

中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

030102

管中冷暖，一壓即知~利用 3D 列印技術探討渦
流管之原理

學校名稱：高雄市立陽明國民中學

作者： 國二 蔡文愷 國二 辛秉宸 國二 陳群	指導老師： 柯瑞龍 柯翠菱
--	-----------------------------

關鍵詞：渦流管、溫度、冷熱端

摘要

本次研究利用 3D 列印技術製作渦流管裝置，以利於變因之改變。透過數位式溫度計及氣壓計，可以即時截取數據，並互相比較。實驗中我們發現，當渦流產生室達到一定的氣壓時，就可以產生冷熱氣流分離的效果，而為了讓渦流產生的效果更好，氣流入射角度大約在 45~60 度間有較好的效果，渦流管的內徑在 6~8mm 間，長度在 12~14cm 時較好。當我們將測到的數據進行理論的分析後發現，熱端的縫隙越小，熱端發熱的效果更好，這也可以讓冷端的冷卻效果增加。最後探討數據與理論間的誤差值後發現，氣體受到絕熱膨脹的影響而降溫，使計算出的數據和實驗值產生誤差的主要原因。

壹、動機

由於近幾年夏天愈來愈熱，熱的受不了的我們上網查了一些關於降溫方法的資料，意外發現了渦流管這個東西竟然能不用電就產生冷空氣，這瞬間就勾起了我們的興趣，在經過簡單的搜尋後，我們也發現渦流管的許多用法。正因如此，我們也決定更加深入地探討這神奇的器具：渦流管之性質。

貳、目的

- 一、如何測試所需數據。
- 二、市售渦流管的性質。
- 三、如何自製渦流管。
- 四、初始壓力對渦流管溫差之影響。
- 五、渦流管氣流對溫差之影響。
- 六、尺寸大小對實驗之影響。
- 七、冷熱端大小對溫差之影響。

參、器材

- 一、使用軟體：
 - (一)3D 製圖軟體：123D Design
 - (二)數據分析軟體：Vernier Graphical Analysis

二、器材

空壓機	鑽孔機	探針溫度計 2 支	氣壓計
			
筆電	3D 列印機	線鋸機	游標尺
			

肆、原理及相關文獻

一、渦流管(Vortex tube)：

(一) 由來

又名“Maxwell 的惡魔”、“Ranque - Hilsch 管”、“Hilsch 管”或“Ranque 管”。不論它是什麼名字稱呼，近年來，僅用壓縮空氣為動力源的渦流式冷卻器，已經被肯定、接受。它是解決工業上，不同冷卻問題的良方，既簡單又低成本，頗符合中小企業運用。早在 19 世紀時，一位大物理學家 James Clerk Maxwell 就曾提出一個與渦流管有關的理論假設。他指出，既然熱能的產生牽涉到分子的流動，也許有一天，在一個“友善的小惡魔”（渦流管）的幫助下，可將氣體中的冷、熱分子分離出來，我們就可以在一件工具上，同時獲得冷、熱氣流的運用。

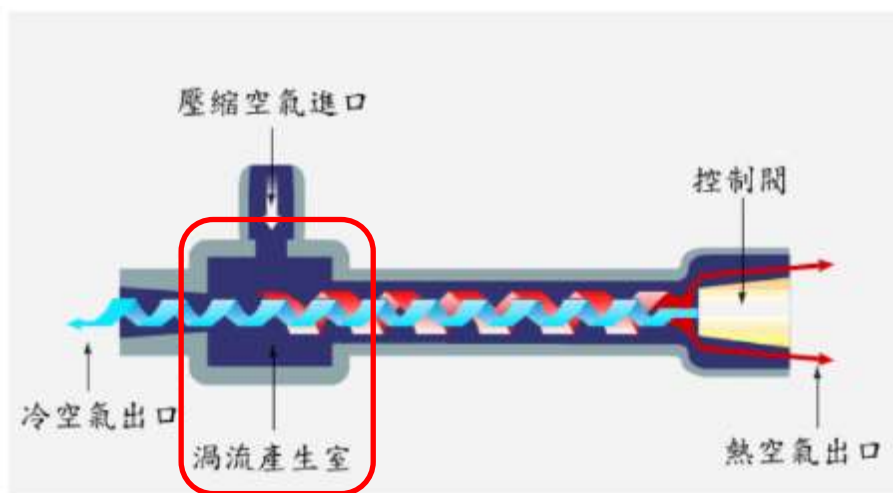
渦流管的發明就是“Maxwell 友善的小惡魔”真實的例証。不過它的發明，卻是法國物理學者 George Ranque 在 1928 年一次實驗中偶然間的產物。當時，他正在試驗一具他所研發出來的渦流式幫浦。他注意到，幫浦中的熱空氣會從其中的一端散發出去，而冷空氣則會從另一端散發出來。這促使 Ranque 有了發明這種冷、熱空氣，會從不同的兩端分別散發出

來，奇怪工具的念頭。很快的，他放棄了那具渦流幫浦的繼續研發，並且成立了一間小工廠來試探渦流管的商業潛能。

Ranque 的努力很不幸的迅即失敗了！這也使得渦流管的真正問世延後到 1945 年，德國物理學家 Rudolph Hilsch 發表了一篇受人矚目，有關渦流管的科學報告。此後，歷經理論和實用上的演變，渦流管遂逐漸成為工業用具而為人所接受。

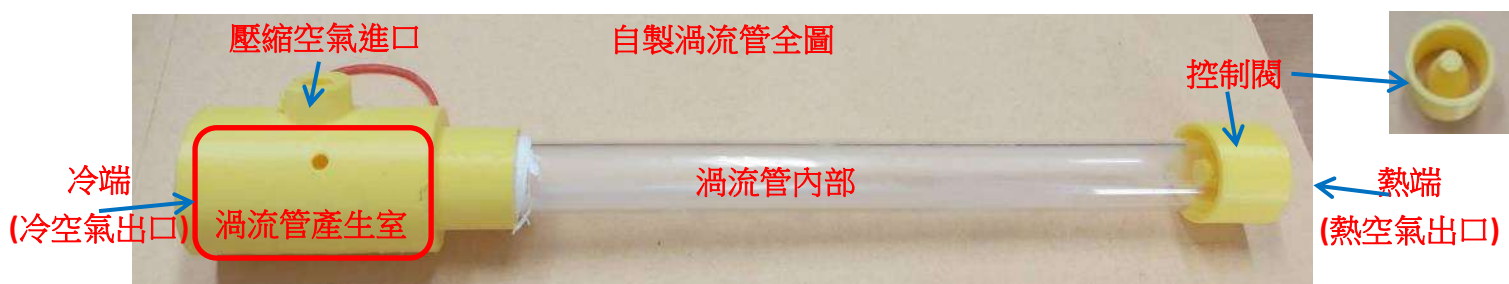
(二) 作用原理

為動力源的壓縮空氣，以音速注入渦流管中。這時，被注入的壓縮空氣，將在渦流產生室中，以每分鐘至少一百萬轉的旋轉轉速產生渦流。其中，部份的氣流將被迫向內旋轉，通過管中央的氣孔，流向管中有氣閥調控的較長部份。而該氣閥則會將流向它的渦流，反轉向其自身內部旋轉。此時，在內部流動的渦流就會將本身的熱量，向在外部流動的渦流釋放，並通過有氣閥的較長端，將熱氣散發出去。而釋放熱量後變冷的冷氣渦流，則會被引導至另一端散發出來。這就是渦流管作用原理的簡單說明。如下圖所示，因為管中有內建氣閥調控，所以渦流管的溫度及氣流量，可以完全透過渦流管一端的控制閥調節。



資料來源：機耐科技有限公司網頁(https://www.g9corp.com.tw/content.asp?article_id=39)

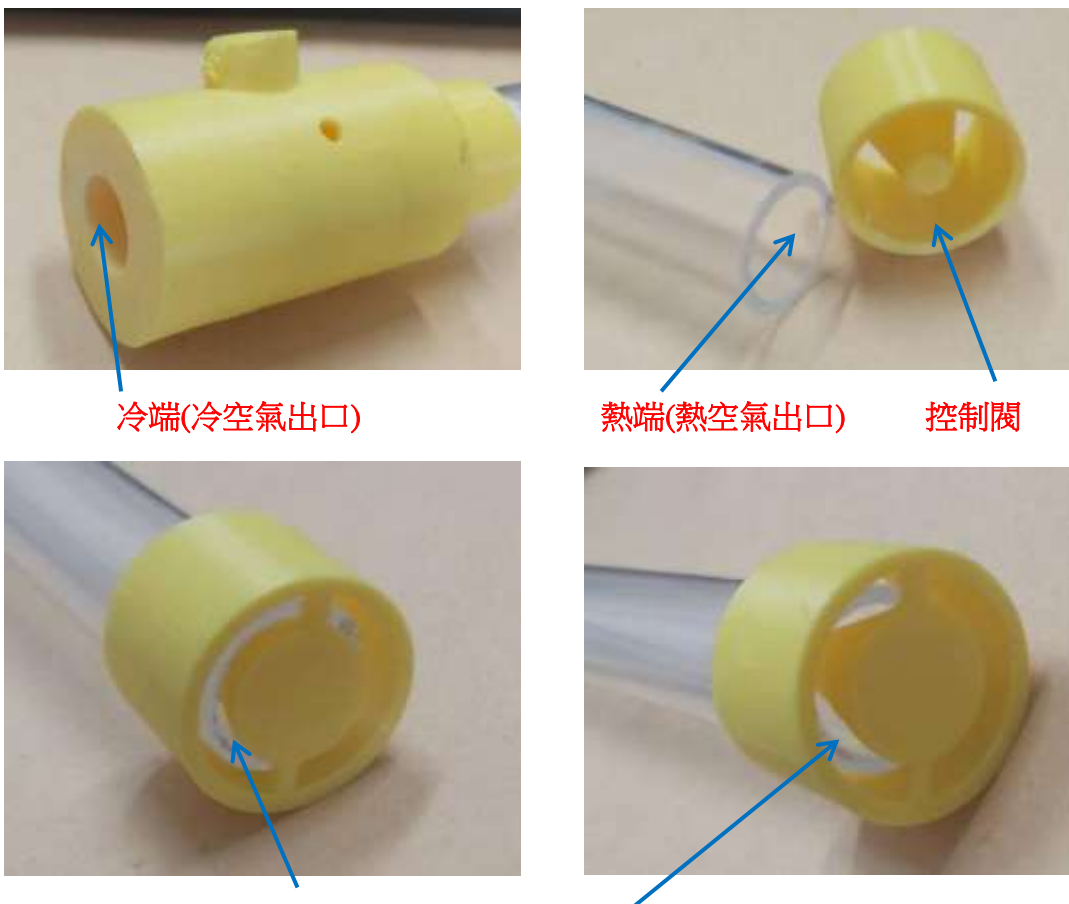
自製模型說明：為了方便解說，我們將渦流管分為冷端、熱端、渦流產生室及控制閥。



渦流產生室之說明如下圖：



冷熱端空氣出口之說明如下圖：



調整控制閥與熱端之位置就可以控制熱空氣出口之縫隙大小。

二、分子平均動能：

1. 由 $\begin{cases} \text{巨觀的理想氣體狀態方程式：} PV = NkT \\ \text{微觀的氣體分子運動論：} P = \frac{1}{3} m v_{\text{rms}}^2 \left(\frac{N}{V}\right) \end{cases} \xrightarrow{\text{推得}} \boxed{\bar{E}_k = \frac{1}{2} m v_{\text{rms}}^2 = \frac{3}{2} kT}$

《推導》：由 $P = \frac{1}{3} m \cdot v_{\text{rms}}^2 \cdot \left(\frac{N}{V}\right) \xrightarrow{\bar{E}_k = \frac{1}{2} m v_{\text{rms}}^2} P = \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} m \cdot v_{\text{rms}}^2\right) \cdot \frac{N}{V}$

$$\Rightarrow \bar{E}_k = \frac{3PV}{2N}$$

$$\text{又 } PV = NkT \xrightarrow{\text{代入上式}} \bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$$

2. 分子平均動能的物理意義：

由 $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \propto T$ ，溫度實為物體組成分子的「平均動能」大小的測量，同時亦反映分子運動的激烈程度。

3. N 個分子的總移動動能為
$$(E_k)_T = N\bar{E}_k = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT = \frac{3}{2} PV = N \cdot \frac{1}{2} m v_{\text{rms}}^2$$

4. 若密閉容器內氣體的體積固定，氣體吸熱，其總動能（內能）增加 $\Delta (E_k)_T$ ，溫度上升 ΔT 。

$$H = \Delta (E_k)_T = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot \Delta T \quad (V = \text{const.})$$

5. 混合後末溫度 (T_f):
$$N_1 \cdot \left(\frac{3}{2} kT_1\right) + N_2 \cdot \left(\frac{3}{2} kT_2\right) = (N_1 + N_2) \cdot \left(\frac{3}{2} kT_f\right)$$

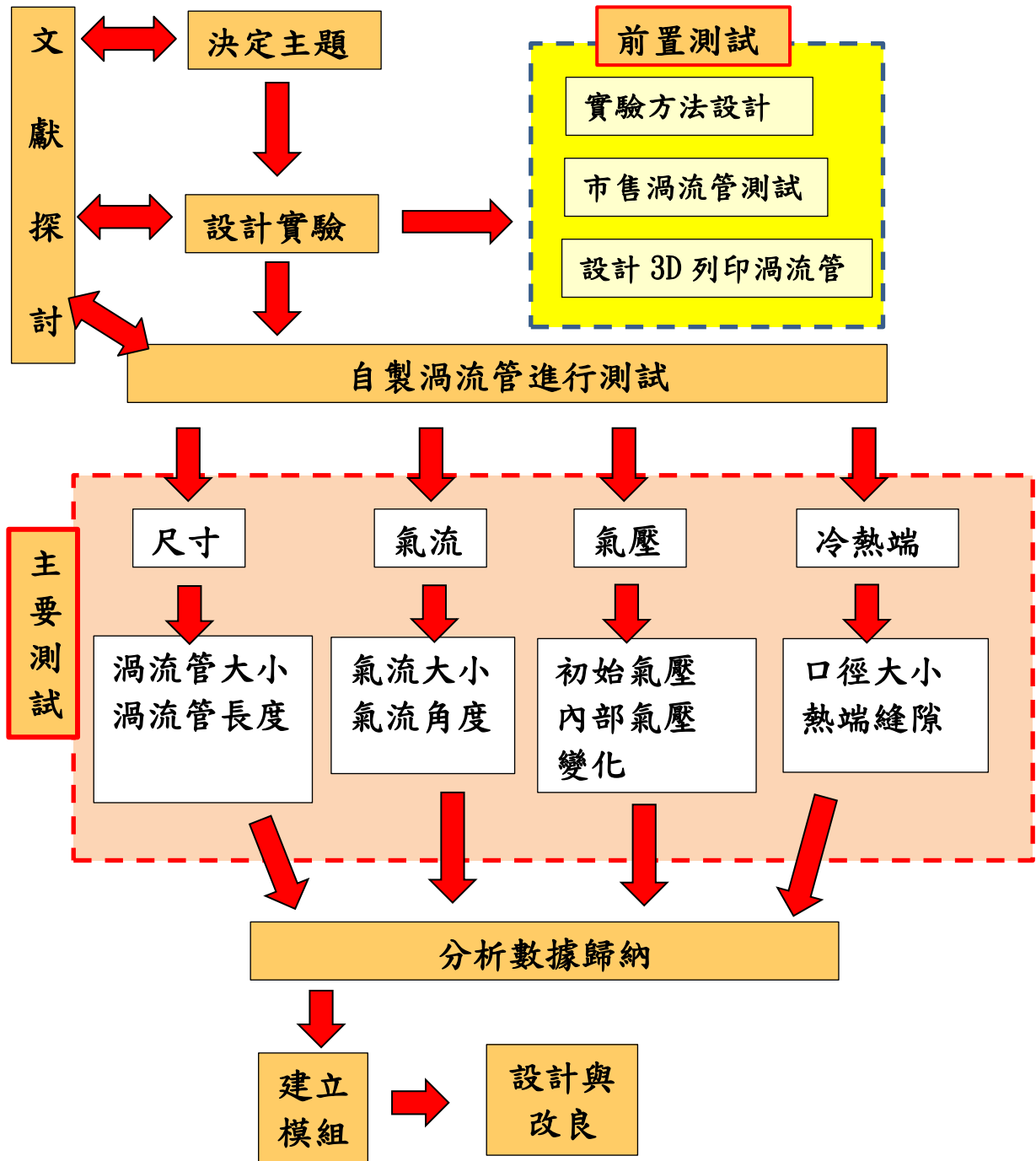
三、絕熱壓縮與絕熱膨脹：

絕熱壓縮與絕熱膨脹通常由氣體壓力的變化引起。絕熱壓縮發生在氣壓上升時，這時氣體溫度也會上升。例如，給自行車打氣時，可以感覺到氣筒溫度上升，這是因為氣體將壓縮其所作的功轉換成自身的內能，因而溫度上升。柴油機在壓縮衝程時正是靠絕熱壓縮原理來給燃燒室內的混合氣體點火的。

