展作品】

蘇 遙、柳奕丞、林沅慶、柳杰希、吳望瑋、張若芯（2010）。排笛排敵。中華民國第 50 屆中小學科學展覽會。

【評語】 082809

本作品利用 3D 列印製作排笛，以 3D 列印精準的控制參數，研究形貌參數對應音律的變化，也提出了如管形等較新穎的研究，問題目標明確，實驗設計也很有系統，管長實驗結果運用在排笛製作，作品有趣且具實用性。

作品簡報

3D列印排笛

組別：國小組

科別：生活與應用科學科(一)

研究摘要及目的

一般國小的自然課堂上都是使用市售的吸管製作排笛的笛管，但如果封口的填充物不對，要吹出有音階的聲音很難，實驗可操控的因素也有侷限性。本專題的構想是利用3D列印機來製作排笛的笛管：

1. 先找出管長、管壁厚度、管徑、管形對聲音輸出的影響。
2. 再和傳統的國小自然課堂使用的市售吸管製作的排笛做比較。
3. 依據實驗的結果利用Scratch寫出一支程式，只要輸入想要製作的音頻，就能計算出3D列印笛管需要的長度及可行的管壁厚度、管徑和管形
4. 最後再利用3D列印出一支有音階規律的排笛，透過它能演奏一首簡單的歌曲。

前期研究

- 研究一：探討不同的3D印列機製作的笛管是否會對輸出的聲音產生影響。
- 研究二：探討笛管底層的厚度是否會對輸出的聲音產生影響。

探討笛管的樣式

- 研究三：探討「管壁厚度」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究四：探討「管徑」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究五：探討「管長」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究六：探討「管形」不同的笛管，對發聲的影響。
- 研究七：3D列印笛管和吸管笛管發聲的比較。

製作成品

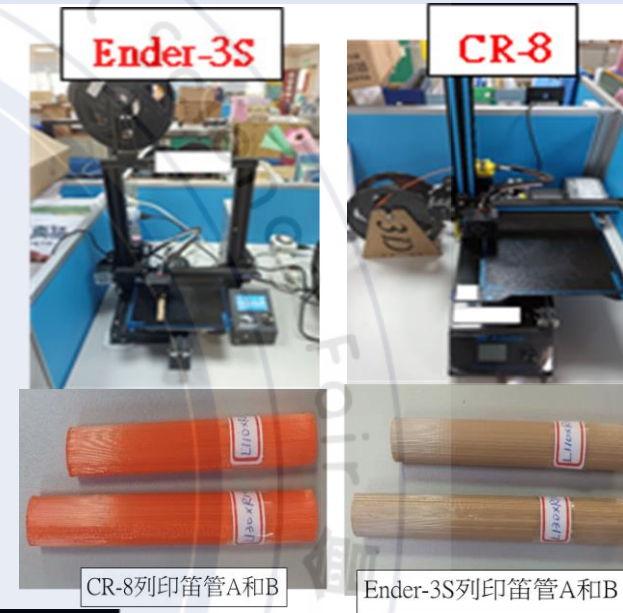
- 研究八：撰寫Scratch程式，輸入頻率就能顯示所需的管長及建議的管厚、管徑和管形。
- 研究九：製作一支3D列印的排笛。

研究一

探討不同的3D列印機製作的笛管是否會對輸出的聲音產生影響

一、實驗方法：

1. 利用線上Tinkercad軟體繪製二個不同規格的笛管分別為：
笛管A：長-110mm, 口徑-10mm, 管厚-1mm
笛管B：長-130mm, 口徑-10mm, 管厚-1mm
2. 二台3D列印機都列印出笛管A及B，共4支笛管。
3. 利用Android手機+實用音頻頻譜分析器APP測量並記錄4支笛管吹出的音頻和波形。

