

# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

潛水用呼吸調節器之分析與改良

Analysis and Improvement of SCUBA Diving Regulators

研究生：胡偉強

指導教授：徐瑞坤 教授

中華民國九十七年六月

# 潛水用呼吸調節器之分析與改良

研究生：胡偉強

指導教授：徐瑞坤教授

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘 要

自備呼吸器的水中呼吸裝置，也就是俗稱的水肺潛水設備，主要由高壓空氣桶、以及壓力調節器組成。目前的呼吸調節器作動與效能在設計上欠缺一種能夠作為改良依據理論基礎，設計時只能依靠傳統的經驗法則，以及試誤法反覆的實驗以期得到較佳的結果。

本實驗將利用動態機構(MSC Adams)與模流分析軟體(FLOW-3D)，模擬呼吸調節器在使用時內部氣流場的壓力、流速等分佈。並藉由改變調節器性能的關鍵參數，分析對於調節器性能的影響。相較於傳統上，設計新產品時必須建立出實體模型，透過試驗機台才能了解其效果的方法，而透過本研究所建立的模擬預測方法可以預先了解調節器性能，並有效的縮短產品開發時間。除此之外藉由模擬軟體得到的理論數據，來快速的改良呼吸調節器，已達到更好的性能。

# Analysis and Improvement of SCUBA Diving Regulators

Student : WEI-CIANG HU

Advisor : Dr. Ray-Quen Hsu

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The self contained underwater breathing apparatus - SCUBA set ,consist of compressed air tank and pressure regulator .The development of scuba diving nowadays is based on the invention of regulator. The pressure of compressed air carried by diver must be reduced to the pressure as in environment by regulator before he or she can breath in.If the regulator fail in the water or it can't supply the enough air for diver, the lives of diver would be in serious danger .So the performance and stability of the regulator concern the life of divers .Until nowadays, the design of regulator is depend on the experiences of the designers .Try-and-error is required to get the better results.

In this project, using the Mold-Flow Analysis Software- FLOW-3D, simulation of the air flow in the regulator will be used and analyses of the key factors influence the performance of the regulator will be identified. Besides, we can predict the index performance of regulator by using the analysis result.

Contrary to the tradition process, the performance can be predicted bfore a proto-type is made for experiment when design a new regulator. Therefore, the simulation process by using of FLOW-3D can effectively reduce the time of develop products.

In addition, utilize the results of simulation to improve the regulator for a better performance.

## 誌 謝

首先誠摯的感謝指導教授 徐瑞坤老師，悉心的教導與不時的討論並指點我正確的方向，使我在這些年中獲益匪淺。老師對學問的嚴謹更是我輩學習的典範。

感謝蔡毓斌、林耀楠、梁達嵐學長們不厭其煩的指出我研究中的缺失，且總能在我迷惘時為我解惑，也感謝維堂、昱劭、仁旌、奕超同學的幫忙，恭喜我們順利走過這兩年。實驗室的宣諭、岳賢、柏升學弟及鍾慧學妹當然也不能忘記，你們的幫忙及搞笑我銘感在心。

女朋友郁婷在背後的默默支持更是我前進的動力，沒有郁婷的體諒、包容，相信這兩年的生活將是很不一樣的光景。

最後僅以此論文獻給最敬愛的雙親 胡榮江先生及 宋玉蘭女士，感謝他們多年來的養育與栽培之恩，使我今日得以順利完成學業，也感謝姐姐碧珊即時的關懷與支持。再次感謝所有於生活上與學業上曾幫助過我的家人與朋友，謝謝你們。

## 目錄

	頁次
中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
第一章 序論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機.....	3
1-3 研究目的.....	3
第二章、文獻回顧.....	6
2-1 呼吸調節器之二級頭介紹.....	6
2-1.1 動作原理.....	7
2-1.2 內部元件.....	8
2-2 潛水用呼吸調節器設計目標.....	10
2-3 呼吸功率與阻抗的量測.....	12
2-4 影響呼吸阻抗與功率的因素.....	12
2-5 目前降低呼吸阻抗的方法.....	13
第三章 研究方法與步驟.....	24
3-1 研究流程概述.....	24
3-2 實驗與模擬之參數設定.....	24
3-2.1 分析模型選用.....	25
3-2.2 環境參數.....	25
3-2.3 測試項目.....	26
3-3 實驗部份.....	26
3-3.1 需求式呼吸調節器測試機.....	26
3-3.2 電子壓力計.....	28
3-4 數值分析.....	28
3-5 閥門機構分析 MSC ADAMS.....	28
3-5.1 分析程式 簡述 Adams.....	28
3-5.2 建立模型.....	30
3-5.3 設定連結條件.....	30

3-5.4 測試項目及移動條件設定.....	31
3-6 FLOW-3D 本體內流場分析.....	31
3-6.1 分析程式.....	32
3-6.2 模型與網格建立.....	35
3-6.3 參數設定.....	36
3-6.4 邊界條件設定.....	37
第四章 實驗結果與討論.....	46
4-1 實驗數據.....	46
4-1.1 實驗數據.....	47
4-1.2 討論.....	47
4-2 MSC ADAMS 閥門結構分析結果.....	48
4-2.1 隔膜定速推動.....	48
4-2.2 彈簧 K 值.....	48
4-2.3 閥門機構與吸氣臨界壓力.....	49
4-3 FLOW-3D 本體流場分析.....	49
4-3.1 定吸氣負壓.....	49
4-3.2 定活塞移動速度.....	50
4-3.3 定吸氣流速.....	50
4-4 建立預測規則.....	51
4-5 調節器特徵與效能關係.....	52
4-5.1 導流道.....	52
4-5.2 噴射孔角度的影響.....	53
4-5.3 孔洞大小.....	54
4-6 改良.....	55
4-6.1 改良模型建立.....	55
4-6.2 實驗數據.....	55
第五章 結論.....	68
5-1 結論.....	68
5-2 未來展望.....	68
參考文獻.....	70
附錄 ANSTI 輸出資料.....	71