絕熱膨脹發生在氣壓下降時，這時氣體溫度也會下降。例如，給輪胎放氣時，可以明顯感覺到放出的氣體比較涼，這是因為氣體從輪胎的充氣孔出來時，先被小洞壓縮後瞬間膨脹的緣故，氣體為了膨脹，因此將周遭空氣「撐開」，過程中需要作功，消耗了自身內能，使溫度下降。

伍、研究過程、結果及討論

流程圖



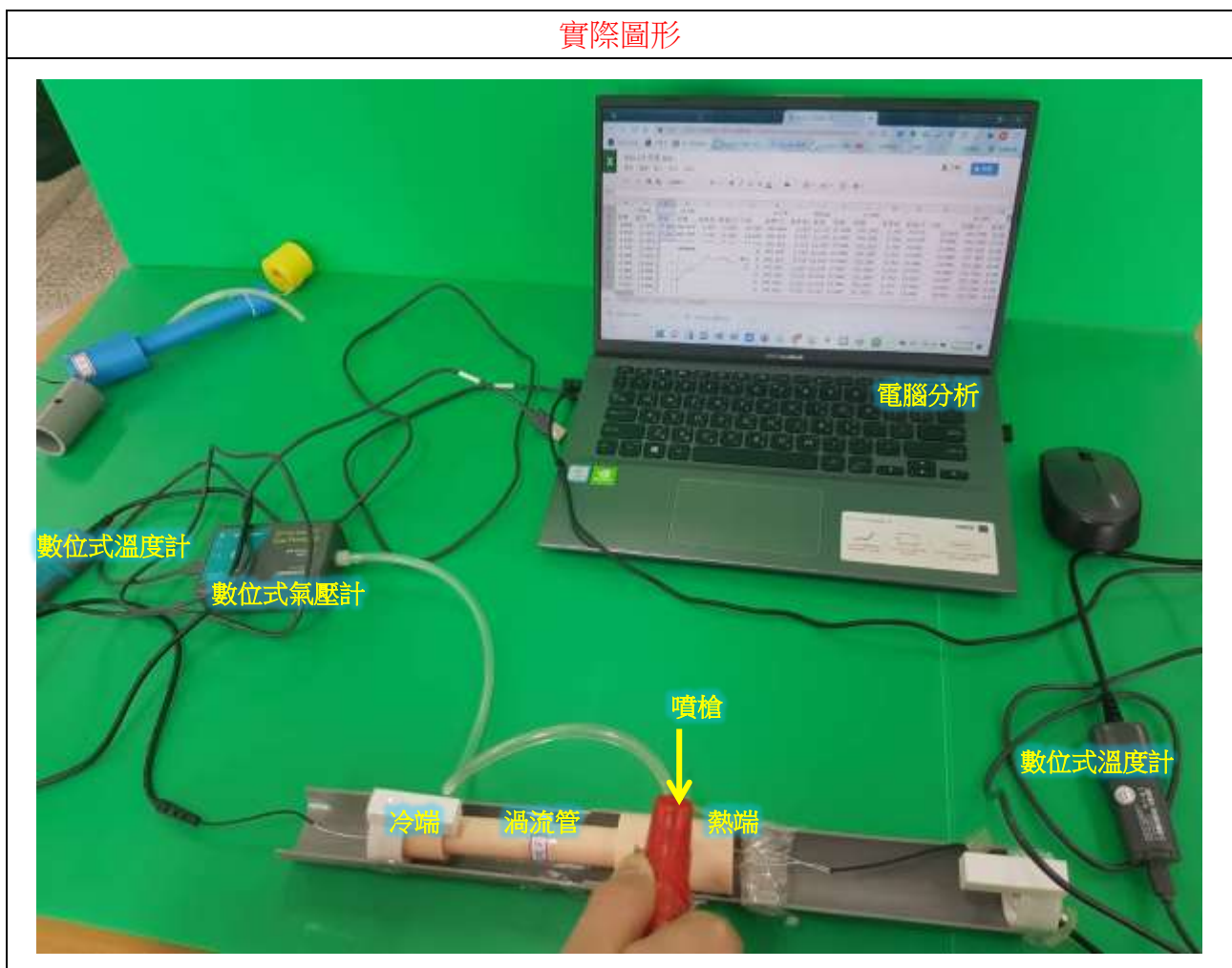
研究一、如何測試所需數據

探討 1、如何測試溫度及內部氣壓

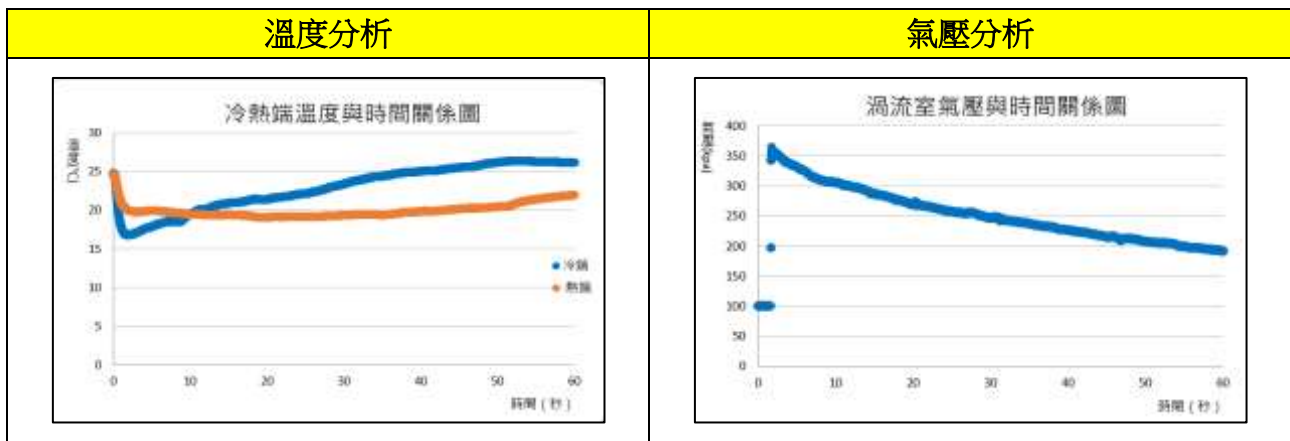
(一)目的：使用溫度感應器測試溫度

(二)步驟：1. 將溫度感應器及氣壓感應器連接電腦。
2. 打開測試軟體進行溫度測試

(三)結果：1. 裝置圖如下



2. 圖形分析



(四)討論：

1. 透過溫度感應器及氣壓感應器可以即時擷取溫度及氣壓數據，並記錄與時間之關係。
2. 此測試方式可以讓我們即時掌握溫度及氣壓變化，並了解其因果關係。

探討 2、渦流管內部氣流特性為何

(一)目的：了解渦流管內部氣流特性

- (二)步驟：
1. 將爽身粉置入透明渦流管，並將高壓氣體打入透明渦流管。
 2. 觀察內部氣流狀況並用攝影機記錄。

(三)結果：1. 氣流流動如下



(四)討論：

1. 透過此實驗結果，我們發現渦流管內部的氣流會在內部以螺旋的方式移動，主要是壓縮空氣是以斜切方式進入而導致的結果。
2. 此結果與文獻上一致，但仍有許多細部的原理要探討，因此我們繼續下面的研究。

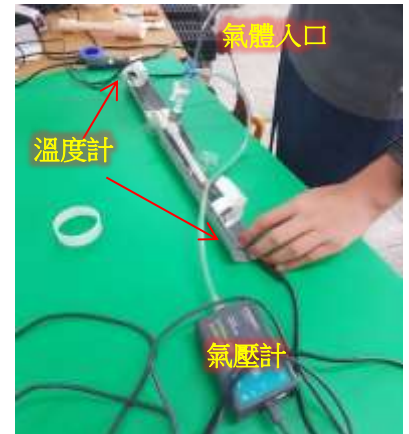
研究二、市售渦流管的性質

探討 1、空壓機容積大小對冷熱端溫度的影響

(一)目的：測試市售渦流管的溫度及氣壓關係

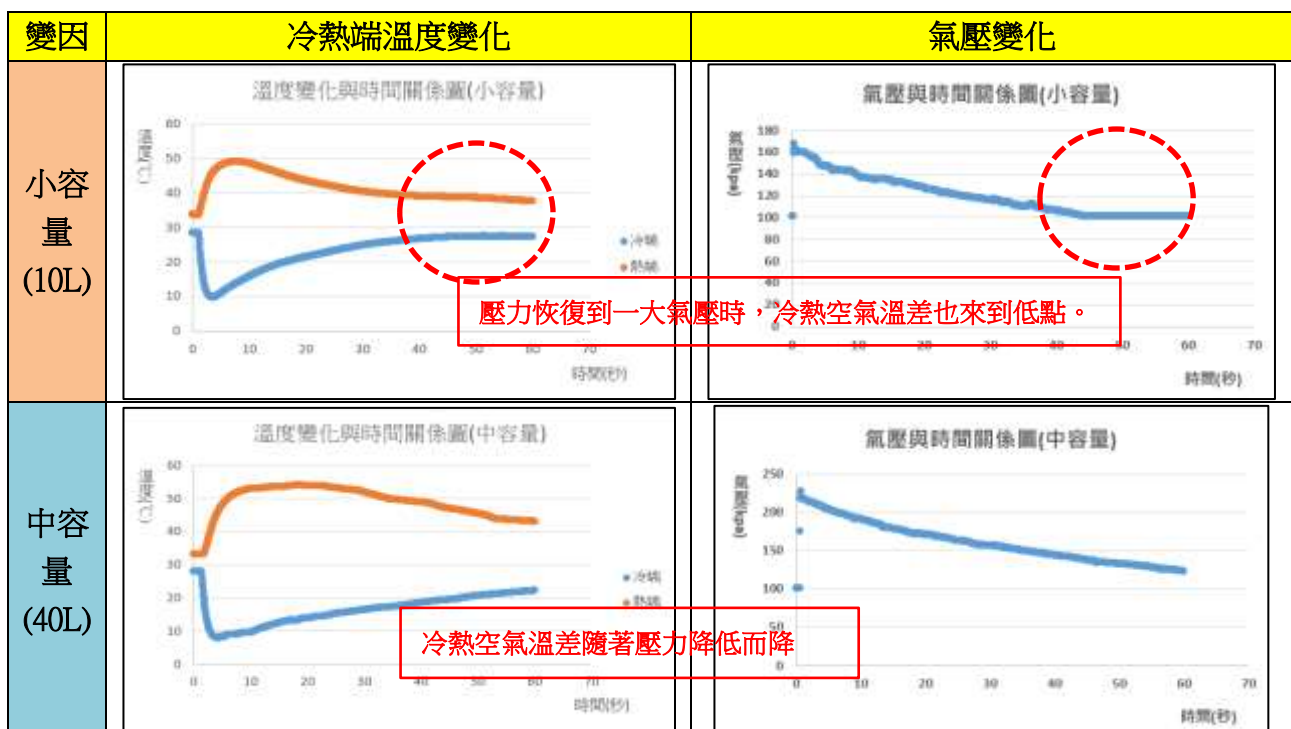
(二)步驟：

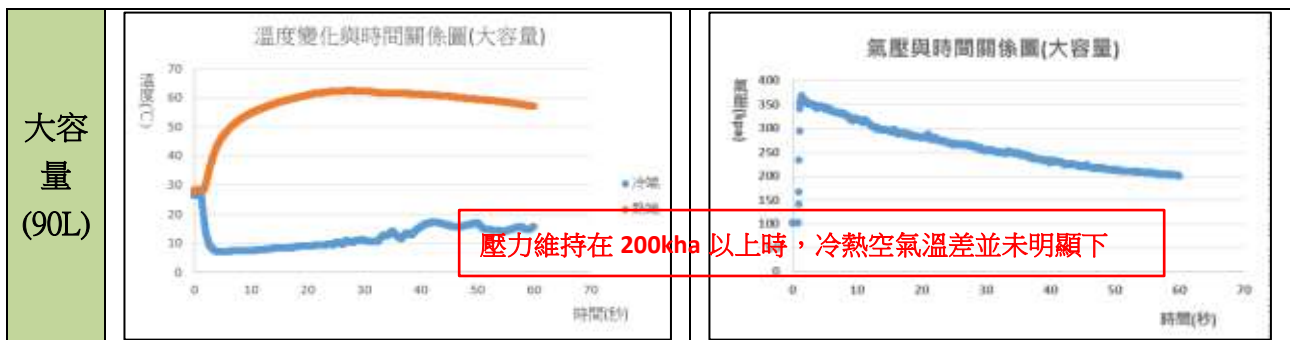
1. 將市售渦流管連接空壓機及數據測量裝置如圖。
2. 打開小容量(10L)空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
3. 將氣體打入市售渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變空壓機容量，重複步驟 2~4。



小容量(小空壓機)	中容量(大空壓機)	大容量(大空壓機+儲氣槽)

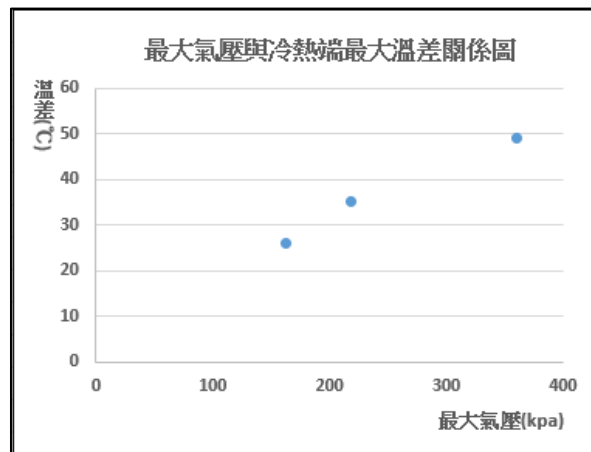
(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係