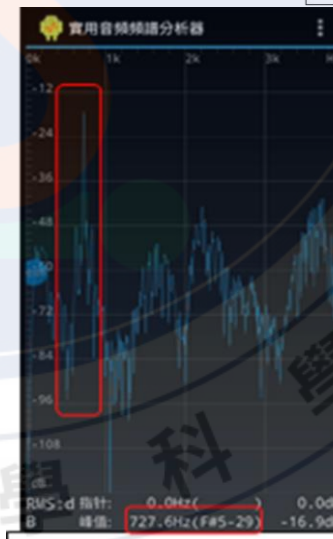


二、實驗結果：

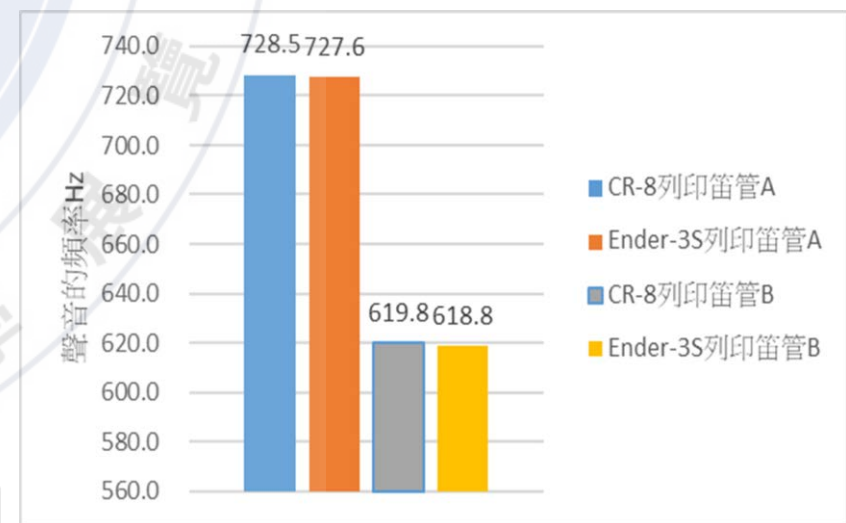
- 依據實驗結果不同型號的3D列印機列印出來的笛管，不會對吹奏出聲音的難易度、音頻及波形產生明顯的影響，所以不同的列印機不會影響笛管列印的再現性。



Ender-3S 列印笛管 A



CR-8 列印笛管 A



研究二

探討笛管底層的厚度是否會對輸出的聲音產生影響

一、實驗方法：

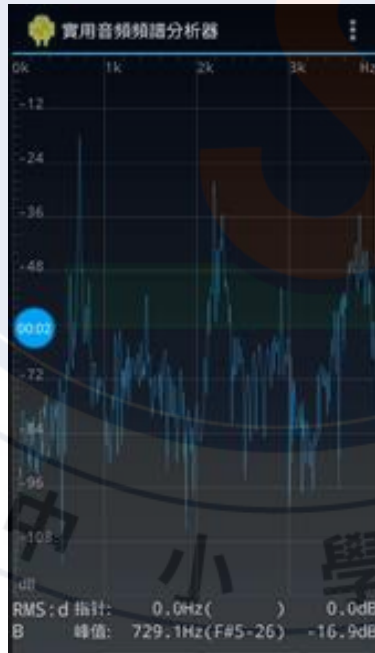
1. 利用線上Tinkercad軟體繪製二個不同規格的笛管分別為：
笛管A → 長:110mm, 口徑:10mm, 管厚:1mm, 管底厚:1mm
笛管B → 長:110mm, 口徑:10mm, 管厚:1mm, 管底厚:5mm
2. 利用Android手機+實用音頻頻譜分析器APP測量並記錄2支笛管吹出的音頻和波形。



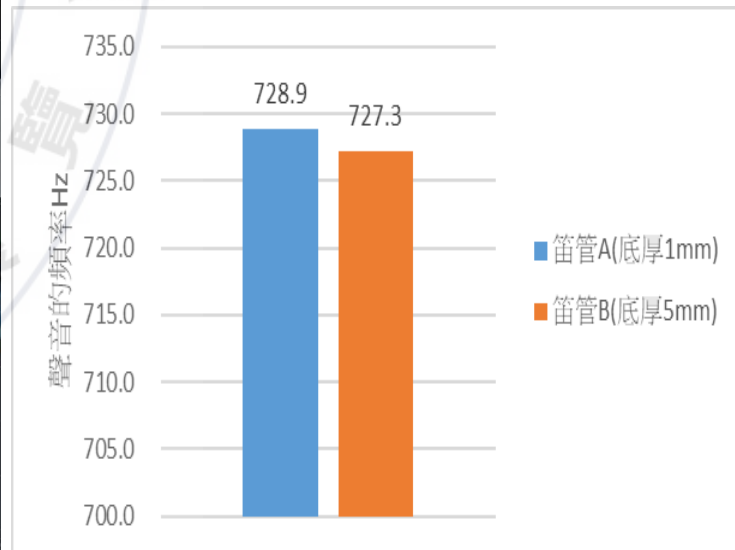
二、實驗結果：

- 由實驗可以發現笛管的底層厚度，不會對吹奏出的聲音產生明顯的影響。
- 因實驗只是想找出相對比較薄的底層厚度進行之後的實驗，因此只進行1mm和5mm的比較。因為要節省材料及列印時間，所以選擇1mm當作後續實驗及排笛的底厚。