## 表目錄

	頁次
表 3.1 各種參數實驗模型 .....	39
表 3.2 隔膜壓縮量與閥門開度 .....	39
表 4.1 ANSTI 呼吸調節器測試機實驗數據 .....	56
表 4.2 定吸氣負壓分析數據 .....	56
表 4.3 定吸氣流速分析數據 .....	56
表 4.4 改變流道 FLOW-3D 分析數據 .....	57
表 4.5 改變孔洞角度 FLOW-3D 分析數據 .....	57
表 4.6 改變孔徑大小 FLOW-3D 分析數據 .....	57



## 圖目錄

	頁次
圖 1.1 CLOSED-CIRCUIT REBREATHING [1].....	4
圖 1.2 OPEN-CIRCUIT SCABA [1].....	4
圖 1.3 開放式呼吸調節器元件示意圖.....	5
圖 1.4 二級調節器立體及三視圖.....	5
圖 2.1 調節器爆炸圖.....	16
圖 2.2 調節器內部示意圖.....	16
圖 2.3 調節器剖面圖.....	17
圖 2.4 不同類型之二級調節器.....	17
圖 2.5 調節器做動示意圖.....	18
圖 2.6 本體之立體與三視圖.....	18
圖 2.7 隔膜.....	18
圖 2.8 需求閥.....	19
圖 2.9 閥門做動示意圖.....	19
圖 2.10 排氣鈕.....	20
圖 2.11 ANSTI 呼吸調節器測試機台.....	20
圖 2.12 改良式隔膜 [2].....	21
圖 2.13 特殊的曲面以降低紊流[3].....	21
圖 2.14 半平衡式閥門結構[4].....	22
圖 2.15 可調式需求閥[5].....	22
圖 2.17 增加氣流捷徑[7].....	23
圖 2.18 將咬嘴與排氣閥結合[8].....	23
圖 3. 1 RG9P 二級調節器.....	40
圖 3.2 本體內部特徵.....	40
圖 3.3 ANSTI 呼吸調節器測試機台.....	40
圖 3.4 呼吸模擬器示意圖.....	41
圖 3.5 ANSTI 輸出 P-V 圖.....	41

圖 3.6	電子式壓力計	42
圖 3.7	數值分析軟體選用	42
圖 3.8	ADAMS VIEW 操作介面	42
圖 3.9	彈簧參數設定	43
圖 3.11	隔膜變速曲線	43
圖 3.12	FLOW-3D 分析流程圖	44
圖 3.13	隔膜壓縮量與閥門開度	44
圖 3.14	定吸氣負壓模型	44
圖 3.15	定活塞速度模型	45
圖 3.16	定流速模型模型	45
圖 3.17	定吸氣負壓邊界條件設定	45
圖 4.1	各模型吸氣閥門開啟時臨界壓力比較	58
圖 4.2	各模型吐氣壓力與功率	58
圖 4.3	FREE FLOW 發生	58
圖 4.4	不同隔膜移動速度 F-D 圖	59
圖 4.5	不等速隔膜移動 F-D 圖	59
圖 4.6	不同彈力常數隔膜 F-D 圖	59
圖 4.7	隔膜面積	60
圖 4.8	定吸氣負壓實驗與分析數據比較	60
圖 4.9	吸氣壓力與本體內壓力差	60
圖 4.10	定負壓實驗與分析數據比較	61
圖 4.11	利用 ADAMS 分析出閥門開啟所需的推力	61
圖 4.12	將閥門開啟的推力轉成 P-V 圖中的臨界壓力	61
圖 4.13	利用 FLOW-3D 建立吸氣 P-V 圖中峰值壓力	62
圖 4.14	不同導流道設計比較圖	62
圖 4.15	改變流道後吸氣壓力圖	62
圖 4.16	噴射孔向內 45 度與 90 度	63
圖 4.17	噴射孔向下 60 度	63
圖 4.18	改變噴射孔角度後吸氣壓力圖	63

圖 4.19 孔洞垂直噴射於隔膜.....	64
圖 4.20 噴射孔向下 60 度流線圖.....	64
圖 4.21 噴射孔向內 45 度流線圖.....	64
圖 4.22 噴射孔向內 90 度流線圖.....	65
圖 4.23 改變孔徑大小示意圖.....	65
圖 4.24 改變噴射孔孔徑後吸氣壓力圖.....	65
圖 4.25 孔徑 3.0MM 流線圖.....	66
圖 4.26 孔徑 1.4MM 流線圖.....	66
圖 4.27 孔徑 1.4MM 測試數據.....	67



# 第一章 序論

## 1-1 前言

Scuba (self contained underwater breathing apparatus) 即自備呼吸器的水中呼吸裝置，也就是俗稱的水肺潛水設備。潛水人員潛入水中，可憑借它來自由呼吸。一般水肺潛水中的呼吸器可以大致分為，循環式 (rebreather) (圖1.1)與開放式(open-circuit) (圖1.2)兩種。循環式與開放式呼吸器最大的差別在於，循環式水肺裝置會將呼吸時所排出的空氣加以回收再利用。因為正常呼吸下氧氣的使用率大約為25%，因此透過回收吐出的氧氣，循環式水肺裝置可以大大延長氣瓶使用時間，但循環式水肺設備價格遠高於一般開放式，而且開放式潛水設備使用時間已足以應付一般休閒潛水的使用者，所以現今最常使用也最普及的就是開放式水肺裝置。開放式潛水裝備相對於循環式裝備簡單許多，其中最主要能提供水底呼吸的裝備只需要空氣桶、調節器，而其他完整裝備包括浮力調節器、水深計...等。

現代的水肺潛水(scuba diving)可說是建基於呼吸調節器(regulator)的發明。潛水員的氣瓶在潛水時所攜帶的大量壓縮空氣如果沒有設備可以將壓縮空氣的壓力降低到與周圍的壓力相當時，這些高壓的壓縮空氣對潛水員而言是沒有用的。人體的呼吸器官對於吸入的空氣有壓力的限制，肺部周圍能容許的空氣壓力差不可以超過