2. 數據整理

變因 \ 容量	10L	40L	90L
高低溫差(°C)	29.5	35.11	49.02
渦流管內部最大氣壓(kpa)	162.4	218.9	359.9



(四)討論：

1. 由實驗結果得知，加大渦流管內部的壓力久，有助於冷熱空氣分離，且壓力越大溫度也越大，但因數據量還不夠無法推論其關係。
2. 若空壓機容量過小，無法長時間高壓，冷熱空氣分離只有一開始啟動時出現，當壓力降下來時，冷熱溫差就會快速變小。
3. 由中容量的空壓機可以明顯地看到冷熱溫差隨著壓力下降緩慢下降的趨勢。
4. 壓力的大小是啟動冷熱空氣分離的因素之一，除了壓力之外，另外是否存在其他未知的變因也會影響冷熱空氣的分離呢？為了瞭解背後的原因，我們開始了以下的研究。

研究三、如何自製渦流管

探討 1、水管式渦流管的製作方式

(一)目的：製作渦流管

(二)步驟：製作流程如下



用線鋸機將水管切成合適的長度。



用電鑽鑽取所需小孔。



將水管組合並用 AB 膠固定。



靜置使 AB 膠完全固化。

(三)結果：製作出的渦流管如上圖。

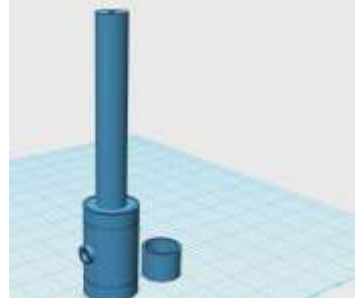


(四)討論：

1. 用製作方式受限於市售水管尺寸，且過程中包含許多人為操作部分，變因不易控制。
2. 為了找尋更佳的方式，我們求助老師，發現學校有一台 3D 列印機，於是我們開始嘗試使用 3D 列印的技術製作渦流管。

探討 2、3D 列印渦流管的製作方式

(一)目的：利用 3D 列印製作渦流管

(二) 步驟：製作流程如下

		
用 3D 列印軟體建模。	使用 3D 列印機列印模型。	列印完成。

(三)結果：製作出的渦流管如上圖。

(四)討論：1. 用此方式製作可任意改變渦流管之形狀與細微之變因，可以讓我們更加容易了解影響渦流管作用之原理。

研究四、初始壓力對自製渦流管溫差之影響

探討 1、初始壓力對渦流管溫差的影響

(一)目的：測試不同初始壓力對渦流管溫差的影響

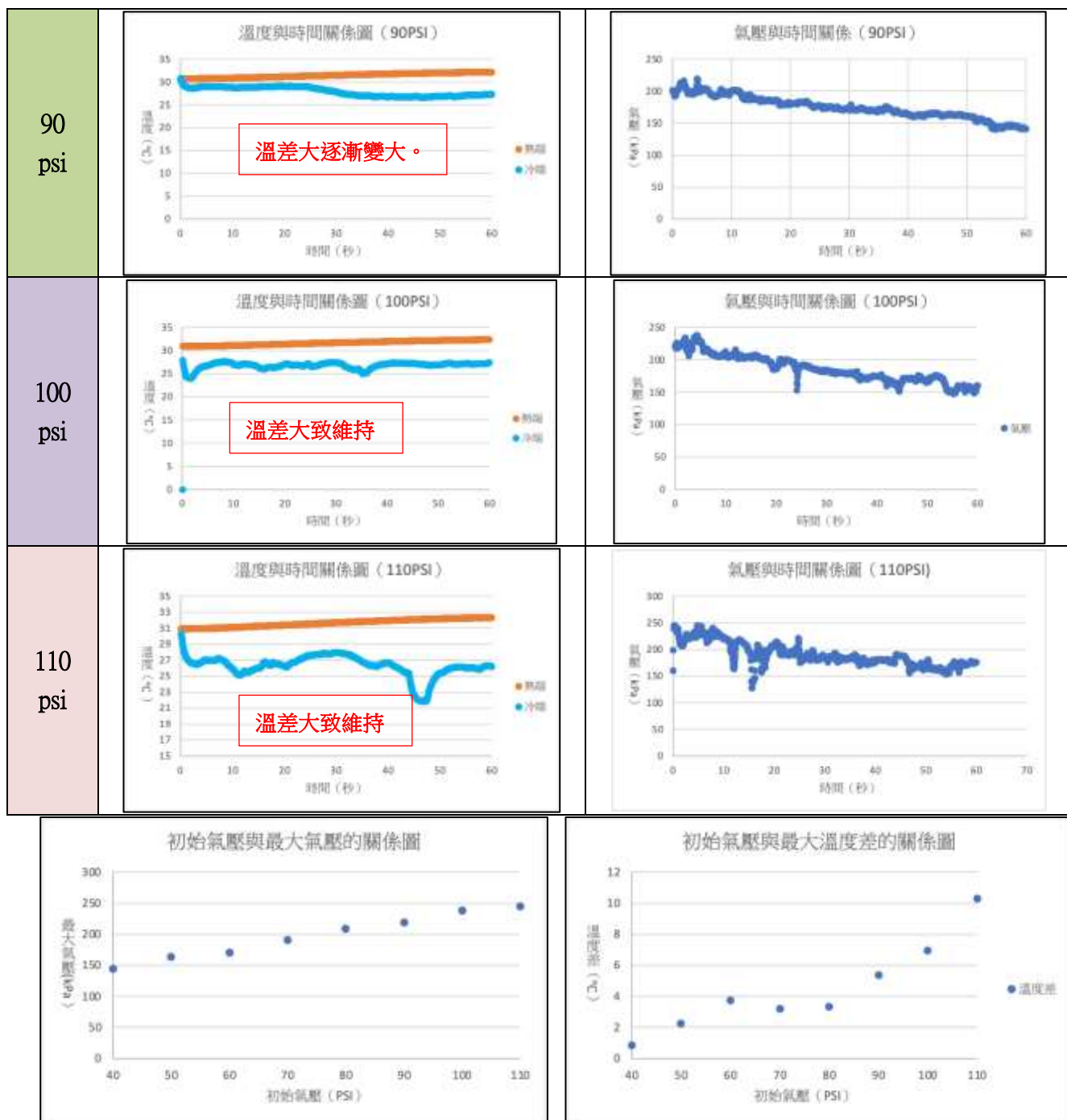
(二)步驟：

1. 將渦流管連接空壓機及數據測量裝置。
2. 打開空壓機開關，並將氣壓充至 40psi。
3. 將氣體打入渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變初始壓力為 50psi、60psi、70psi、80psi、90psi、100psi 及 110psi，重複步驟 2~4。



(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係

初始值	冷熱端溫度變化	氣壓變化
40 psi	<p>冷熱端溫度與時間關係圖 (40PSI)</p>	<p>氣壓與時間關係圖 (40PSI)</p>
50 psi	<p>冷熱端溫度與時間關係圖 (50PSI)</p>	<p>氣壓與時間關係圖 (50PSI)</p>
60 psi	<p>溫度與時間關係圖 (60PSI)</p>	<p>氣壓與時間關係圖 (60PSI)</p>
70 psi	<p>溫度與時間關係圖 (70PSI)</p>	<p>氣壓與時間關係圖 (70PSI)</p>
80 psi	<p>溫度與時間關係圖 (80PSI)</p> <p>一開始溫差大，後來就恢復。</p>	<p>氣壓與時間關係圖 (80PSI)</p>



2. 數據整理

變因 \ 初始氣壓(psi)	40	50	60	70	80	90	100	110
高低溫差(°C)	0.86	2.25	3.73	3.20	3.32	5.35	6.94	10.30
最大氣壓(kpa)	144.9	164.1	170.0	191.0	208.7	218.9	237.9	245.5

(四)討論：

- 由以上數據資料顯示，渦流管內部的最大壓力，與空壓機的初始壓力呈現正向的關係，當空壓機初始壓力越大，渦流管可以達到的最大壓力也越大。
- 由氣壓與溫差的關係可以知道，當空壓機初始壓力小於 80psi 時，最大溫差並無明顯的

變化，且只有一開始拉開溫差，後來溫差又迅速變小。

- 3.當空壓機初始氣壓大於 90psi 時，溫差就有明顯的變化。雖然渦流管內部的氣壓逐漸變小，但是溫差並無變小，而是能大致維持一定的溫差。可能原因是，渦流的產生需要較大的壓力，才能形成，但形成後只要可以維持一定的高壓，就可以讓渦流持續產生，因此溫差也可以大致維持。

研究五、氣流對自製渦流管溫差之影響

探討 1、氣流大小對渦流管溫差的影響

(一)目的：測試氣流大小對渦流管溫差的影響

(二)步驟：

1. 將自製渦流管連接空壓機及數據測量裝置。
2. 打開大容量空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
3. 將空壓機噴嘴開關微壓，再將氣體打入市售渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變空壓機噴嘴開關為半壓、全壓，重複步驟 2~4。

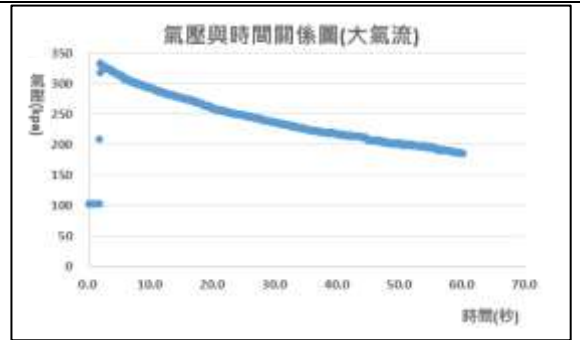
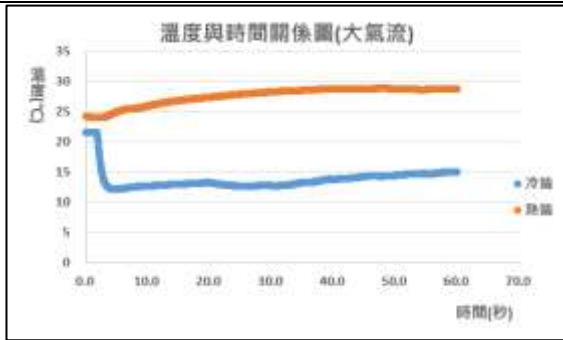


利用不同口徑的水管，控制噴槍按壓幅度的大小。

(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係

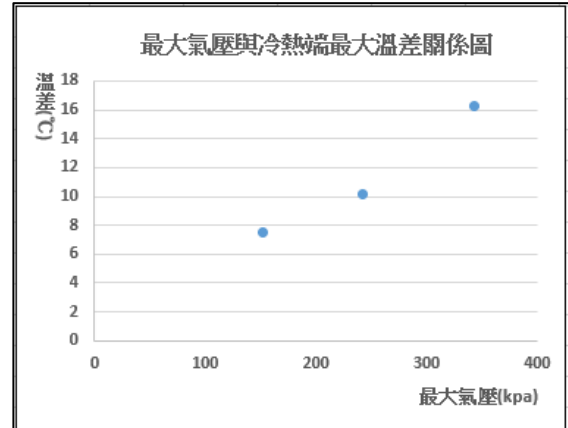
變因	冷熱端溫度變化	氣壓變化
小氣流	<p>溫度變化與時間關係圖(小氣流)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(小氣流)</p>
中氣流	<p>溫度變化與時間關係圖(中氣流)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(中氣流)</p>

大氣流



2. 數據整理

變因 \ 氣流	小	中	大
高低溫差(°C)	7.5	10.2	16.3
渦流管內 最大氣壓(kpa)	151.3	241.6	342.5



(四)討論：

- 由上述實驗結果發現，氣流的大小會影響到渦流產生室的氣壓大小，氣壓不足時，不利於冷熱空氣分離的維持。若要維持，則需要以大氣流維持高壓。
- 以上算是初步了解冷熱空氣分離的條件，根據文獻的資料，冷熱空氣分離的另一個要件是渦流的產生，為了瞭解此變因之作用情形，我們開始了以下的實驗。

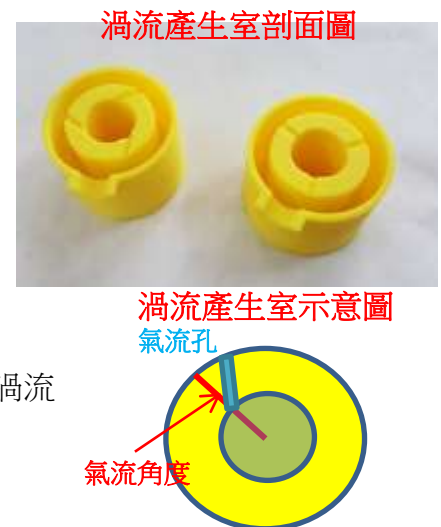
探討 2、氣流角度對渦流管溫差的影響

(一)目的：測試氣流角度對渦流管溫差的影響

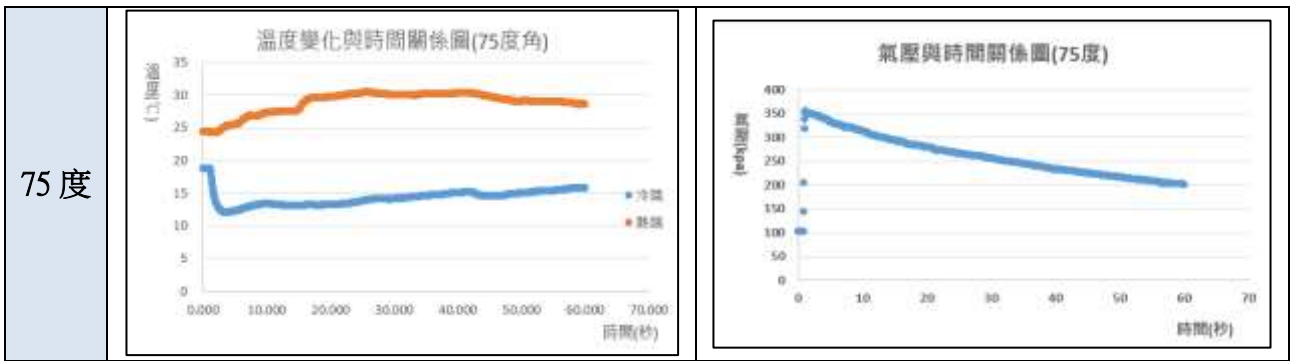
(二)步驟：

- 將氣流角度 0 度之渦流管連接空壓機及數據測量裝置。
- 打開空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
- 將氣體打入渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
- 將數據測量 5 次後求平均。
- 改變成氣流角度為 15 度、30 度、45 度、60 度及 75 度之渦流管，重複步驟 2~4。

(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係



角度	冷熱端溫度變化	氣壓變化
0 度	<p>溫度變化與時間關係圖(0度角)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(0度)</p>
15 度	<p>溫度變化與時間關係圖(15度角)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(15度)</p>
30 度	<p>溫度變化與時間關係圖(30度角)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(30度)</p>
45 度	<p>溫度變化與時間關係圖(45度角)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(45度)</p>
60 度	<p>溫度變化與時間關係圖(60度角)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(60度)</p>



2. 數據整理

變因 \ 角度(度)	0	15	30	45	60	75
高低溫差(°C)	5.0	8.6	15.2	24.6	25.8	17.8
最大氣壓(kpa)	361.2	342.3	368.5	298.8	382.6	389.5

(四)討論：

1. 由上面的結果發現，當氣流入射角度為 45~60 度間，會產生比較大的溫差，表示冷熱氣流分離的效果較好。其示意圖如下：

0 度角	角度適中	角度過大
當氣流角度為 0 度時，缺乏切向速度之氣流，不易形成渦流及冷熱氣流分離效果。	氣流角度適中(約 45~60 度)可以產生較好的渦流效果，有助於冷熱氣流分離。	氣流角度過大時，可能因為和管壁的過度摩擦，反而造成渦流不穩定，影響冷熱氣流分離效果。