笛管A(底厚1mm)



笛管B(底厚5mm)



研究三

探討「管壁厚度」不同的笛管，對發聲的影響

一、實驗方法：

1. 控制的笛管管形、管長及管徑為：

管形	管長	管徑
圓形	110mm	10 mm

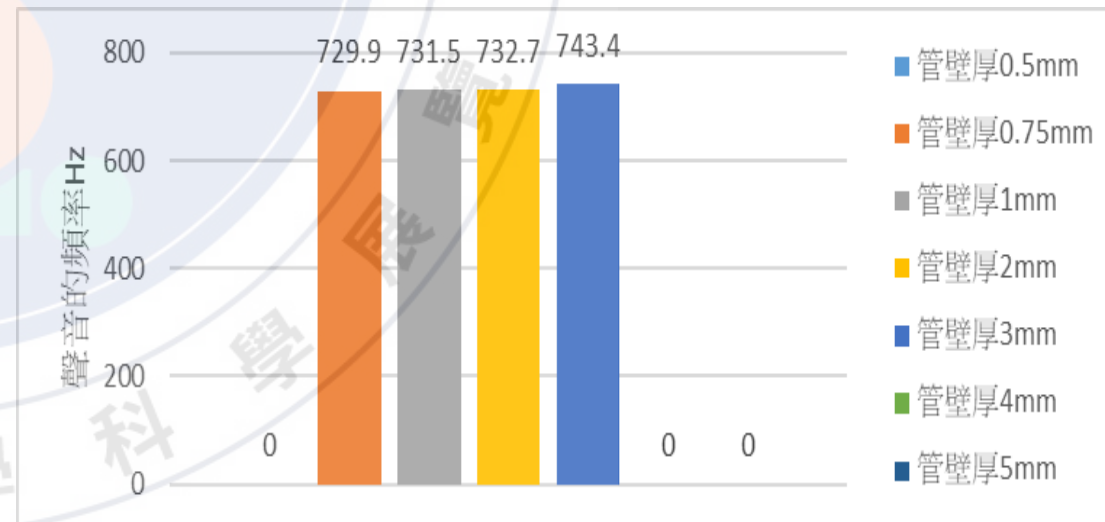
2. 利用Tinkercad繪製不同管壁厚度的笛管3D圖，分別有：
0.5mm、0.75mm、1mm、2mm、3mm、4mm、5mm。