0.13 倍的大氣壓力，事實上只要壓差有一點點的變化，都會造成呼吸困難。潛水員如果要在水中舒適的呼吸，供應之氣體則需要與周圍的壓力相當，這也就是調節器的主要功能。調節器能將空氣從氣瓶中導出並將壓力降低到與周圍環境的壓力相同。

調節器基本上分兩部份，一級頭(first stage)及二級頭(second stage)。因為氣瓶持續使用，隨著氣體的流出的氣瓶內的壓力也會減少，而一級頭的功用就是將氣瓶壓力(200atm-20atm)輸出成穩定的壓力(14atm)，然後透過氣喉把空氣送到二級頭，此時二級頭會依據潛水員的吸氣動作，提供環境壓力的空氣供潛水者使用，也就二級頭會依據不同的水深，提供等同於水深壓力的空氣以減少潛水者肺部的負擔，如圖1.3所示。

調節器之功用在於把空氣桶內的高壓空氣自動調節到和潛水時同水壓的程度，調節器在潛水器材中為最精密且是保障潛水者生命的最重要器材。在任何情況下都能保障潛水者有穩定均勻的呼吸，是呼吸調節器的使命。它不僅是在水下呼吸用的器具，對潛水者在水中的浮力控制也起著重要的作用。高品質的呼吸調節器應當不受水深和氣瓶內壓力的影響，提供給潛水者所希望得到的適度空氣量。這只有通過精密的設計和製造專利技術以及嚴密的檢測手段才能實現。

## 1-2 研究動機

在電腦資訊突飛猛進的現在，電腦輔助分析軟體（CAE）在工程應用上提供了產品設計者許多資訊，並在軟體的幫助下減少許多非必要實驗過程，不只可大幅度縮短產品開發時間，同時也提供了準確的產品功能分析能力。歷年來潛水用呼吸調節器的設計與開發，都是到了成品階段透過試驗機台才能瞭解產品的特性，而為了設計出理想功能的呼吸調節器，就必須透過之前累積經驗或是一連串的測試與修改才能滿足消費者的需求，但是現在呼吸調節器的設計目標也不像以往的用途那麼單一，有時候為了應付專業級的深海潛水，或者初學者體力不足等各種情況，在設計上呼吸調節器也必須做適當的設計。

## 1-3 研究目的

本實驗將建立呼吸調節器的分析模型，利用MSC Adams 與FLOW-3D 數值分析軟體，找出在設計上調節器的特徵因素與性能間的關係，而後再依靠電腦輔助分析進行呼吸調節器的設計與修改，取得較佳的設計，並且能與實驗比較，比對實際上調節器的各項性能，進而驗證模擬的準確性。除此之外，將會設計一套分析法，可以在設計呼吸調節器之初，利用數值分析軟體，就能預先得知呼吸調節器的性能。

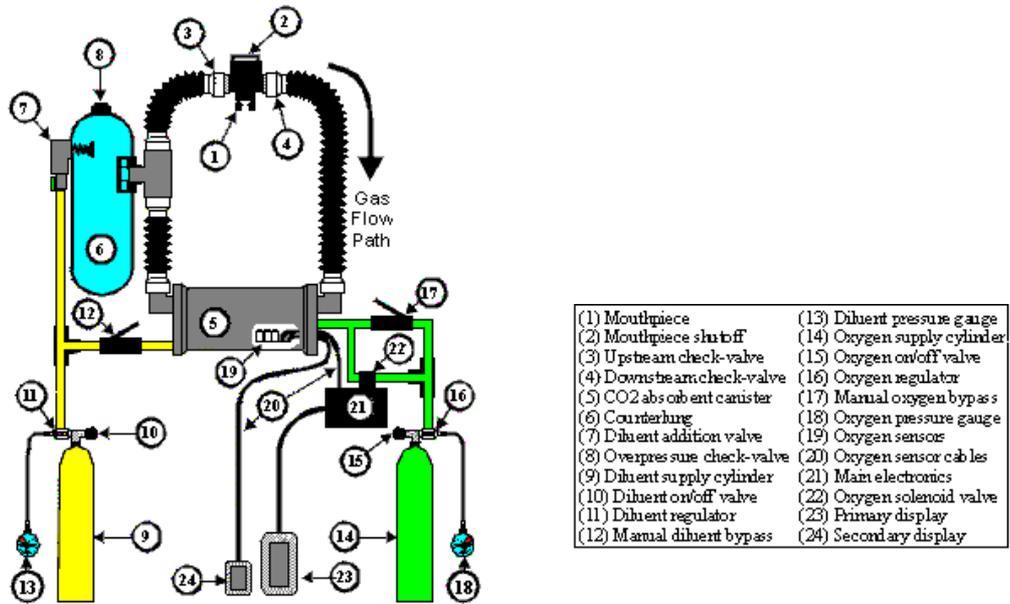


圖 1.1 Closed-Circuit Rebreather [1]