2. 在 0 度角的溫度變化圖形中我們發現一個有趣的現象，即使在渦流不易產生的形況下，只要氣壓夠大，還是出現了小幅度冷熱氣流分離的情況，這個現象引起了我們的興趣，至於為什麼會產生這樣的結果，留待後面的實驗再繼續討論。

研究六、渦流管尺寸之影響

探討 1、渦流產生室大小對溫差的影響

(一)目的：測試渦流產生室大小對溫差的影響

(二)步驟：

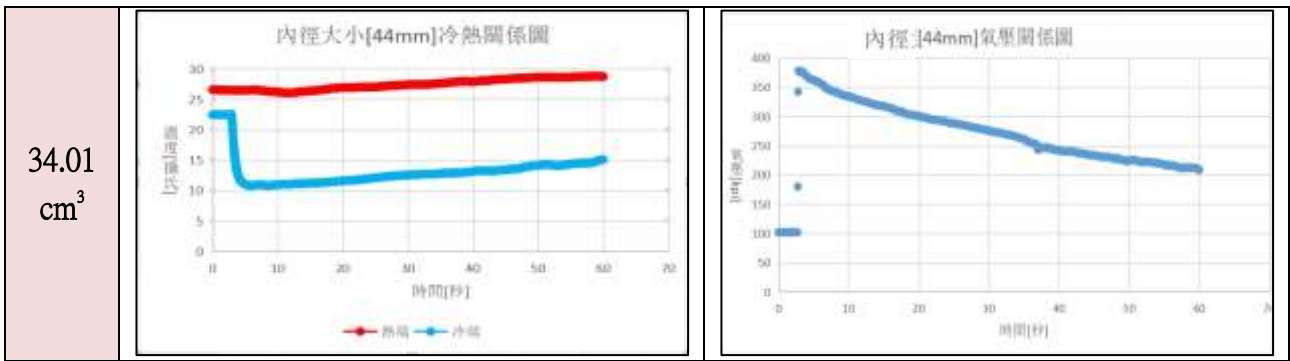


1. 將渦流產生室內徑 28mm 之渦流管(體積 11.40cm³)連接空壓機及數據測量裝置。

2. 打開空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
3. 將氣體打入渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變成渦流產生室內徑 32mm(體積 15.92cm³)、36mm(體積 21.20cm³)、40mm(體積 27.22cm³)及 44mm(體積 34.01cm³)之渦流管，重複步驟 2~4。

(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係

體積	冷熱端溫度變化	氣壓變化
11.40 cm ³	<p>內徑大小[28mm]冷熱關係圖</p>	<p>內徑 [28mm]氣壓關係圖</p>
15.92 cm ³	<p>內徑大小[32mm]冷熱關係圖</p>	<p>內徑 [32mm]氣壓關係圖</p>
21.20 cm ³	<p>內徑大小[36mm]冷熱關係圖</p>	<p>內徑(36mm)氣壓關係圖</p>
27.22 cm ³	<p>內徑大小[40mm]冷熱關係圖</p>	<p>內徑 [40mm]氣壓關係圖</p>

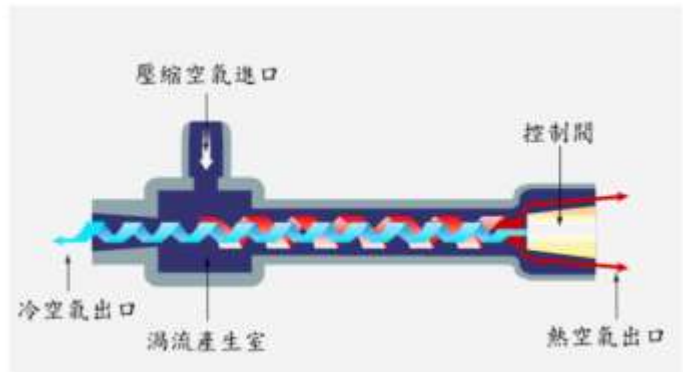


2. 數據整理

變因 \ 體積(cm ³)	11.40	15.92	21.20	27.22	34.01
高低溫差(°C)	32.5	27.2	22.7	16.5	18.1
最大氣壓(kpa)	372.5	375.2	371.5.8	372.6	382.1

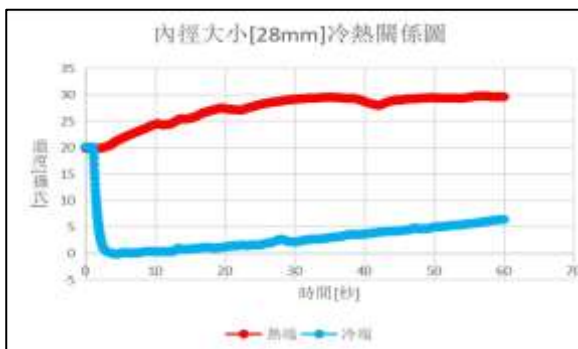
(四)討論：

1. 渦流產生室(如圖示)為高壓氣體要進入渦流管前的一個空腔，具有緩衝及累積氣體的功用，可讓氣體更加平均地進入渦流管中，有助於渦流的產生與穩定。

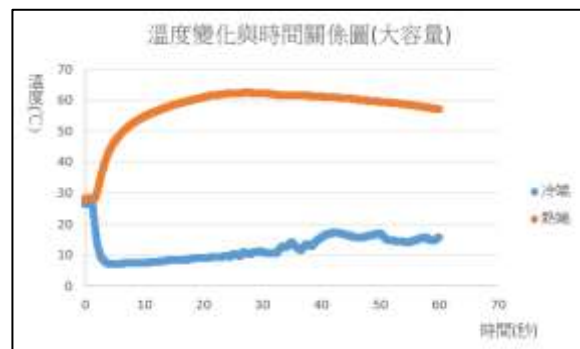


2. 由實驗中發現，渦流產生室的體積較小時，可以產生比較好的冷熱氣流分離效果。
3. 比較溫度變化的圖形後發現，我們的圖形和市售渦流管有很大的不同，

自製 3D 列印渦流管



市售渦流管



以上述兩張圖為例，自製渦流管的冷端已經達到 0°C 左右，但是熱端溫度約為 30°C，而市售渦流管冷端只有 8°C 左右，但是熱端溫度已經達到 60°C。根據公式

$$N_1 \cdot \left(\frac{3}{2} kT_1\right) + N_2 \cdot \left(\frac{3}{2} kT_2\right) = (N_1 + N_2) \cdot \left(\frac{3}{2} kT_f\right)$$

(T_1 、 T_2 為冷、熱端氣體分子之溫度 T_f 為氣體初始溫度， k 為波茲曼常數。)

若背景溫度在 20°C 左右，當兩邊噴出的氣流兩相同，其中一邊降到 0°C，代入公式計算可得算式如下：

$$N_1 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 278\right) + N_2 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot T_2\right) = (N_1 + N_2) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 293\right)。$$

$$\text{暫定 } N_1 = N_2 \text{ 可得 } 273 + T_2 = 293 \cdot 2$$

$$\therefore T_2 = 313 \text{ (K)} \quad , \text{ 約為 } 40^\circ\text{C}。$$

若依照實驗溫度再重新計算可得：

$$N_1 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 273\right) + N_2 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 303\right) = (N_1 + N_2) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 293\right)$$

$$\therefore N_2 = 2N_1$$

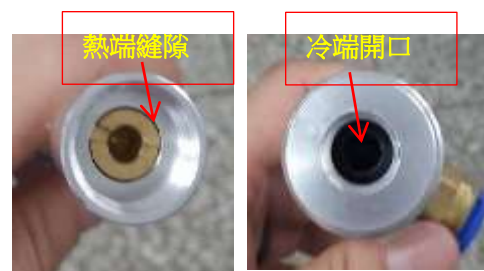
但是以熱端縫隙較小之條件下，熱端的氣體量應該比冷端更少，所以熱端溫度應該更高才合理。在此理論背景下，計算市售渦流管數據可得：

$$N_1 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 280\right) + N_2 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 335\right) = (N_1 + N_2) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 303\right)$$

$$\therefore N_2 = \frac{23}{32} N_1$$

表示冷端噴出的氣流量比熱端少，似乎較為合理。

但若以冷熱端的開口面積來比較，似乎又不成比例，顯然其中還有未知的機制在影響溫度變化所致。

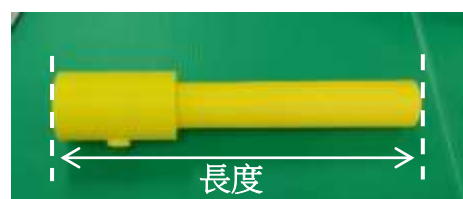


探討 2、渦流管長度對實驗的影響

(一)目的：測試渦流管長度對溫差的影響。

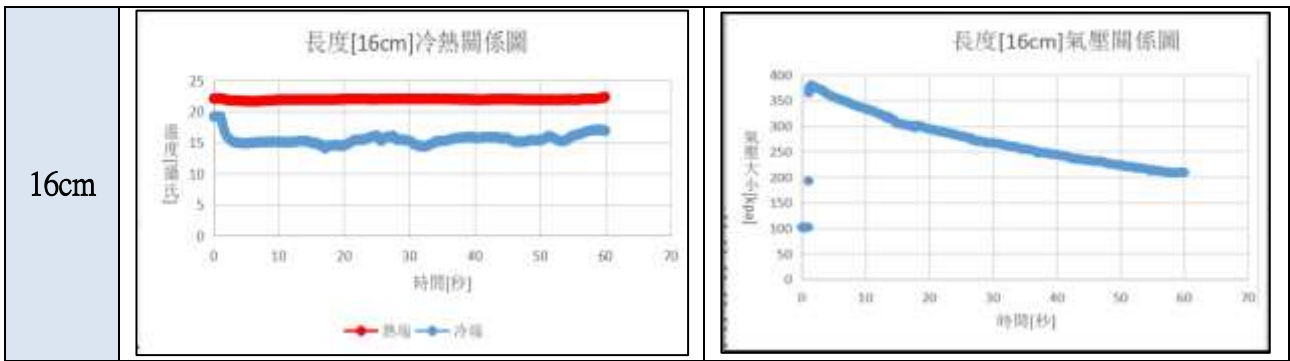
(二)步驟：

1. 將長度 6cm 之渦流管連接空壓機及數據測量裝置。
2. 打開空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
3. 將氣體打入渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變成長度 8cm、10cm、12cm 及 14cm、16cm 及 18cm 之渦流管，重複步驟 2~4。



(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係

長度	冷熱端溫度變化	氣壓變化
6cm	<p>長度[6cm]冷熱關係圖</p> <p>溫度[攝氏]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端 ● 冷端</p>	<p>長度[6cm]氣壓關係圖</p> <p>氣壓大小[hPa]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端</p>
8cm	<p>長度[8cm]冷熱關係圖</p> <p>溫度[攝氏]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端 ● 冷端</p>	<p>長度[8cm]氣壓關係圖</p> <p>氣壓大小[hPa]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端</p>
10cm	<p>長度[10cm]冷熱關係圖</p> <p>溫度[攝氏]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端 ● 冷端</p>	<p>長度[10cm]氣壓關係圖</p> <p>氣壓大小[hPa]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端</p>
12cm	<p>長度[12cm]冷熱關係圖</p> <p>溫度[攝氏]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端 ● 冷端</p>	<p>長度[12cm]氣壓關係圖</p> <p>氣壓大小[hPa]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端</p>
14cm	<p>長度[14cm]冷熱關係圖</p> <p>溫度[攝氏]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端 ● 冷端</p>	<p>長度[14cm]氣壓關係圖</p> <p>氣壓大小[hPa]</p> <p>時間[秒]</p> <p>● 熱端</p>

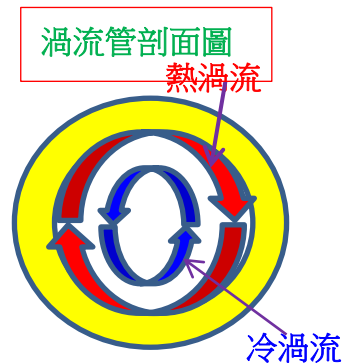


2. 數據整理

變因 \ 長度(cm)	6	8	10	12	14	16
高低溫差(°C)	7.2	6.8	13.1	18.1	17.2	10.2
最大氣壓(kpa)	362.1	345.6	372.5	386.1	401.2	392.1

(四)討論：

1. 由數據中的趨勢我們發現，當渦流管的長度為 12~14cm 之間時，可以有較好的冷熱氣流分離的效果，當渦流管的長度過短時，管內渦流作用的距離不足，管內之外圍渦流加溫尚未完全即從熱端縫隙噴出，而冷端之冷空氣亦是相同的狀況，此為造成冷熱氣流溫差不大之原因。



研究七、冷熱端大小對自製渦流管溫差之影響

探討 1、冷熱端口徑大小對渦流管溫差的影響

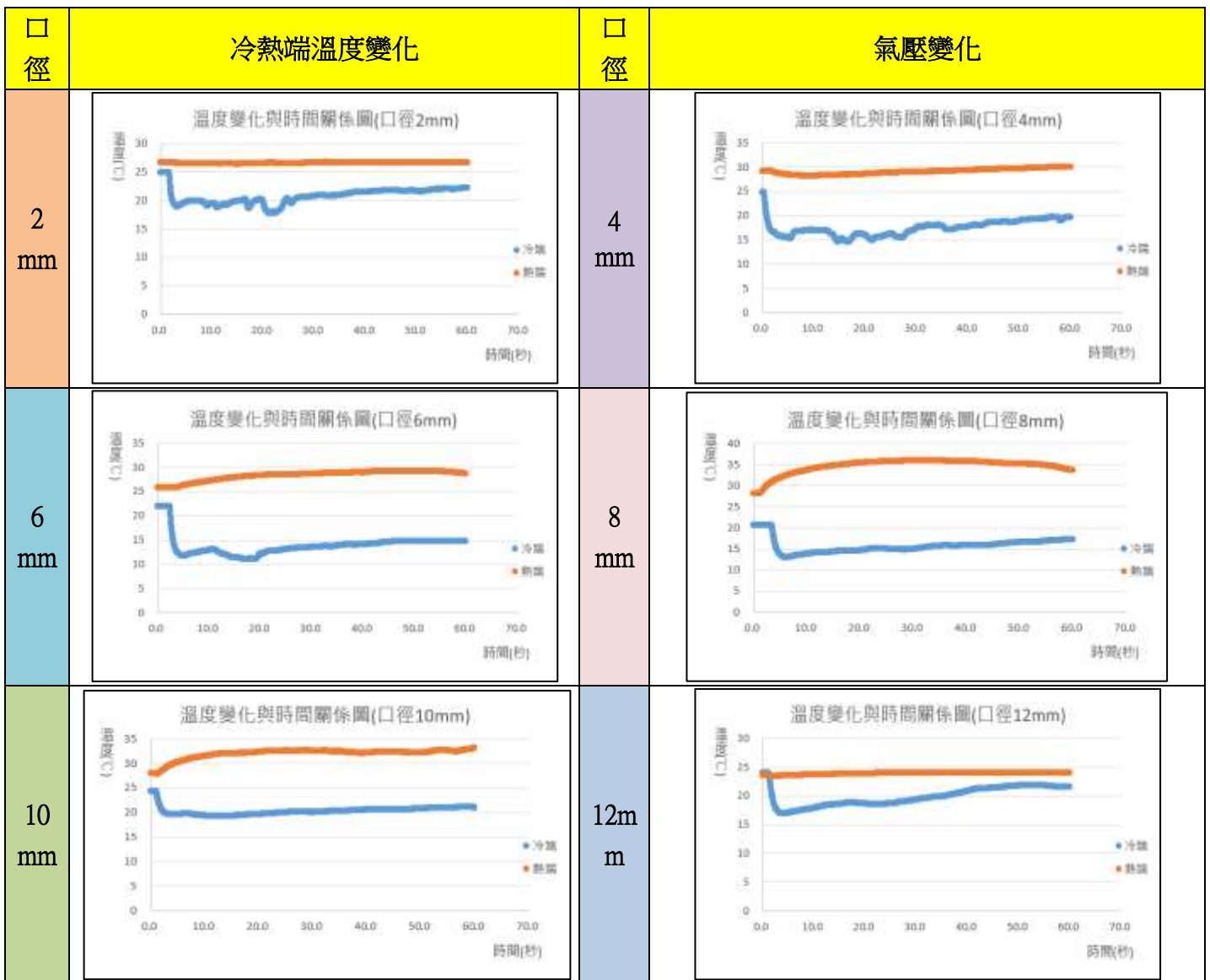
(一)目的：測試不同冷熱端口徑大小對溫差的影響

(二)步驟：

1. 將冷熱端開口內徑 2mm 之渦流管連接空壓機及數據測量裝置。
2. 打開空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
3. 將氣體打入渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變成冷熱端口徑為 4mm、6mm、8mm、10mm 及 12mm 之渦流管，重複步驟 2~4。