3. 列印笛管及測量並記錄所有笛管吹出的音頻及波形。



二、實驗結果：

- 管壁厚度太薄或太厚都會造成不容易吹奏出有音階的聲音。
- 要吹奏出有音階的聲音，管壁的建議範圍為 0.75mm ~ 2mm。



研究四

探討「管徑」不同的笛管，對發聲的影響

一、實驗方法：

1. 控制的笛管管形、管長及管壁厚度為：

管形	管長	管壁厚度
圓形	110mm	1 mm

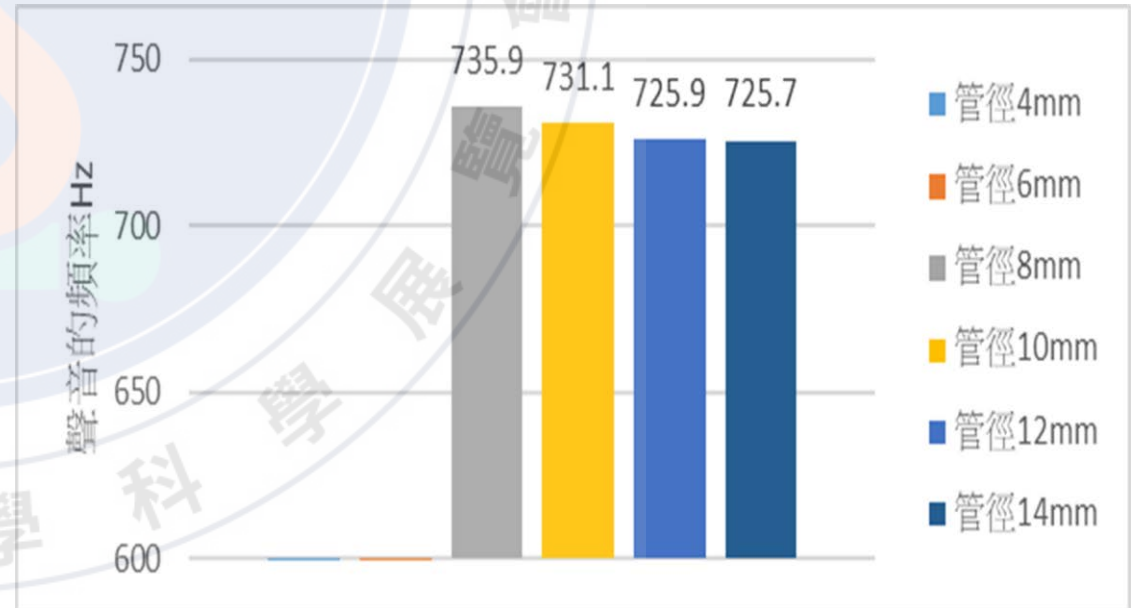
2. 利用Tinkercad繪製不同管徑的笛管3D圖，分別有：
14mm、12mm、10mm、8mm、6mm、4mm。

3. 列印笛管及測量並記錄所有笛管吹出的音頻及波形。



二、實驗結果：

- 管徑太小會造成不容易吹奏出有音階的聲音。
- 管徑越大音頻有越小的趨勢，依實驗結果管徑的建議範圍為8mm~14mm。



研究五

探討「管長」不同的笛管，對發聲的影響

一、實驗方法：

1. 控制的笛管管形、管徑及管壁厚度為：

管形	管徑	管壁厚度
圓形	10mm	1 mm

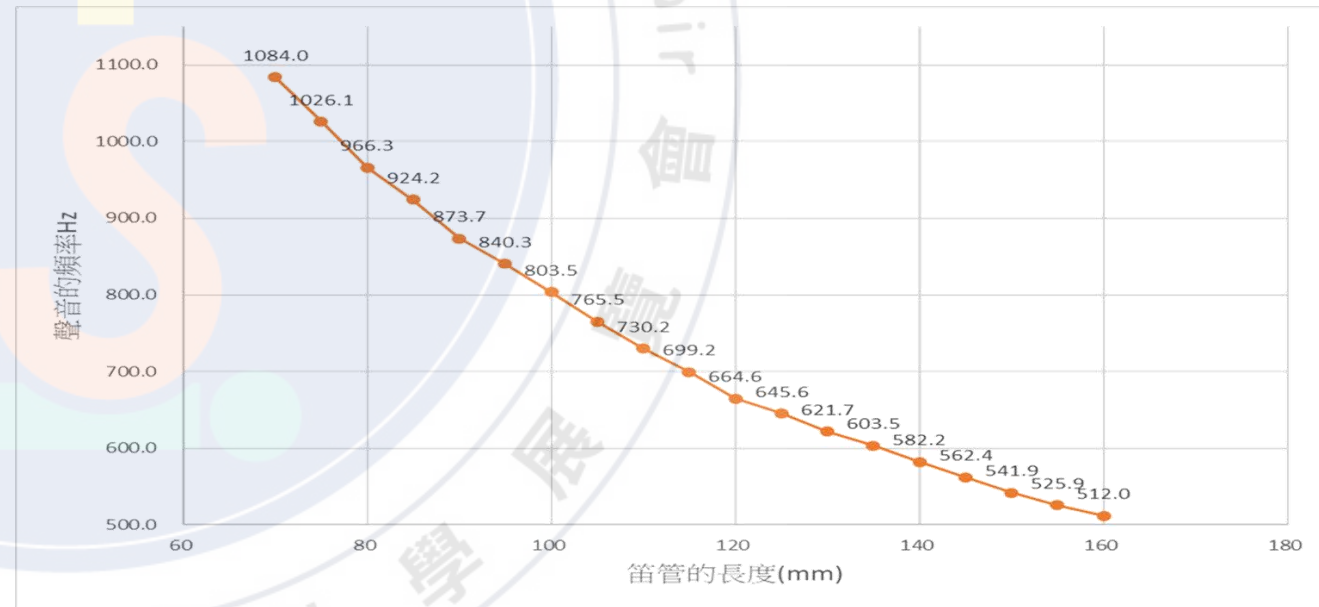
2. 利用Tinkercad繪製不同管長的笛管3D圖，從70mm ~ 160mm，每支間隔5mm。