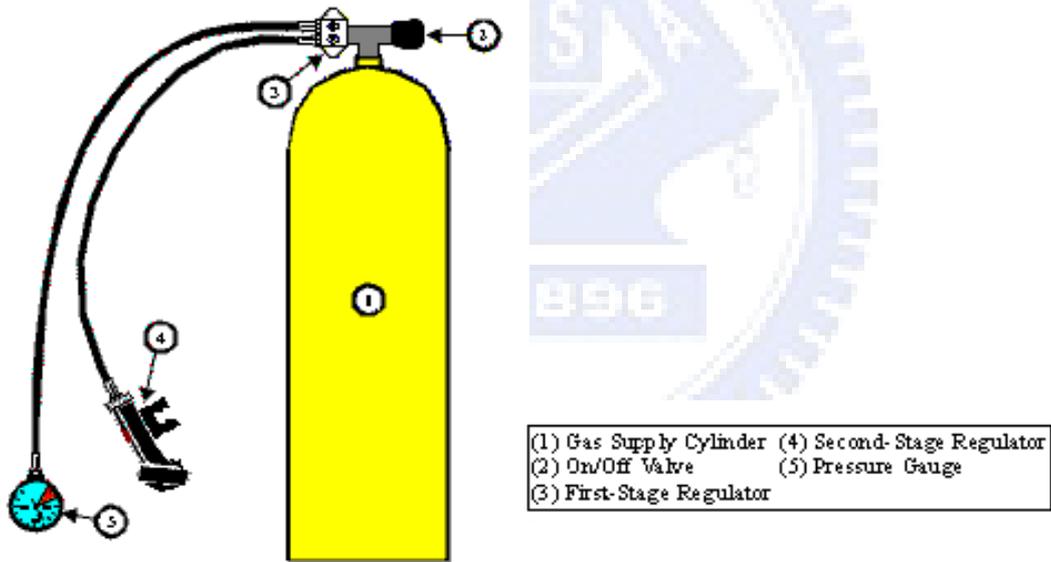


圖 1.2 Open-Circuit Scuba [1]



圖 1.3 開放式呼吸調節器元件示意圖



圖 1.4 二級調節器立體及三視圖

## 第二章、文獻回顧

### 2-1 呼吸調節器之二級頭介紹

一般二級呼吸調節器包含幾個主要部分(圖2.1)，包括本體(housing)、需求閥(demand valve)、排氣閥(exhale valve)、咬嘴(mouthpiece)、隔膜(diaphragm)、排氣鈕(purge button)。其相關位置如圖2.2，以及cad模型剖面圖2.3，含剖面線之右視圖。常見的單管二級呼吸調節器配置方式一般都是以右撇子為設計導向，因此氣體輸入端會在整體的右側，也就是圖2.1中的上方。也有部分設計(圖2.4)，會將輸入端放置於正前方，也就是相對於咬嘴的另一側，因此需求閥開口正對咬嘴。除了單管調節器外，也有雙管輸入但大部分都應用在循環式水肺系統，而雙管調節器會從左右兩端銜接本體，以提供順暢的氣流。

調節器在設計上除了考慮吸氣與排氣的順暢度外，還需要考量排水的能力。因為在潛水時有可能會脫除調節器後又再戴上，此時本體內必定充滿海水，為了能快速排出本體內積水以恢復其功能，調節器的排水性也是相當重要的。為了能達到快速的排水效果，考量到積水的位置，因此排氣閥會設置在整體的下方，然後按下排器鈕，強制將閥門打開，用高壓氣體將水排出。當排氣閥設計在下方時，氣體排出後勢必也在咬嘴的下側也就是臉部下巴附近，為考量到氣體排出後不

能阻擋潛水者的視線，排氣後的氣泡由後方臉頰兩側通過，所以排氣閥的出口角度通常會設置成往後側，也就是咬嘴的同一側。

## 2-1.1 動作原理

目前市面上的單管調節器其作用原理都大致相同，二級頭的功能是將一級頭輸出穩壓氣流再一次降成適合潛水者使用的狀態，並且在潛水者吸氣時開啟閥門提供氧氣，吐氣時順利排除含有較高二氧化碳濃度的氣體。此時閥門的開啟與關閉就必須依靠本體內壓力的高低來判斷。

當潛水者吸氣時，調節器本體內壓力降低，海水壓力促使隔膜凹向內並且推動壓需求閥上的壓桿，進而將需求閥打開引入穩壓氣體。直到吸氣結束閥門還未關上，一級頭持續供應的空氣足以回填腔內壓力，使隔膜回到初始位置並將需求閥關上，完成吸氣動作(圖 2.5)。當吐氣時本體內壓力上升使得隔膜凹向外，因此需求閥不作動，如果持續吐氣壓力大過臨界點，排氣閥將會開啟並排出氣體，所以排氣閥在運作上有如心臟內的瓣膜，只允許單方向的流動，因此排氣閥又有止逆閥或單向閥的名稱。

## 2-1.2 內部元件

### 本體 housing

一般市售二級呼吸調節器的本體多如圖 2.6，其主要功能是結合並架構其他零組件，並且提供內部氣道以及機構運作的空間。內部氣道對於調節器特性影響很大，在設計本體之初已經被決定了。但是以往設計者往往不知道設計參數或是內部氣道對於調節器有何種影響，只能憑經驗或臆測大膽的設計，然後再經由測試機台驗證其性能。因此本體內部的設計沒有比較統一或是制式的標準，只要能功能性符合標準就可以。

### 隔膜 diaphragm

隔膜的種類及大小，有非常多的選擇，但還是以圓盤狀為主(圖 2.7)。其主要功能是用來反應內外壓差，因此必須要使用軟性的聚合物材質，而部分的隔膜都是由矽膠材質以射出機製造。

為了增強與需求閥壓桿重複摩擦造成磨耗的抵抗力，隔膜的中心部份會加以較硬的材質例如輕金屬或是塑膠。此一硬質耐磨步的形狀會配合隔膜外型，在製作上會將此硬質圓盤置入射出機內與隔膜一同射出，增加其耐用度。

## 需求閥 demand valve

需求閥(圖 2.8)是整個二級頭內最精密的零組件，其主要原理是利用隔膜對於壓桿施力造成閥門的開啟或關閉(圖 2.9)。閥門內部有數個主要元件，包括閥門主體、壓桿、閥門，O 型環、彈簧。閥門阻擋住來自一級頭的空氣，等到吸氣時本體內壓力降低才由壓桿開啟。為了提高氣瓶的使用時間，設計上是不允許閥門的漏氣，因此為了增加閥門的封閉性，必須以彈簧施加預力封住閥門。

## 排氣閥 exhale valve

大部分的調節器設計，排氣閥絕本體的下方，除了可以排出氣體外，也可以排除本體內的水氣，排氣閥的特性有如心臟的瓣膜，主要由聚合材質做成。排氣閥有以下四個主要的功能：

- 能反應本體內部任何高於外部環境的壓力，並且將空氣排出平衡本體內壓力。
- 防止本體外的海水進入本體內，也就是止逆閥或單向閥的功能。
- 提供一種較低阻力的方式來改變閥門的開合，並且達到排氣的功能。
- 允許本體內的積水經由排氣閥排出。