(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係



2. 數據整理

變因 \ 口徑(mm)	2	4	6	8	10	12
高低溫差(°C)	10.2	15.0	24.2	23.3	14.5	8.9
最大氣壓(kpa)	355.2	354.3	340.5	305.2	336.2	306.5

(四)討論：

- 由實驗結果發現，口徑太小或太大都不利於冷熱氣流的分離，其原因推論如下，當口徑過小時，管內之冷熱渦流距離過近，沒有足夠的空間可以分離；當管徑過大時，渦流的效果不容易維持。以上之原因都會造成冷熱氣流分離效果不佳。
- 當口徑大小為 6~8mm 時，可以得到一個很好的冷熱氣流分離的效果，此口徑大小與市售的口徑(10mm)相比略小一些，此原因可能是材質與內管壁表面光滑程度不同所致。

探討 2、熱端縫隙大小對渦流管溫差的影響

(一)目的：測試熱端縫隙大小對溫差的影響

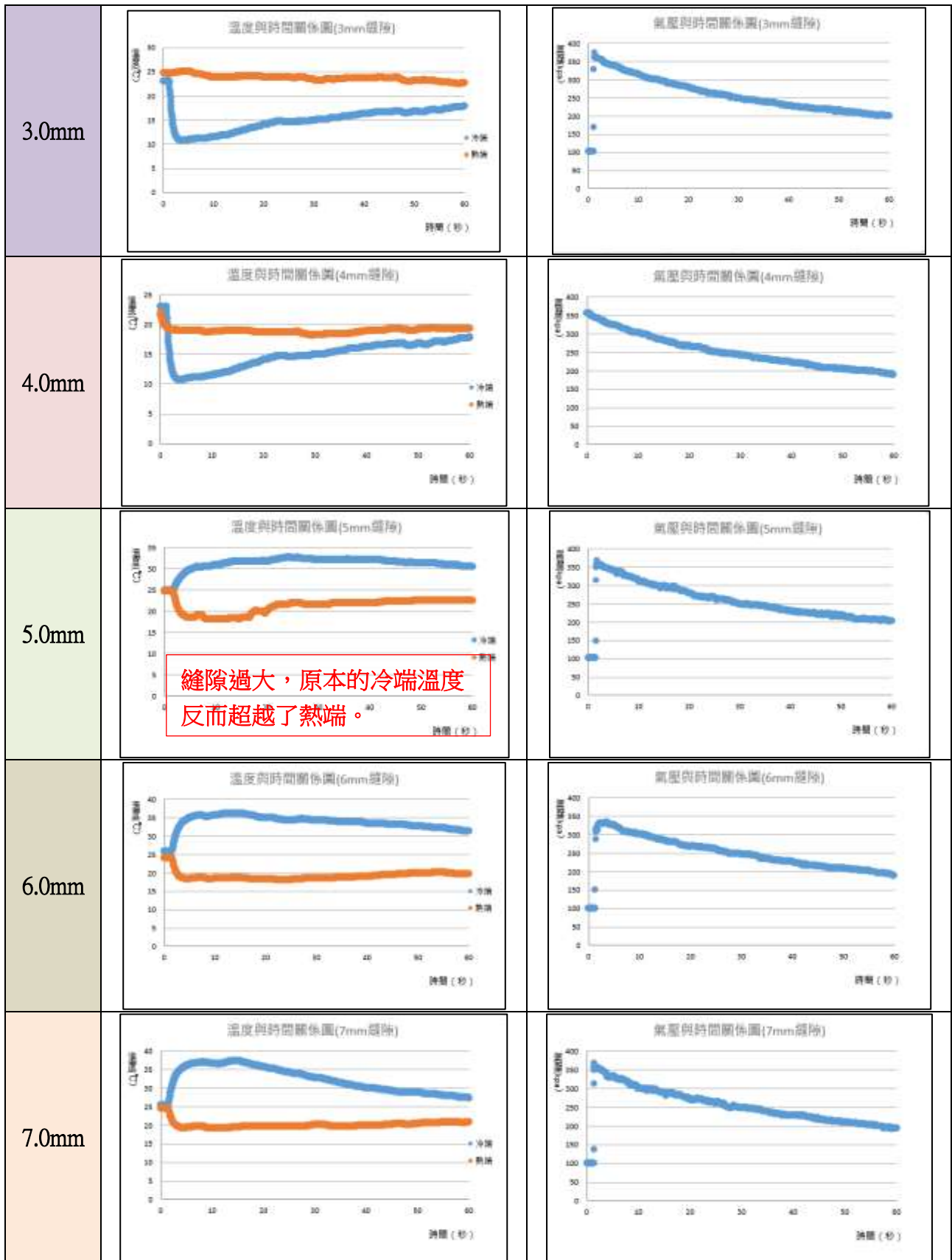
(二)步驟：

1. 將熱端縫隙控制閥壓緊，使縫隙距離小於 0.1mm。
2. 將渦流管連接空壓機及數據測量裝置。
3. 打開空壓機開關，並將氣壓充至 100psi。
3. 將氣體打入渦流管，並同步測試溫的及壓力變化數據。
4. 將數據測量 5 次後求平均。
5. 改變間距離為 1mm、2mm、3mm、4mm、5mm、6mm 及 7mm，重複步驟 2~4。



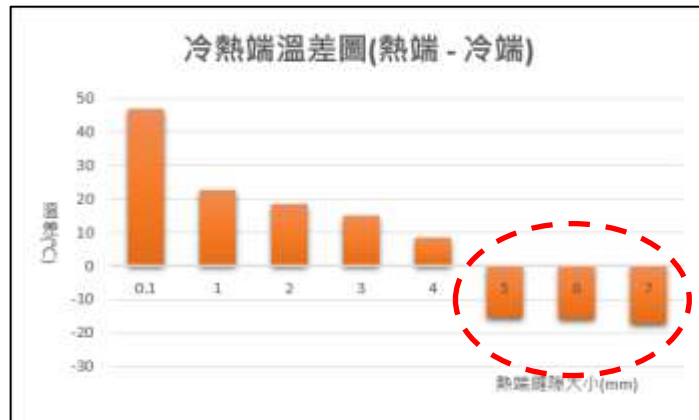
(三)結果：1. 溫度變化與氣壓變化關係

縫隙	冷熱端溫度變化	氣壓變化
<0.1mm	<p>溫度與時間關係圖(0.1mm縫隙)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(0.1mm縫隙)</p>
1.0mm	<p>溫度與時間關係圖(1mm縫隙)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(1mm縫隙)</p>
2.0mm	<p>溫度與時間關係圖(2mm縫隙)</p>	<p>氣壓與時間關係圖(2mm縫隙)</p>



2. 數據整理

變因 \ 縫隙(mm)	<0.1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
高低溫差(°C)	46.8	22.5	18.5	15.2	8.6	-15.3	-15.6	-17.2
最大氣壓(kpa)	382.2	383.1	378.9	375.6	365.3	362.3	342.6	365.7



(四)討論：

1. 本次實驗出現幾個重大的發現，原本我們只是盡量把熱端縫隙控制閥盡量壓緊，想要做縫隙為 0mm 的變因，沒想到因為壓力過大，氣流仍然從看不到的縫隙噴出來，此縫隙恰好形成熱端溫度上升的條件，因此產生很大的溫差。
2. 當我們把熱端的縫隙慢慢加大時，冷熱氣流分離的狀況就越來越差，但是當縫隙過大時，原本的熱端竟然出現溫度比冷端還要低溫的情況，這是之前實驗從來沒有發生過的。
3. 綜合實驗發生的現象與此作比較可推論，渦流管的冷熱分離系統主要有兩大原因，首先是渦流的產生，當氣體在渦流管外圈做渦流的運動時，因高壓氣體的作用，產生加速的效果，根據熱學原理之公式： $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \propto T$ 可知，氣體分子的溫度與其動能大小成正比，當氣體在渦流管外圈做渦流運動時，速率會比內圈還快，因此溫度較高，而內圈之氣流流速較慢，所以溫度較低。
4. 再來是渦流噴出的瞬間，當內部的高壓氣體噴出瞬間時，產生類似絕熱膨脹的效果，當氣體體積迅速變大時，壓力會下降，造成溫度再度下降，因此產生降溫的效果，而熱端因為縫隙很小，氣體噴出時，必須以較高的壓力才可衝出縫隙，因此，除了氣體的渦流外，又產生類似壓縮的效果，再開口附近形成了高溫的狀態。
5. 但當熱空氣在噴出的時候體積又快速膨脹產生減壓的效果，故溫度又下降了，而我

們熱端的測試位置無法真的深入到管內，這也可以說明，為何我們總是無法將熱端的溫度拉高之原因。

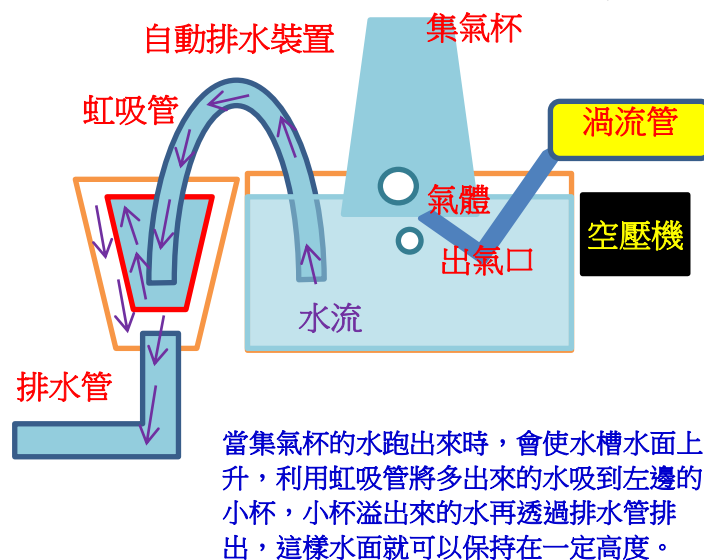
6. 為了更加準確驗證我們的想法，我們又進行以下的實驗

探討 3、氣流大小的測試

(一)目的：測試氣流流量之關係

(二)步驟：

1. 將渦流管裝置裝好，並接上塑膠管連接到集氣杯。
2. 將出氣口放置在接近水面位置後將空壓機打開，使冷端排出之進入集氣杯，氣體用排水集氣法及自動排水裝置收集起來，用碼表測量其收集至 2000ml 之時間，並計算(裝置如下)。



3. 將塑膠管改接成冷端，重複步驟 2。

(三)結果：1. 數據

測試口	市售冷端	市售熱端	自製冷端	自製熱端
填滿杯子時間	2.7	9.2	3.2	8.2
流量(mL/s)	740.7	217.4	625.0	274.0

(四)討論：

1. 將上述的結果代入公式計算：

市售渦流管計算如下：(以冷端溫度 5°C 計算)

$$740.7 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 278\right) + 217.4 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot T_2\right) = (740.7 + 217.4) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 293\right)$$

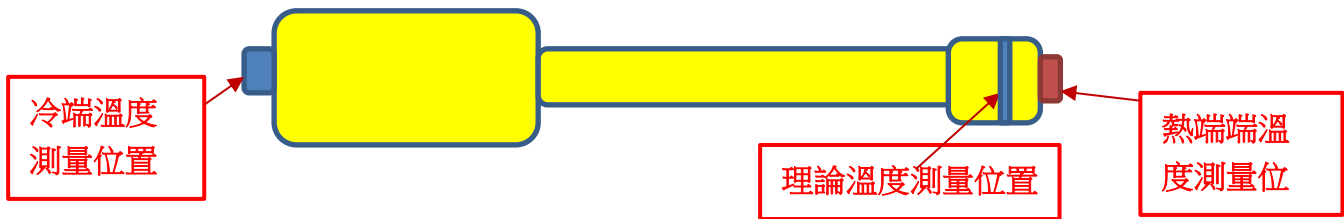
可得 T_2 約為 344.1K，換算後理論溫度為攝氏 71.1 °C(實際測量為 63°C)

自製渦流管部分計算如下：(以冷端溫度 0°C 計算)

$$625.0 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 273\right) + 274.0 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot T_2\right) = (625.0 + 274.0) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 293\right)$$

可得 T_2 約為 338.6K，換算後理論溫度為攝氏 65.6 °C(實際測量為 48°C)

若加入氣體噴出後急速膨脹造成溫度下降的結果，以及測量位置限制所造成的影響，似乎就可說明造成此誤差之原因，此實驗結果也更加證實我們的推論。



2. 雖然無法測量結果和理論有些微差距，但是對於渦流管的效能測試，仍有正向之關係。

陸、結論

一、如何測試所需數據。

(一)利用數位式溫度計以及氣壓計可以輕易地記錄溫度、壓力與時間的關係。

(二)將冷、熱端分別架上溫度計，並在渦流室接上氣壓計，可以即使取得數據，並比較三者之關係。

二、市售渦流管的性質。

(一)市售渦流管接上高壓氣體後，可以輕易地將冷熱空氣進行分離。

(二)我們發現，市售渦流管的啟動，必須要有足夠高的壓力，壓力不足時，冷熱氣流的分離效果會降低，透過大、中、小三種容量的空壓機測試後發現，穩定的高壓氣體，是渦流管穩定作用的因素之一。

三、如何自製渦流管。

(一)一開始我們使用水管製作渦流管，雖可以輕易的製作出來，但卻受限於水管的尺寸，且某些變因無法精準的變化，造成實驗上的侷限。

(二)使用 3D 列印的技術，可以輕易地改變渦流管的變因，且一致性高，避免手作時造成的誤差，有助於實驗的進行。

四、初始壓力對渦流管溫差之影響。

(一)在此測試中，我們發現要產生較好的冷熱分離效果，必須要有足夠大的初始壓力，而且必須要維持在某一個高壓才能使渦流持續產生，以維持冷熱溫差的變化。

五、渦流管的氣流對溫差之影響。

(一)當氣流夠大時，才可將渦流產生室的壓力拉高，形成高壓空氣，並產生渦流，產生較好的冷熱氣流分離效果。

(二)當渦流產生室的氣流噴入角度為 45~60 度時，可以得到比較好的冷熱分離效果，除此之外我們發現在 0 度角的時候，冷端還是有降溫的效果，但熱端的升溫效果不明顯，事後推論是因為氣流噴出時氣體膨脹所造成的降溫效果。