3. 列印笛管及測量並記錄所有笛管吹出的音頻及波形。



二、實驗結果：

- 笛管長度越長聲音頻率越低，長度越短聲音頻率越高，這是大家已知的事實。
- 大範圍的音頻及管長不是直線關係，但把每5mm的管長和頻率的關係當作直線來看，是一種比較簡單能從頻率找出管長的方法。



頻率計算管長的公式:

$$L(\text{長度}) = L(\text{高頻點}) + (F(\text{高頻點}) - F(\text{輸入的頻率})) \times 5 / (F(\text{高頻點}) - F(\text{低頻點}))$$

研究六

探討「管形」不同的笛管，對發聲的影響

一、實驗方法：

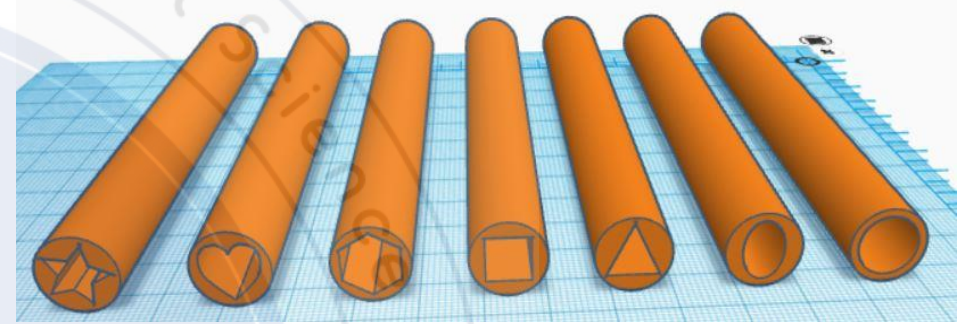
1. 控制的笛管長、管徑及管壁厚度為：

管長	管徑	管壁厚度
110mm	10mm	1 mm

2. 利用Tinkercad繪製不同管形的笛管3D圖，分別有：

圓形、橢圓形、三角形、正方形、六角形、愛心形、星形。

3. 列印笛管及測量並記錄所有笛管吹出的音頻及波形。



二、實驗結果：

- 能製作不同管形的笛管，是3D列印相較於其他排笛製作最大的優點。
- 管形對音頻及波形沒有太明顯的影響，會影響的是容不容易吹出有音階的聲音，管形較圓滑越容易吹出有音階的聲音。
- 要吹奏出有音階的聲音，建議的波形為：圓心、橢圓形、六角形、愛心形。

管形 \ 實驗次數	測量的頻率(單位: Hz)						
	圓形	橢圓形	三角形	正方形	六角形	愛心形	星形
第一次	729.2	727.0	X	X	728.5	725.4	X
第二次	731.1	725.6	X	723.2	725.5	724.1	X
第三次	730.3	726.4	X	728.7	726.2	726.6	707.4
平均	730.2	726.3	X	726.0	725.9	725.4	707.4