## 排氣鈕 purge button

排氣鈕(圖 2.10)於隔膜的外側，當使用者欲在水中排除調節器內的積水時，必須手動開啟需求閥，因此排氣鈕在設計上需採用軟性材質，才能透過按壓排氣鈕，使需求閥開啟達到排氣的效果。除此之外當潛水者在水中前進時，因為隔膜位於潛水者的正前方，因此海水會對隔膜產生沖壓，為了降低海水沖壓對於隔膜的影響，會在前端加上孔洞隔板，此擋板具有阻擋海水沖壓之特性卻又不干涉隔膜與海水壓力之接觸，而排氣鈕也符合此功能。

## 咬嘴 mouthpiece

咬嘴對於呼吸器的性能影響不大，但是其優劣與否有很大的主觀因素在。咬嘴的大小、軟硬對於每個使用者來說，需求都不一，因此在咬嘴的設計上就沒有統一的規範。

## 2-2 潛水用呼吸調節器設計目標

潛水員在選擇調節器時會考慮的幾個重要因素：呼吸輕鬆順暢、氣泡干擾、舒適性佳、調整方便。而其中呼吸順暢對於調節器本身來說是最重要的指標，在正常的情況下，調節器應選擇在最容易呼吸且供氣穩定。但是以上因素都有很大的主觀成分在裡面，為了能將呼吸的順暢加以準確的描述，定義出了呼吸功率以及呼吸阻抗。

## 呼吸功率

呼吸功率的單位是(J/l)，當吸氣與吐氣時平均每公升所耗費的能量。

## 呼吸阻抗

呼吸阻抗可視為，潛水者在潛水狀態下吸吐氣時比在陸地上多提供的壓力。例如當在潛水時為了順利透過調節器排出氣體，必須用胸鏟及嘴巴施加壓力，強迫閘門開啟。而吸氣時一樣為了使閘門開啟而必須產生額外的負壓來達到吸氣的效果，因此這些壓力即為呼吸阻抗。呼吸阻抗值可以廣泛的應用在各種呼吸面罩的產品上，可以代表其呼吸的難易度，例如高過濾型防塵口罩、防毒面具等。

## 理想呼吸調節器

理想呼吸調節器是可以在水中吸吐氣間不需要付出多餘的能量，也就是趨近於零的呼吸功率與呼吸阻抗。但是依據呼吸調節器的運作原理，閘門的開啟必須靠吸氣所造成的壓力差來產生推力，所以幾乎無法達到理想化呼吸調節器的狀態。但是當吸氣流量夠大的時候，或者本體內流速夠快，依據伯努力定律速度越快壓力越低，此時已經不需靠吸氣負壓來維持閘門的開啟，除此之外還可以提供額外的正壓給

使用者。因此好的呼吸調節器雖然無法像理想化的調節器達到零呼吸工率，但是能夠藉由主動提供正壓給使用者，來降低吸氣時的阻抗值。

一般情況下呼吸阻抗越低越好，但在某些特殊的情況下，潛水員可暫時的增加調節器的呼吸阻抗，以防止調節器因阻抗過低，造成Free-flow的情況發生。如果潛水員想節省空氣的使用量時，也可以些微增加調節器的呼吸阻抗，不過太長時間的高呼吸阻抗也會增加空氣的消耗量，原因是潛水員的肺部必須費力的作動來克服增加的呼吸阻抗，在長時間的呼吸阻抗下，為了補充氧氣的不足，以致增加了呼吸頻率及呼吸量。增加呼吸阻抗可能會導致潛水意外的發生，大部分情況為了安全以及初學者考量，多以低呼吸阻抗為設計目標

### 2-3 呼吸功率與阻抗的量測

呼吸功率與阻抗的量測是利用ANSTI測試機台如圖2.11，此測試機可以模擬人體吸氣時的情況，記錄下咬嘴的壓力來反應潛水者使用時的呼吸阻抗，並計算吸入一公升的氣體所耗費的能量。

### 2-4 影響呼吸阻抗與功率的因素

影響呼吸阻抗的因素可以歸納以下幾項

- **伯努力定律** 依據伯努力定律中，在相同條流線下，或是能量相

同的流體，速度越快其壓力越小，反之速度越慢壓力越大。如果在不改變入口端的氣體壓力下，能加快本體內部的氣體流速也就能有效率的降低呼吸阻抗。如果能在相同的吸氣量，有效的降低本體內部的壓力，提高隔膜兩側壓力差，造成較大閥門開度，這樣也不失為一種降低呼吸阻抗的方法。

- **下潛深度** 下潛深度會提高呼吸阻抗，因為中繼壓力固定為14大氣壓，當海水壓力越大，環境壓力與供給壓力的差別就越小，而且此時空氣密度會增加，降低氣體的流動性，總總因素都會使得在水深的環境下提高呼吸阻抗。
- **供氣閥** 供氣閥門又可以稱作需求閥，當潛水者在有需要時才會開啟供氣閥。良好的需求閥設計可以降低其內部的機械摩擦阻抗。需求閥內部主要零件包括：閥門、壓桿、彈簧等。當隔膜推向壓桿時，為了降低摩擦力，會在壓桿頂端設置滾輪。除此之外降低閥門開關做動時的摩擦阻力，對於降低呼吸阻抗來說也很有幫助，因此有許多專利[2]~[8]在探討如何提升需求閥的性能。

## 2-5 目前降低呼吸阻抗的方法

為了能在水中提供穩定且順暢的氣體，各家廠商紛紛提出各種設計概念以及專利。

Douglas J. [2]提出一種調節器用隔膜新的設計(圖2.12)。在調節器上使用的隔膜改良其製造方法，將低摩擦阻抗的材料一起成形在隔膜中間。而其低摩擦阻抗的材料使用金屬平板，並且在金屬平板上電鍍一層耐氧化耐的材質。而隔膜在射出成型時，金屬平板將置於模具內一同射出，並且包覆其隔膜裡外兩側，加強隔膜與金屬的固定。