六、尺寸大小對溫差之影響。

(一)此實驗中發現，渦流產生室只要在合適的大小，就可以有緩衝及製造渦流的效果，太大反而效果不好。

(二)另外使用 $N_1 \cdot \left(\frac{3}{2} kT_1\right) + N_2 \cdot \left(\frac{3}{2} kT_2\right) = (N_1 + N_2) \cdot \left(\frac{3}{2} kT_f\right)$ 公式竟然推出冷端(大面積)噴出的氣體流量小於或略大於熱端(極小面積)之不合理結果，最後再透過實際測量氣流量之實驗在反推得知，除了渦流之外，應該還有其他因素在影響氣流之溫度。

(三)在渦流管長度的測試中，我們找到使渦流作用的合適長度大約在 12~14 公分間。

七、冷熱端大小對溫差之影響。

(一)在口徑的測試中發現，冷熱端的口徑太小或太大都不利於渦流的產生，進而影響冷熱氣流的分離關係，實際測試發現大約在 6~8mm 左右有比較好的效果與市售口徑 10mm 相比略小，應是其材質不同所造成。

(二)在熱縫隙大小的研究中有重大發現，當我們將縫隙壓緊，使開口間隔小於 0.1mm 時，因為氣流需要高壓才能衝出，因而形成溫度上升的條件。另外當縫隙距離大於 5mm 時，竟然出現原本熱端溫度比冷端還要低溫的狀況，表示除了渦流之外，還有另一個影響溫度高低的重要因素。

(三)透過氣流量的測試，我們湊齊推導理論所需的數據，進行推導得：

市售渦流管計算如下：(以冷端溫度 5°C 計算)

$$740.7 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 278\right) + 217.4 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot T_2\right) = (740.7 + 217.4) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 293\right)$$

可得 T_2 約為 344.1K，換算後理論溫度為攝氏 71.1 °C(實際測量為 63°C)

自製渦流管部分計算如下：(以冷端溫度 0°C 計算)

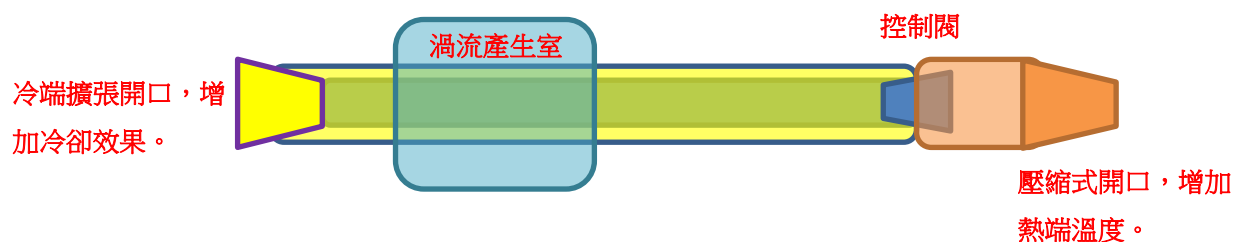
$$625.0 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 273\right) + 274.0 \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot T_2\right) = (625.0 + 274.0) \cdot \left(\frac{3}{2} k \cdot 293\right)$$

可得 T_2 約為 338.6K，換算後理論溫度為攝氏 65.6 °C(實際測量為 48°C)

自製渦流管的開口理論溫度為 65.6°C，與實驗值 48°C 有一段差距，查詢資料後發現，當氣體在絕熱狀態下，壓力變小時，該氣體的溫度也隨之降低，於是產生冷凍的效果。當氣流噴出熱端時，因為氣體急速膨脹，造成壓力下降，因此氣溫就會下降，此理論恰可解釋此誤差的結果。

柒、未來展望

本次研究我們找到了影響冷熱端溫差的關鍵因素，若能以此為基準繼續研究，使渦流產生更加容易，並考慮絕熱壓縮、膨脹等因素，必能持續改良渦流管，使其效能更加提升。其設計概念如下：



捌、參考資料

- 一、康軒文教事業(2021)。自然與生活科技第三冊。第五章 溫度與熱。台北：康軒文教事業。
- 二、翰林文教事業(2021)。高中選修物理第二冊。第五章。熱學。台南：翰林文教事業。
- 三、李俊明等。中華民國第 42 屆中小學科學展覽作品輯「蘭克 - 希爾須渦旋管」。
- 四、王柏翔等。中華民國第 51 屆中小學科學展覽作品輯「管中世界—冷暖自知」。
- 五、Hitesh R.Thakare, Monde Aniket, Ashok D. Parekh (2015)。Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review。Renewable and Sustainable Energy Reviews。
- 六、基耐科技有限公司網頁。https://www.g9corp.com.tw/content.asp?article_id=39

【評語】 030102

1. 研究主題：本作品相關研究雖已有相似題材，但能將問題系統化探討，亦值得鼓勵。
2. 創意、學術或實用價值：本研究以 3D 列印製作渦流管，設計不同變因進行量測，惟實驗探討未有新穎設計及具體結論，建議可思考實驗設計以將分析結果作為發展新穎結構之具體應用製作參考。
3. 科學方法之適切性：本研究設計不同變因進行量測，具適切性科學探究與實作方法，惟所得數據未考慮不確定度探討，建議須思考將數據以相關物理原理深入分析。

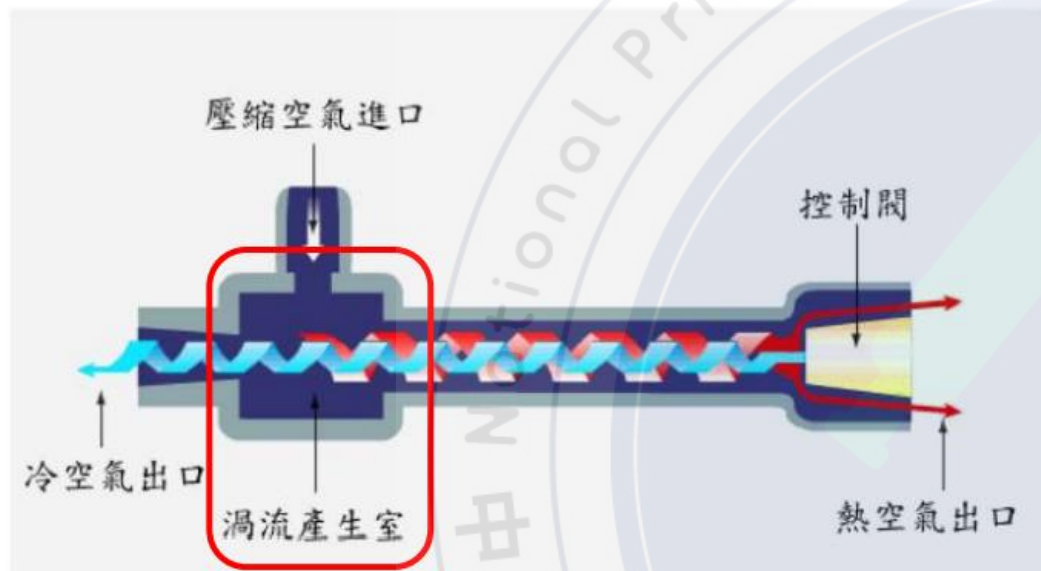
作品簡報

管中冷暖，一壓即知

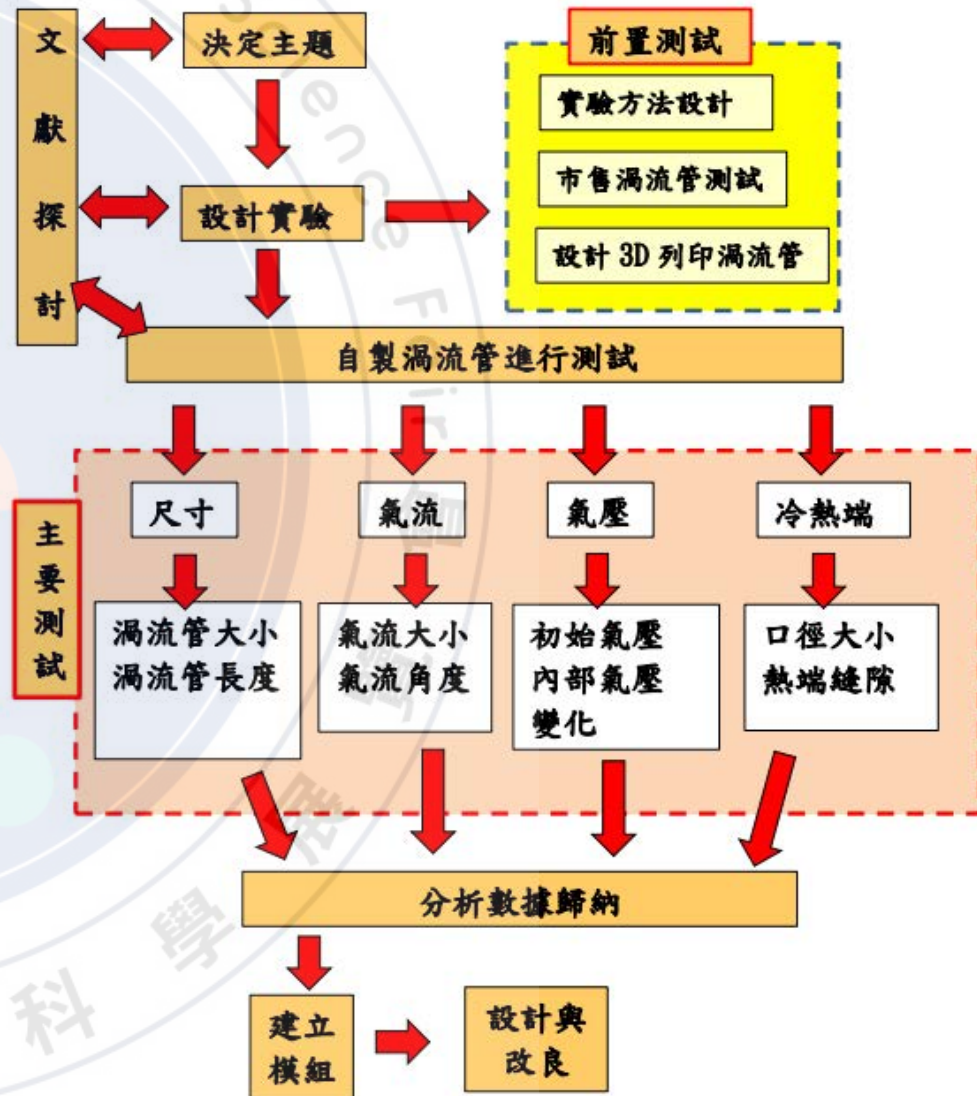
利用3D列印技術探討渦流管之原理

科別：物理科 組別：國中組

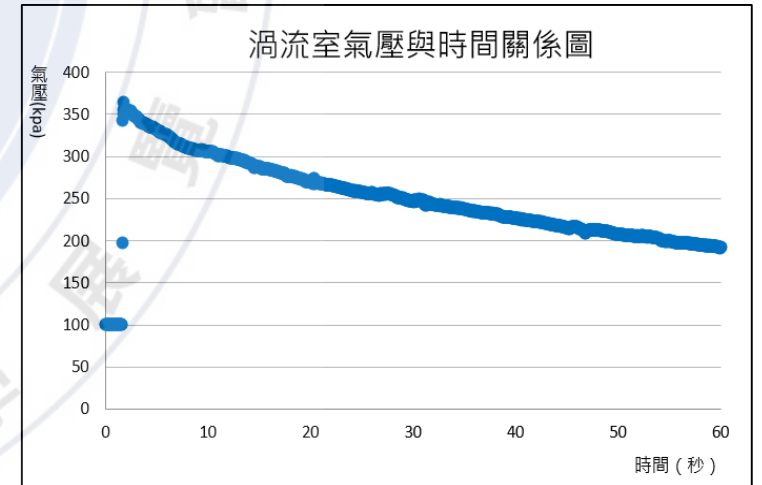
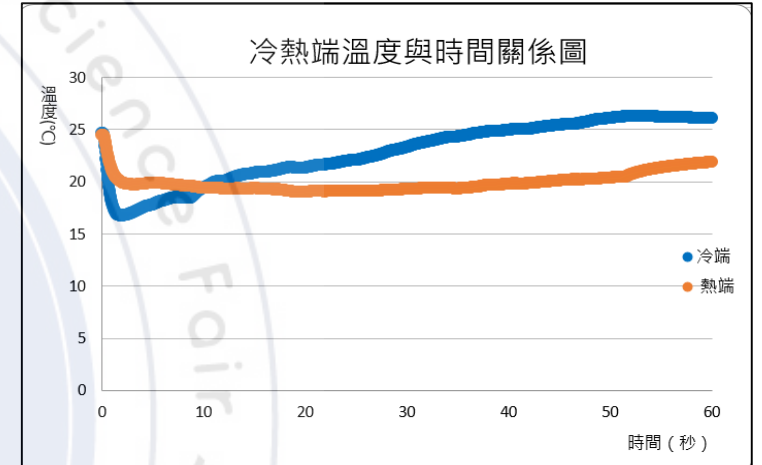
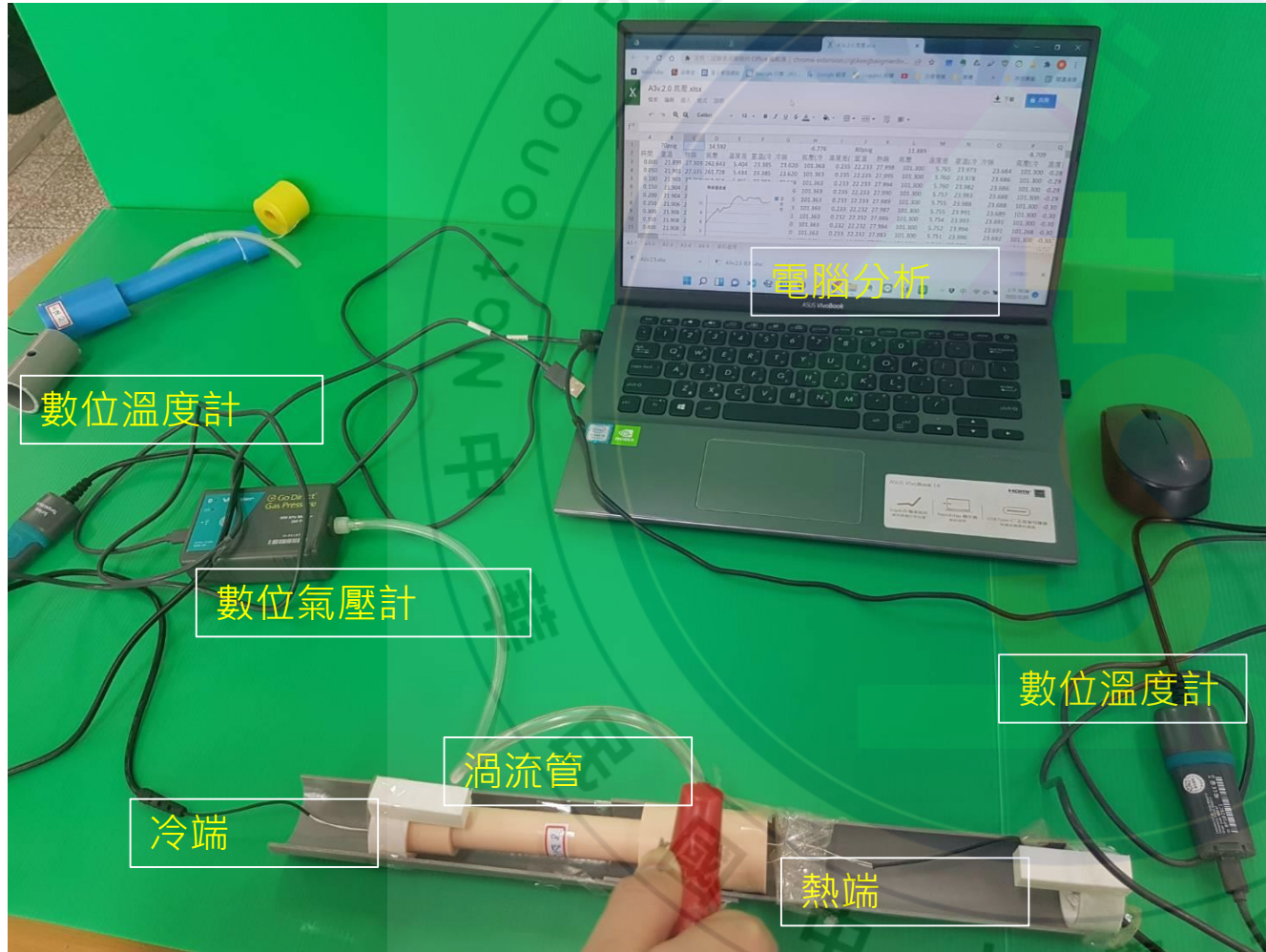
原理