研究七

3D列印笛管和吸管笛管發聲的比較

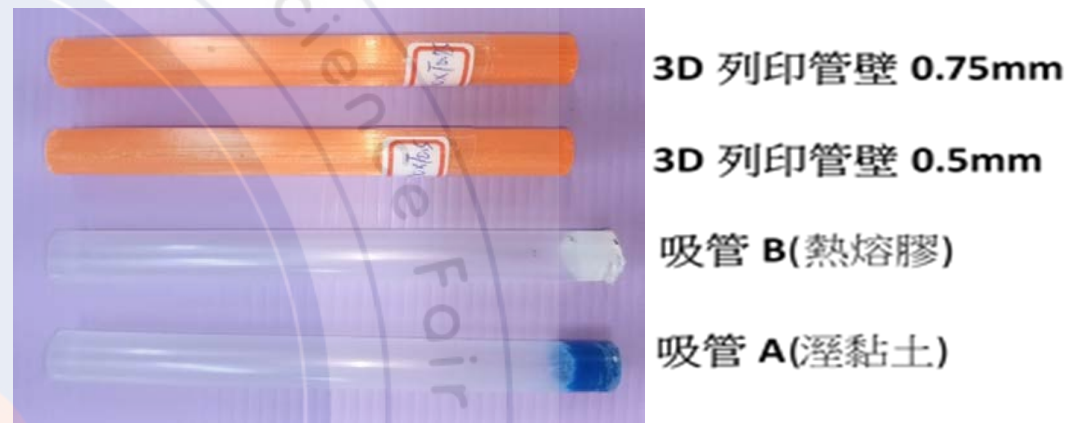
一、實驗方法：

1. 3D列印和吸管製作的笛管管長及管徑皆為：

管長	管徑
110mm	10mm

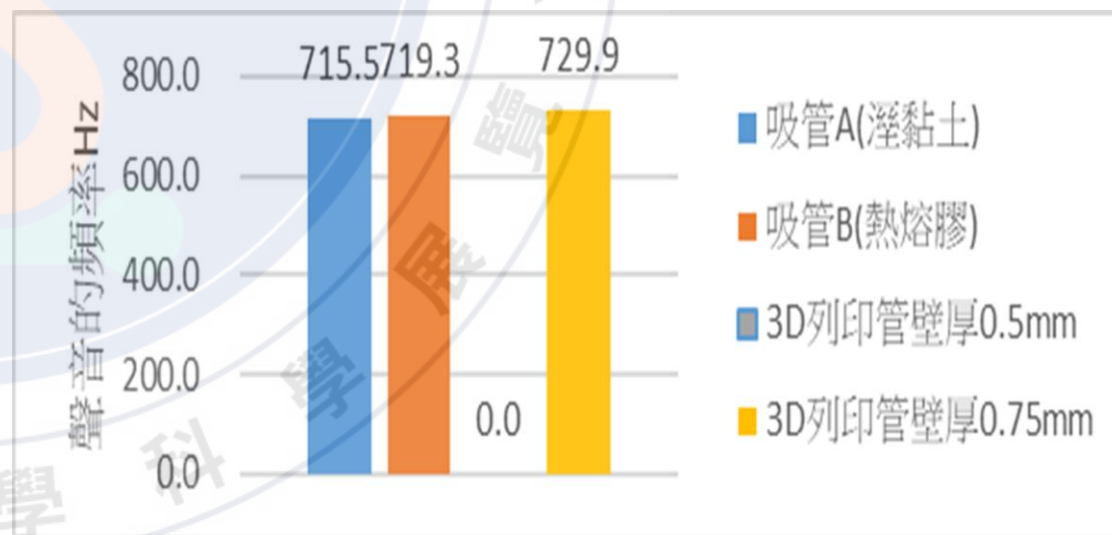
2. 將兩根吸管裁切為120mm，吸管A填充溼黏土約10mm，吸管B填充熱熔膠約10mm。

3. 測量並記錄所有笛管吹出的音頻及波形。



二、實驗結果：

- 相同長度的3D列印和吸管製作的笛管平均音頻相差14.4Hz，約半個音階，這有可能是製作吸管笛管時，管長不容易精準地控制所造成。
- 3D列印的笛管只要管壁厚度適中，比吸管製作的笛管容易吹奏。



研究八

撰寫Scratch程式，輸入頻率就能顯示所需的管長及建議的管厚、管徑和管形

一、製作方式：

1. 利用Scratch撰寫程式，功能為輸入頻率就能顯示3D列印笛管所需要的長度及建議可行的管壁厚度、管徑範圍和管形。
2. 執行程式輸入3組不同的頻率，會獲得3組不同的笛管長度。
3. 繪製3支笛管並列印出來。

二、實驗結果：

- 3組笛管實際吹奏出來的頻率和預期的頻率只相差0.4Hz ~ 1.7Hz。
- 從製作的成果來看，依據研究五的實驗結果，把5mm的管長和頻率的關係當作直線，以此建立頻率計算管長的公式，所製作出來的笛管其所吹奏出來的音頻和預期的音頻相差不大，代表這公式是可行的。