Hansen[3] 利用平順的本體內部流道(圖 2.13)，降低呼吸阻抗。其專利內容宣稱，調節器的本體內有曲形型的平面可以使氣體以層流的方式流到吸氣端，並且降低紊流的發生。這曲形平面也可以降低吐氣時，氣體回流的發生，除此之外還限制了氣體的分離層的產生。如此設計可以大幅降低呼吸阻抗。

Christianson[4]提出一種新的半平衡式機械閥結構(圖 2.14)，可以在高空氣流量不受到摩擦力的影響。需求閥內的彈簧機構被固定在軸向的兩端，當壓縮時可以消除與壁面所產生的摩擦力。而其需求閥內的動態閥門被固定在油封環以及壓桿間，可以避免與滑軌間的阻抗。而在壓桿旋轉軸裝上球行軸承，可以提高壓桿運作的穩定性。

Ferguson[5]一種改良式的機械結構(圖 2.15)，可以調整需求閥內彈簧預載，藉此改變呼吸阻抗。需求閥內的彈簧是為了施加預力在關閉閥門上，當吸氣需開起閥門時，首先就要克服閥門上彈簧的壓力。但是為了防止彈簧的疲勞，彈簧預載往往會大於所需要的量，而

增加了吸氣阻抗，為此在需求閥的另一端裝上一個調整彈簧預載的旋鈕，並且將旋鈕延伸出本體外，藉此使用者可以自行調整適合自己的彈簧預載。

Garraffa [6]利用海水壓力來推動內部機構(圖 2.16)，進而改變內部氣道。當潛水者潛至越深的環境下，對於空氣的需求也會不一樣。因此在本體內保留一獨立且隔絕的空間，並且用活塞與外界壓力做平衡，當海水壓力增大就會向內推動活塞，而活塞再向內推動隔板，此時就可以利用水壓來改變內部本體流道。

Belloni [7]將需求閥與吸氣出口端設置捷徑，以降低氣體流動時的干擾(圖 2.17)。一般需求閥，閥門打開後氣體還需流經彈簧，壓桿等機械結構，當氣體經過那麼多干擾組件後，流速與壓力皆會降低。如果在需求閥與吸氣出口端設置一管道，可以將進氣閥的衝壓直接傳遞至口腔前，以降低吸氣阻抗。

Brown [8]在調節器的咬嘴處直接設置單向閥以及排氣閥(圖 2.18)，傳統的排氣閥都設在整個調節器的最下方，因此當氣體從嘴吐出要經過中間的壓桿等機械結構。為了提高排氣的順暢性，直接將排氣閥設在咬嘴旁邊以降低排氣時的順暢性。