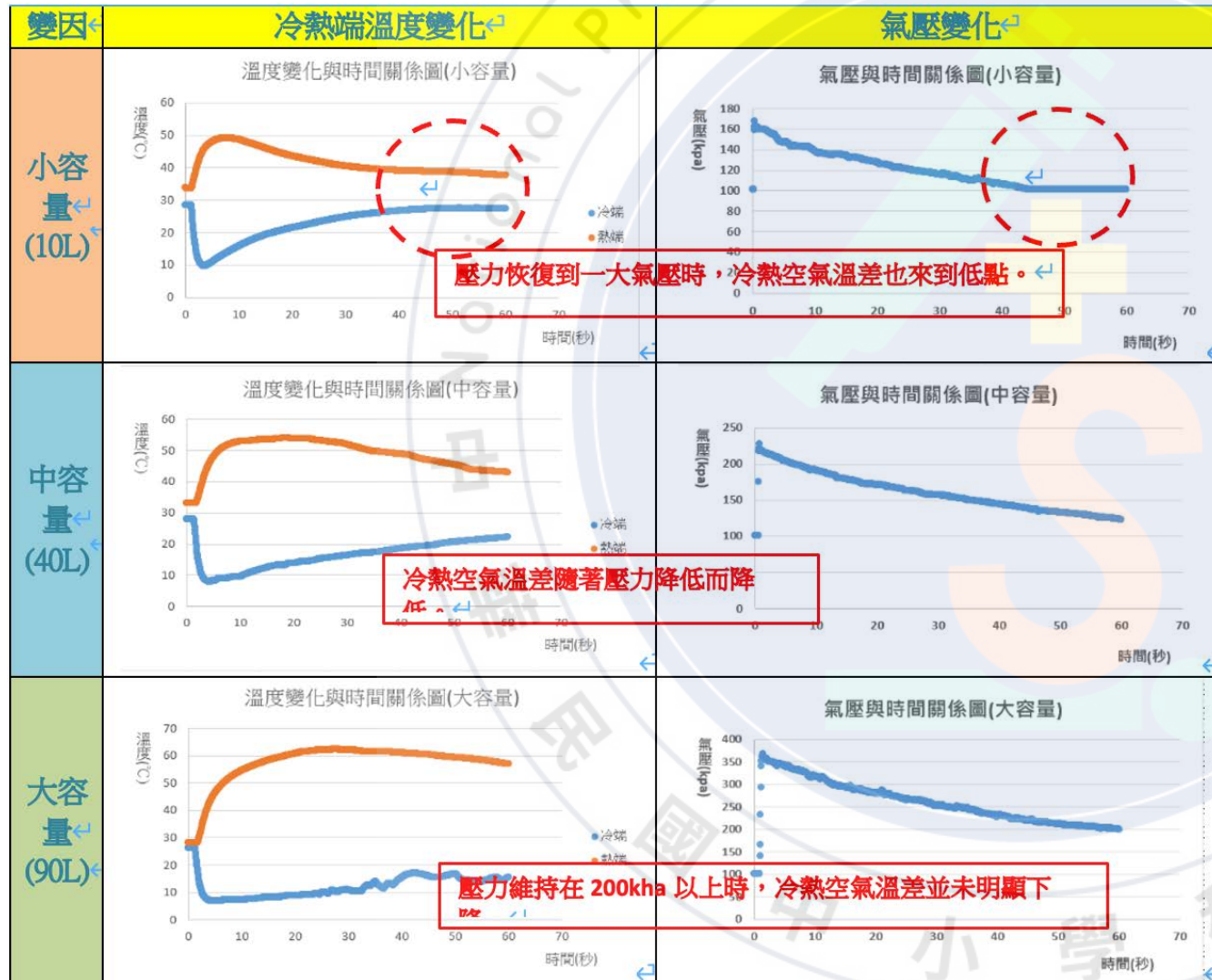
流程圖



研究一、如何測試所需數據



研究二、市售渦流管的性質



1. 大容量的空壓機可以有較長時間維持在高壓的情況
2. 容量過小，冷熱分離只有一開始啟動時出現
3. 由中容量的空壓機可以看到冷熱溫差隨著壓力下降。

研究三、如何自製渦流管

水管式渦流管

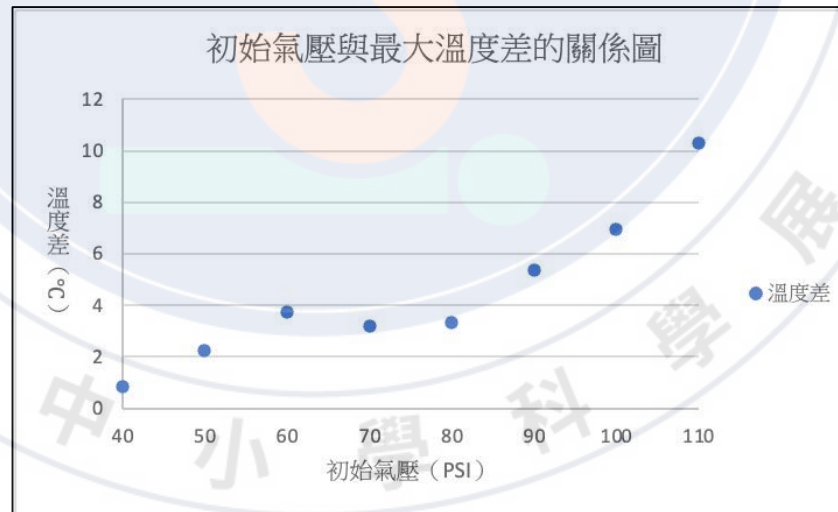
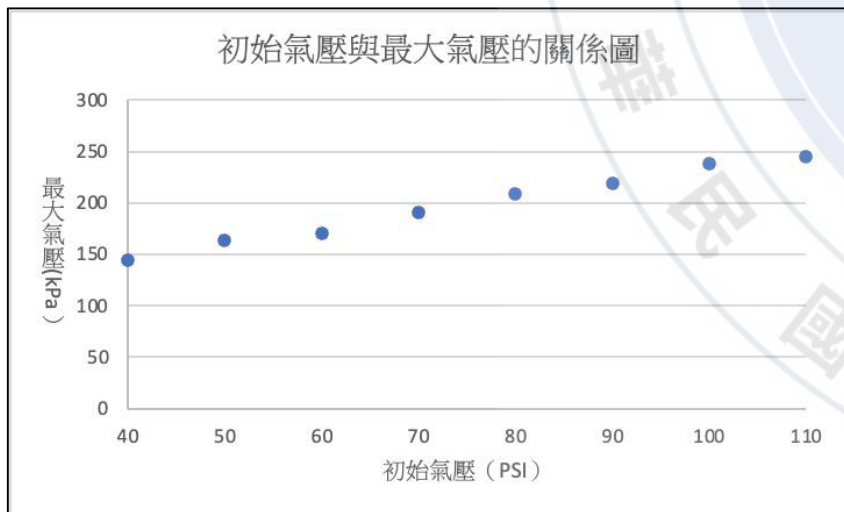
1. 受限於市售水管尺寸
2. 變因不易控制。

3D列印渦流管

1. 可任意改變渦流管形狀與細微變因



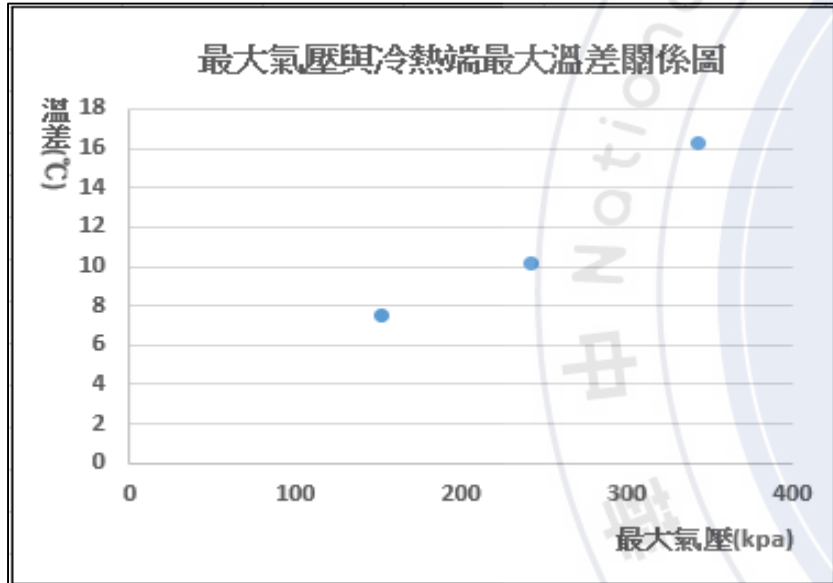
研究四、初始壓力對自製渦流管溫差之影響



1. 空壓機初始壓力越大，渦流管可以達到的最大壓力也越大。

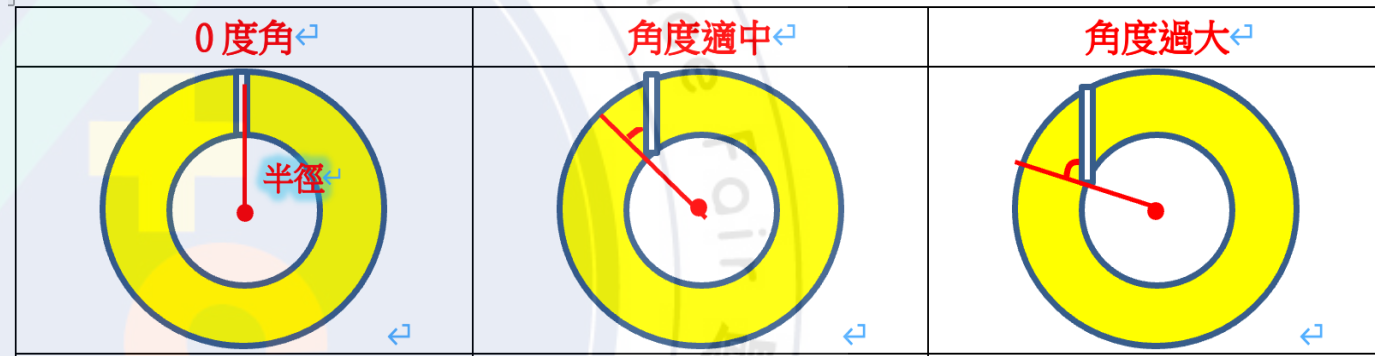
研究五、氣流對自製渦流管溫差的影響

氣流大小對自製渦流管溫差的影響



1. 氣流的大小會影響渦流產生室的氣壓大小；
氣壓不足不利冷熱空氣分離

氣流角度對渦流管溫差的影響

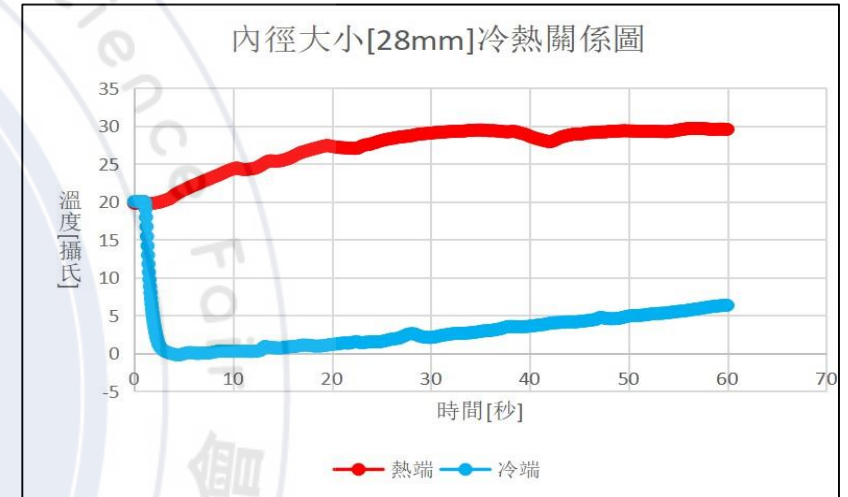
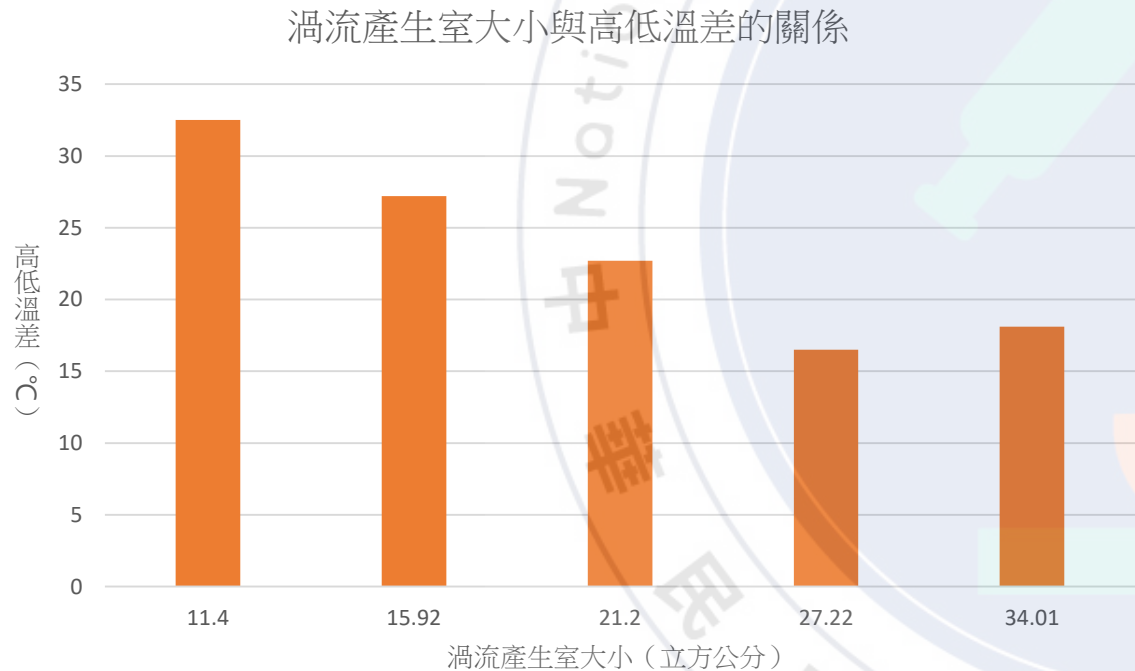