您輸入的聲音頻率為: 音頻 570

管壁厚度範圍: 0.75 ~ 2 mm

管徑範圍: 8 ~ 14 mm

可用管形: 圓形、橢圓形、六角形、愛心形

依據您輸入的音頻計算的管長為:
143.080808

計算

管長(mm)	測量的頻率(單位: Hz)		
	143.1mm	103.1mm	78.9mm
實驗次數			
第一次	571.8	779.3	981.5
第二次	569.5	781.5	982.3
第三次	569.9	782.1	981.3
平均	570.4	781.0	981.7
預期的頻率	570.0	780.0	980.0
相差	0.4	1.0	1.7

研究九

製作一支3D列印的排笛

一、製作方式：

1. 依據音階頻率對照表，透過研究八的程式計算頻率9個音階所需的3D列印笛管長度。

音階	B4	C5	D5	E5	F5	G5	A5	B5	C6
頻率(Hz)	494	523	583	659	698	784	880	988	1047
計算的管長(mm)	166.5	156.1	138.9	121.5	115.2	102.6	89.4	78.2	73.2



2. 透過Tinkercad繪製排笛並列印出來。

二、實驗結果：

- 製作的圓形及愛心形排笛中，笛管所吹奏出來的音頻和預期的頻率誤差最大的只有3.8Hz，音階也都在希望的音階內，代表本研究的3D列印排笛製作方式是可行的。

「圓形排笛」的笛管實際吹奏出來的頻率和預期的頻率比較表

管長 (mm)	測量的頻率(單位: Hz)								
	166.5	156.1	138.9	121.5	115.2	102.6	89.4	78.2	73.2
實驗次數									
第一次	493.3	521.7	585.7	661.4	700.2	782.1	883.9	982.5	1051.4
第二次	492.4	522.9	584.5	658.1	698.5	782.6	881.2	987.1	1048.9
第三次	493.1	523.7	585.6	657.8	700.5	781.7	882.7	985.5	1050.3
平均	492.9	522.8	585.3	660.3	699.7	782.1	882.6	985.0	1050.2
預期的音階	Si (B)	Do (C)	Re (D)	Mi (E)	Fa (F)	So (G)	La (A)	Si (B)	Do (C)
預期的頻率	494	523	587	659	698	784	880	988	1047
相差	-1.1	-0.2	-1.7	1.3	1.7	-1.9	2.6	-3.0	3.2

「愛心形排笛」的笛管實際吹奏出來的頻率和預期的頻率比較表

管長 (mm)	測量的頻率(單位: Hz)								
	166.5	156.1	138.9	121.5	115.2	102.6	89.4	78.2	73.2
實驗次數									
第一次	491.8	524.7	584.8	660.6	697.7	782.6	883.9	992.2	1049.4
第二次	491.2	525.2	585.3	662.7	699.7	783.9	884.2	990.4	1050.7
第三次	490.6	526.3	584.4	659.5	700.2	782.2	883.3	991.9	1049.8
平均	491.2	525.4	584.8	660.3	699.2	782.9	883.8	991.5	1050.0
預期的音階	Si (B)	Do (C)	Re (D)	Mi (E)	Fa (F)	So (G)	La (A)	Si (B)	Do (C)
預期的頻率	494	523	587	659	698	784	880	988	1047
相差	-2.8	2.4	-2.2	1.3	1.2	-1.1	3.8	3.5	3.0

結論

1. 3D列印排笛相較吸管排笛有以下幾個優點:

- (1) 笛管的長度可以精準地控制。
- (2) 比較容易吹奏。
- (3) 可以製作不同的管形。
- (4) 但能大量製作而且品質相同。

2. 利用3D列印機來製作排笛，製作的相關條件建議為:

管形	管壁厚度	管徑
圓形、橢圓形、六角形、愛心形	0.75mm ~ 2 mm	8mm ~ 14mm

聲音頻率和管長的公式為:

$$L(\text{長度}) = L(\text{高頻點}) + (F(\text{高頻點}) - F(\text{輸入的頻率})) \times 5 / (F(\text{高頻點}) - F(\text{低頻點}))。$$

3. 未來發展:建立範圍更大的聲音頻率和3D列印笛管管長關係表。

參考資料

- ◆ 【歷屆科展作品】蘇遙、柳奕丞、林沅慶、柳杰希、吳望瑋、張若芯（2010）。排笛排敵。中華民國第50屆中小學科學展覽會。