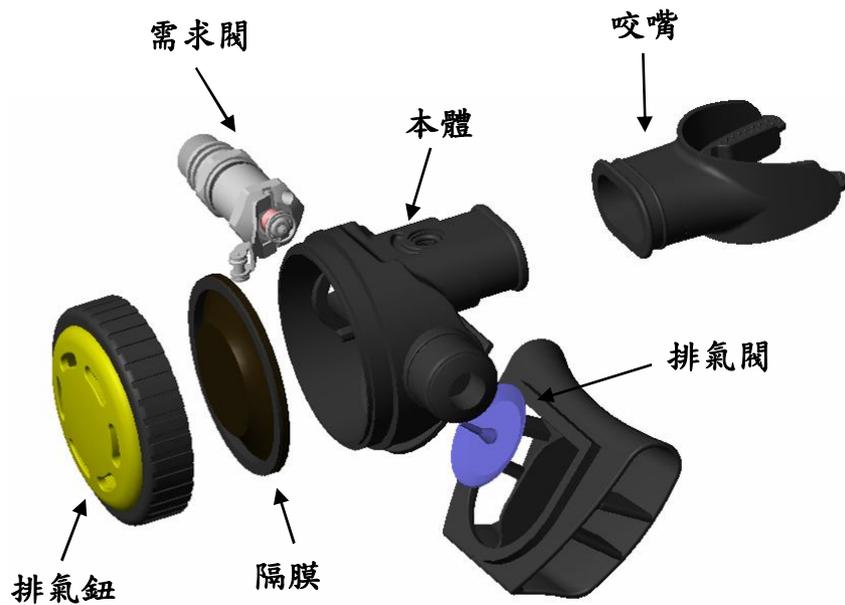


圖 2.1 調節器爆炸圖

一級頭輸入的空氣

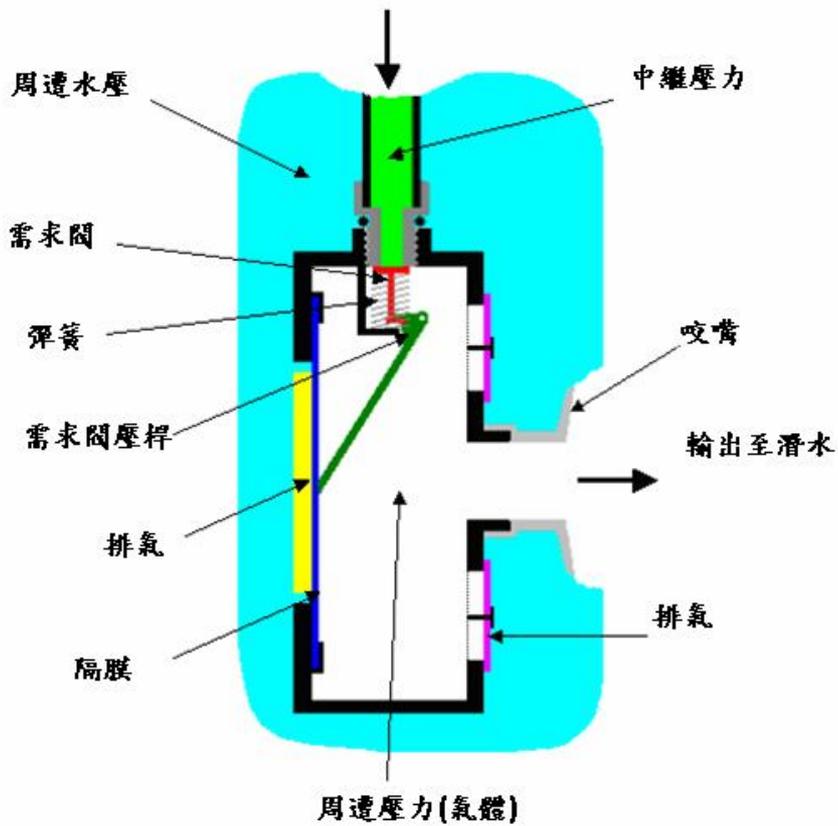
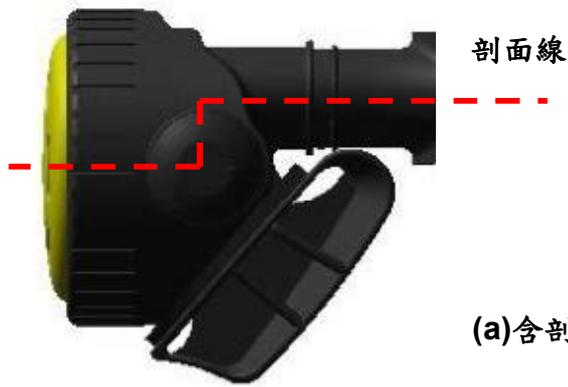
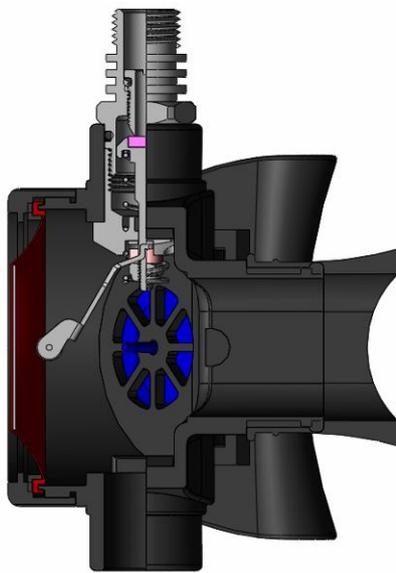