1. 氣流入射角度為45~60度間，會產生比較大的溫差
2. 在0度角的狀況下仍出現小幅度冷熱氣流分離。

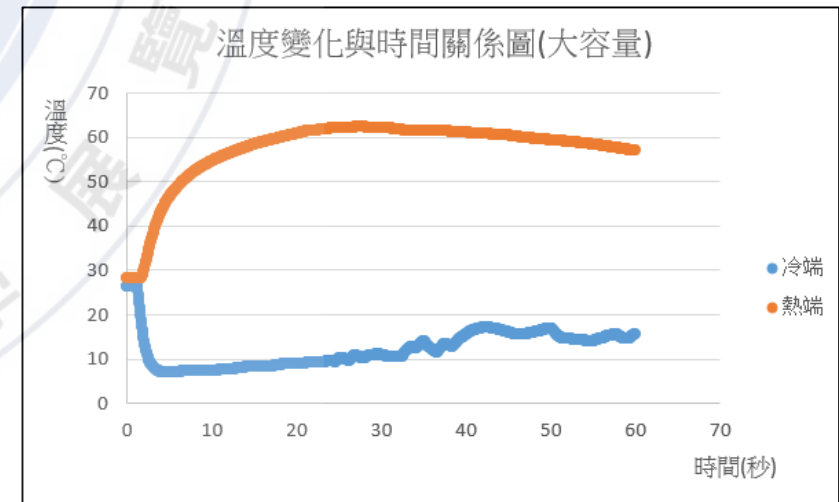
研究六、渦流管尺寸之影響

自製渦流管

渦流產生室大小對溫差的影響

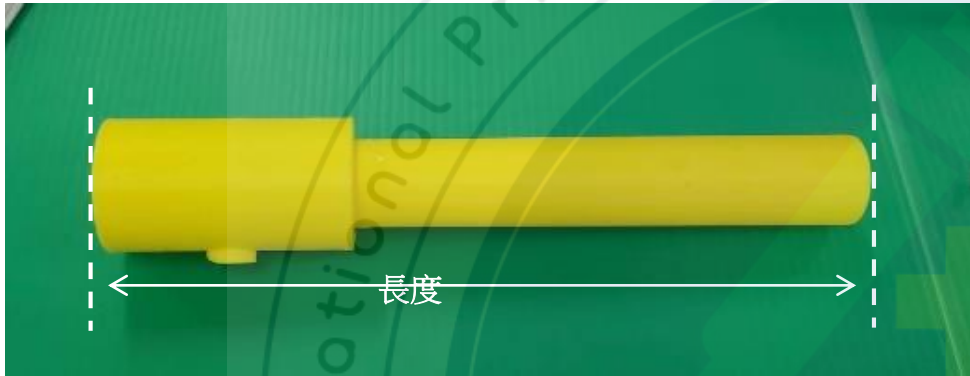


市售渦流管



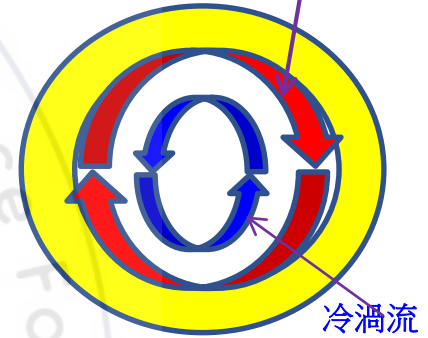
1. 渦流產生室的體積較小時，可以產生比較好的冷熱氣流分離效果。
2. 比較溫度變化的圖形後發現，我們的圖形和市售渦流管有很大的不同

渦流管長度之影響

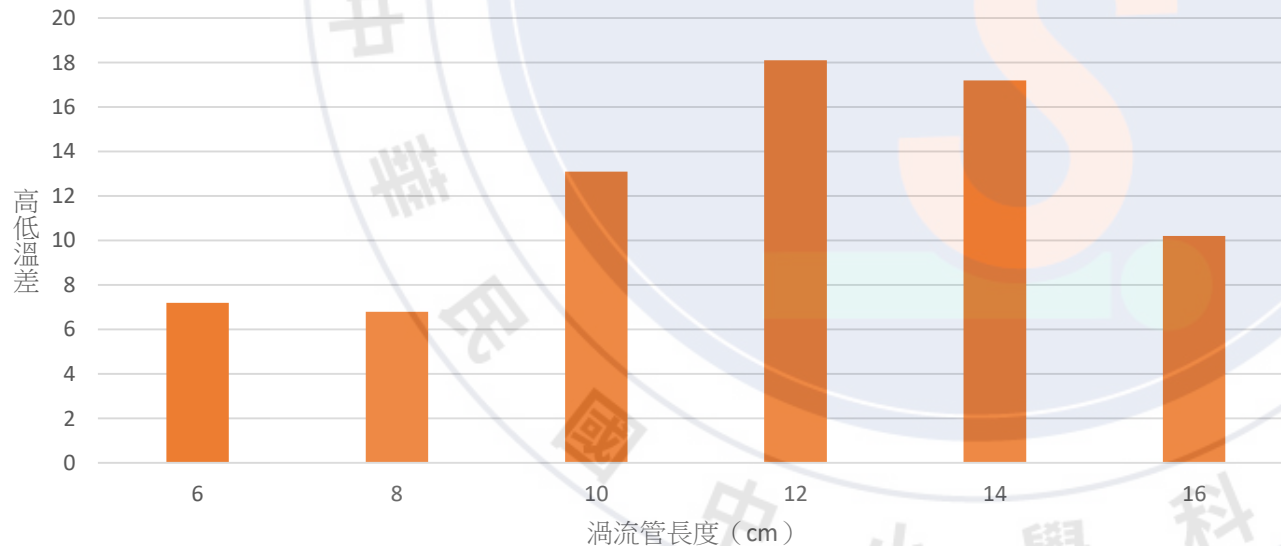


渦流管剖面圖

熱渦流



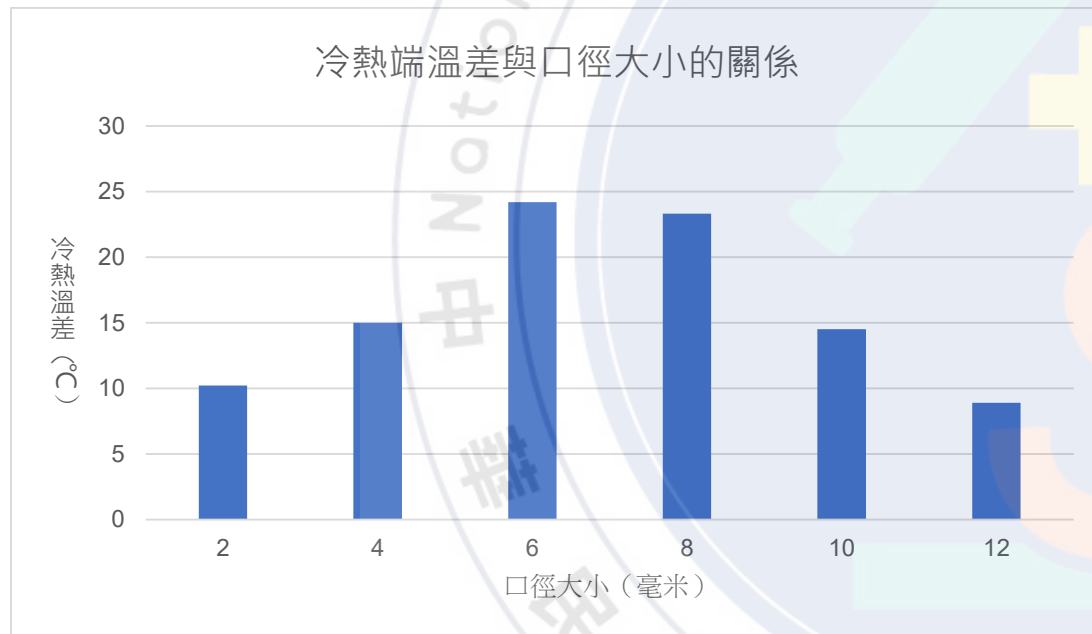
渦流管長度與高低溫差的關係



1. 當長度為12~14cm之間時，可以有較好的冷熱氣流分離的效果。
2. 當渦流管的長度過短時，管內渦流作用的距離不足，管內之外圍渦流加溫尚未完全即從熱端縫隙噴出。

研究七 冷熱端大小對自製渦流管溫差之影響

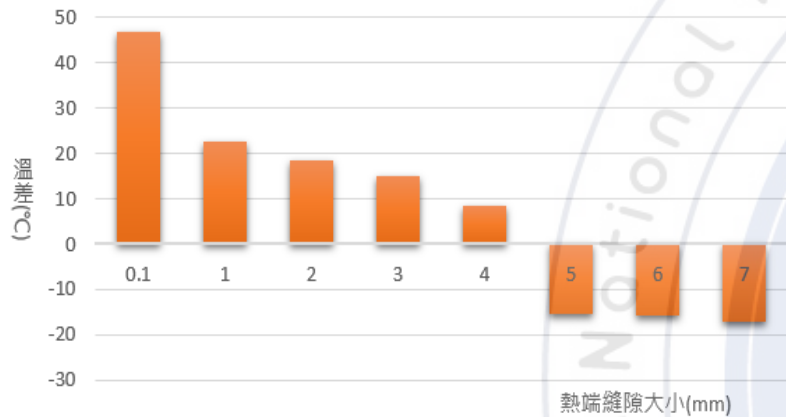
口徑大小對渦流管溫差的影響



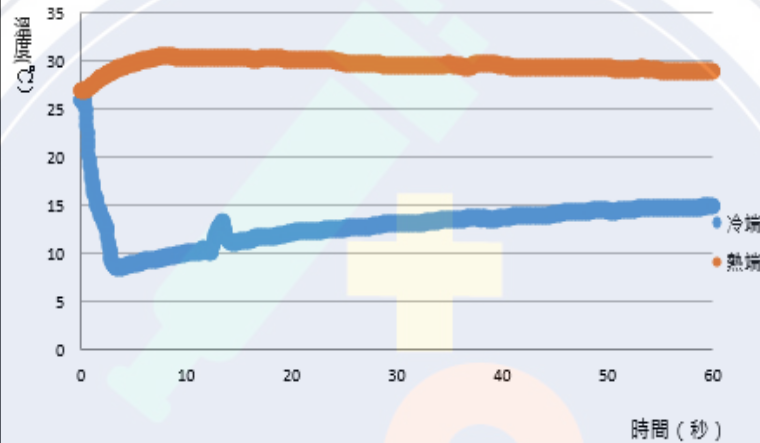
1. 口徑太小或太大都不利於冷熱氣流的分離：
 - 口徑過小時，管內之冷熱渦流距離過近，沒有足夠的空間可以分離
 - 口徑過大時，渦流的效果不容易維持
2. 當口徑大小為6~8mm時，可以得到很好的冷熱氣流分離的效果，與市售的口徑相比略小。

熱端縫隙大小對渦流管溫差的影響

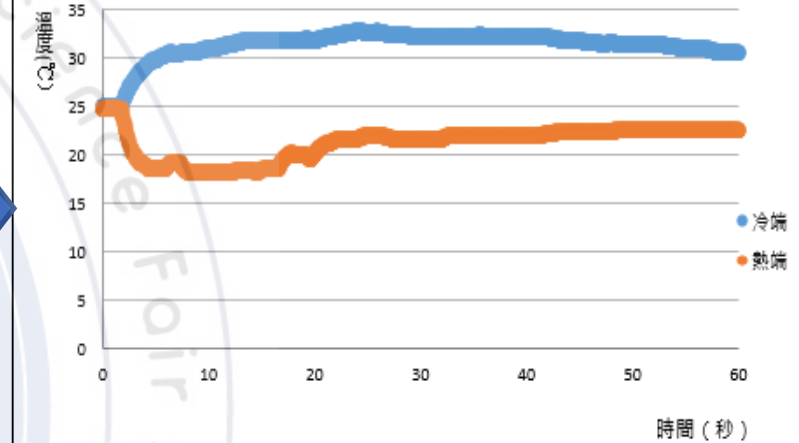
冷熱端溫差圖(熱端 - 冷端)



溫度與時間關係圖(1mm縫隙)



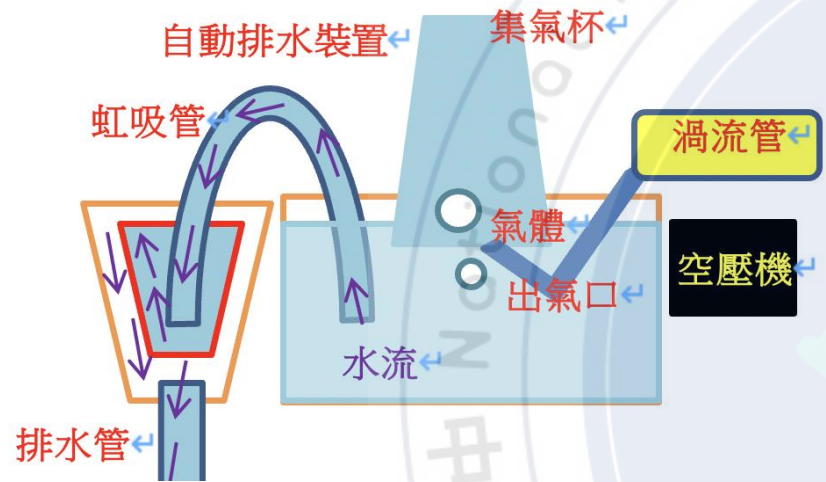
溫度與時間關係圖(5mm縫隙)



1. 縫隙為0mm時，因為壓力過大，氣流仍然從看不到的縫隙噴出來。
2. 熱端的縫隙變大時，冷熱氣流分離的狀況就越來越差。
3. 綜合實驗發生的現象與此作比較可推論，渦流管的冷熱分離系統主要有兩大原因，首先是渦流的產生、再來是渦流噴出的瞬間

渦流管流量測試與計算

裝置圖



測試口	市售冷端	市售熱端	自製冷端	自製熱端
填滿杯子時間	2.7	9.2	3.2	8.2
流量(mL/s)	740.7	217.4	625.0	274.0



1. 將上述的結果代入公式計算：

市售渦流管：換算後理論溫度為攝氏 71.1°C (實際測量為 63°C)

自製渦流管：換算後理論溫度為攝氏 65.6°C

結論

- 氣流噴入角度為45~60度
- 渦流產生室大小適當（約11.4cm³）、長度約為12~14 cm
- 口徑6~8mm、熱端縫隙間隔小於0.1mm時
- 內部壓力維持在160kPa以上

未來展望

若能以本次研究為基準繼續研究，使渦流產生更容易且考量絕熱膨脹、壓縮，必能使效能更加提升。

參考資料

- 一 康軒文教事業(2021)。自然與生活科技第三冊。第五章 溫度與熱。台北：康軒文教事業。
- 二 翰林文教事業(2021)。高中選修物理第二冊。第五章。熱學。台南：翰林文教事業。
- 三 李俊明等。中華民國第42屆中小學科學展覽作品輯「蘭克—希爾須渦旋管」。
- 四 王柏翔等。中華民國第51屆中小學科學展覽作品輯「管中世界—冷暖自知」。
- 五 Hitesh R.Thakare。Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review。Renewable and Sustainable Energy Reviews。
- 六 基耐科技有限公司網頁。https://www.g9corp.com.tw