圖 2.2 調節器內部示意圖



(a) 含剖面線之右視圖



(b) 剖面之上視圖



(c) 無剖面上視圖

圖 2.3 調節器剖面圖



圖 2.4 不同類型之二級調節器

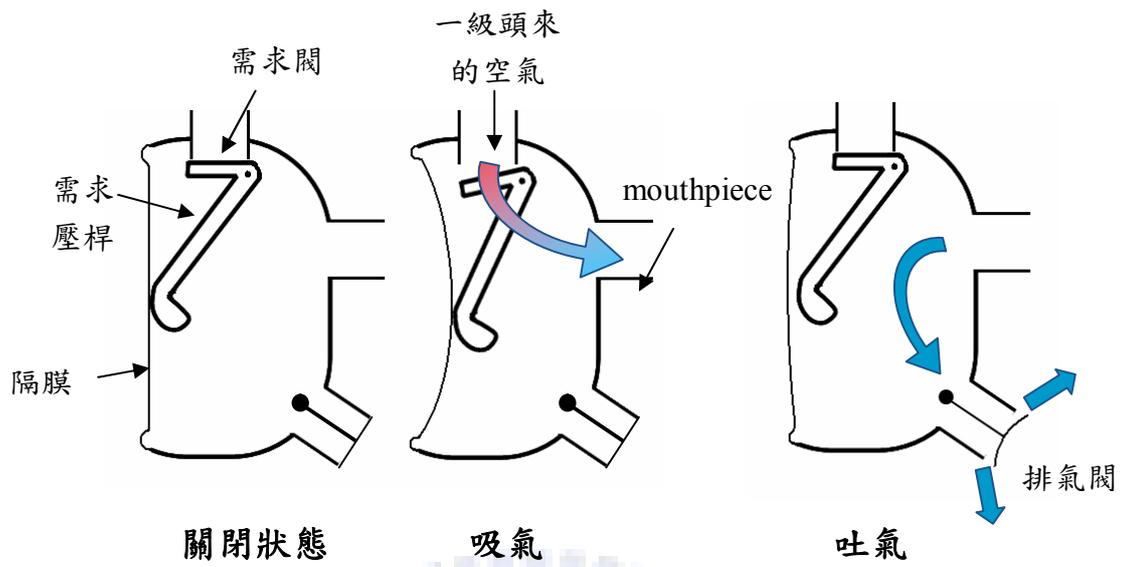


圖 2.5 調節器做動示意圖

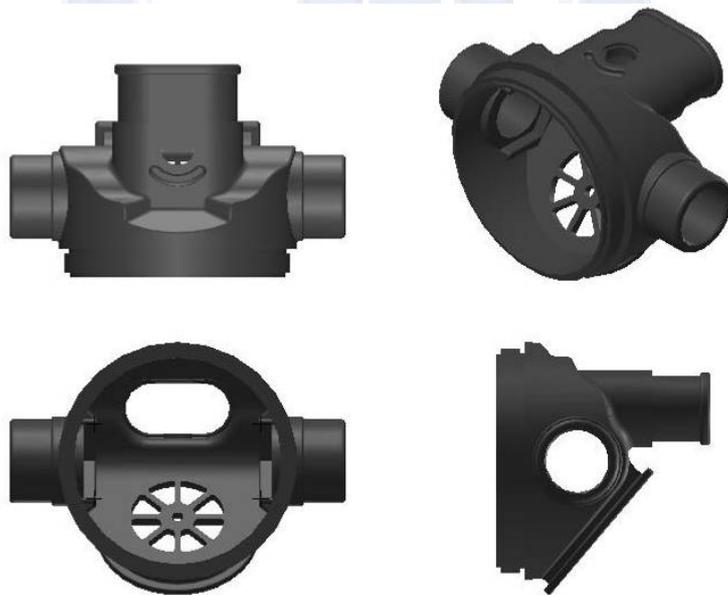


圖 2.6 本體之立體與三視圖



圖 2.7 隔膜

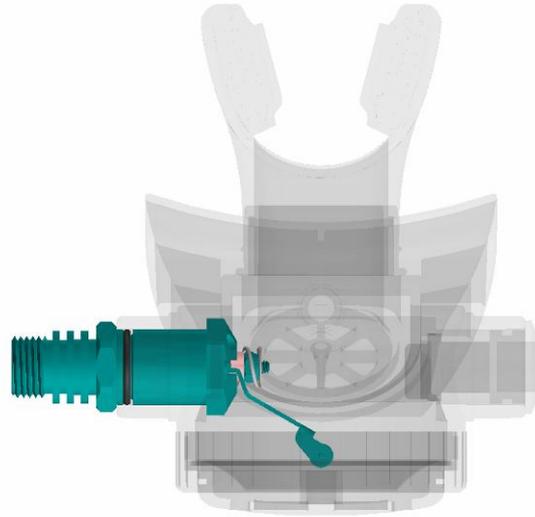
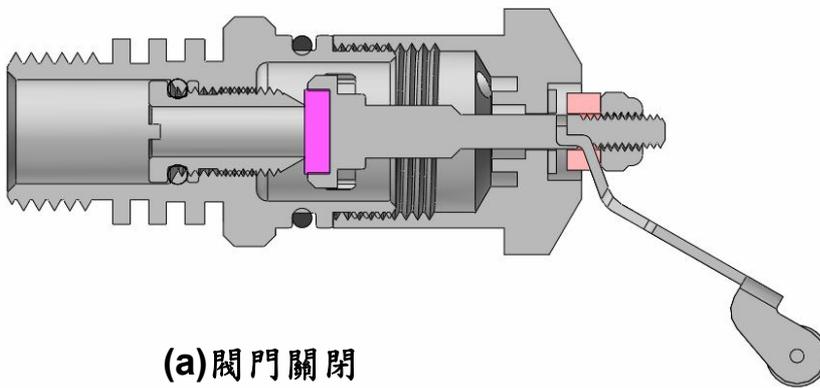
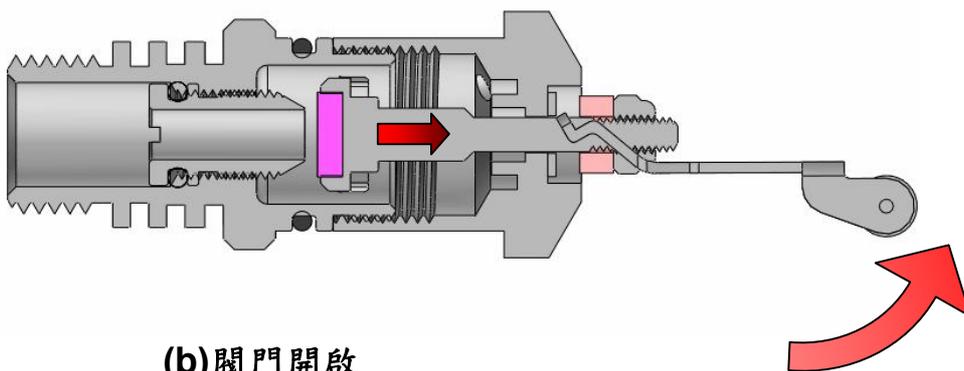


圖 2.8 需求閥



(a) 閥門關閉



(b) 閥門開啟

圖 2.9 閥門做動示意圖



圖 2.10 排氣鈕



圖 2.11 ANSTI 呼吸調節器測試機台

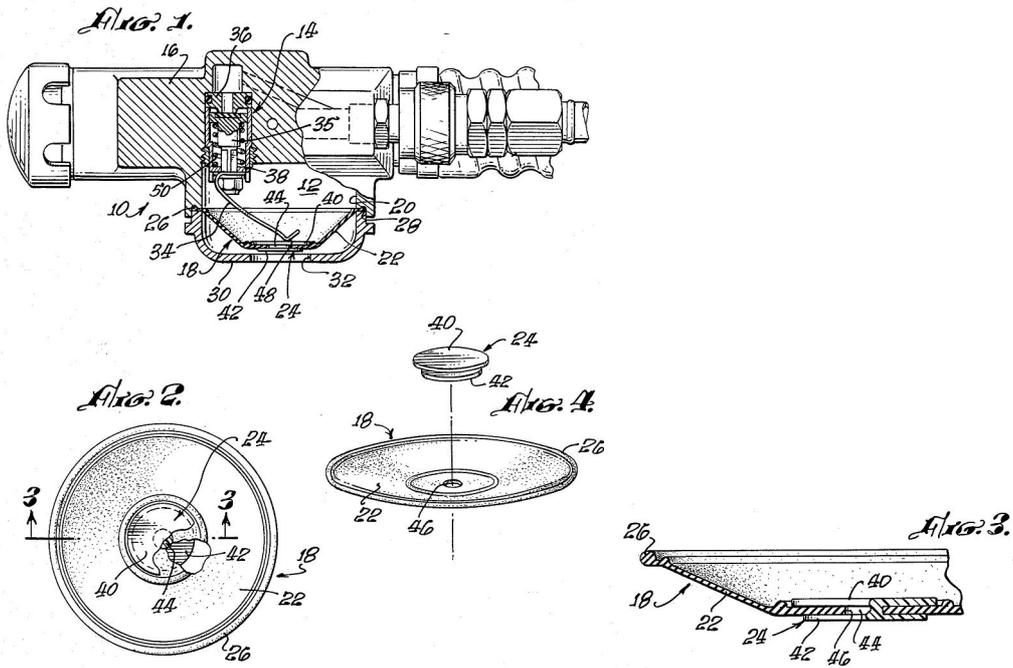


圖 2.12 改良式隔膜 [2]

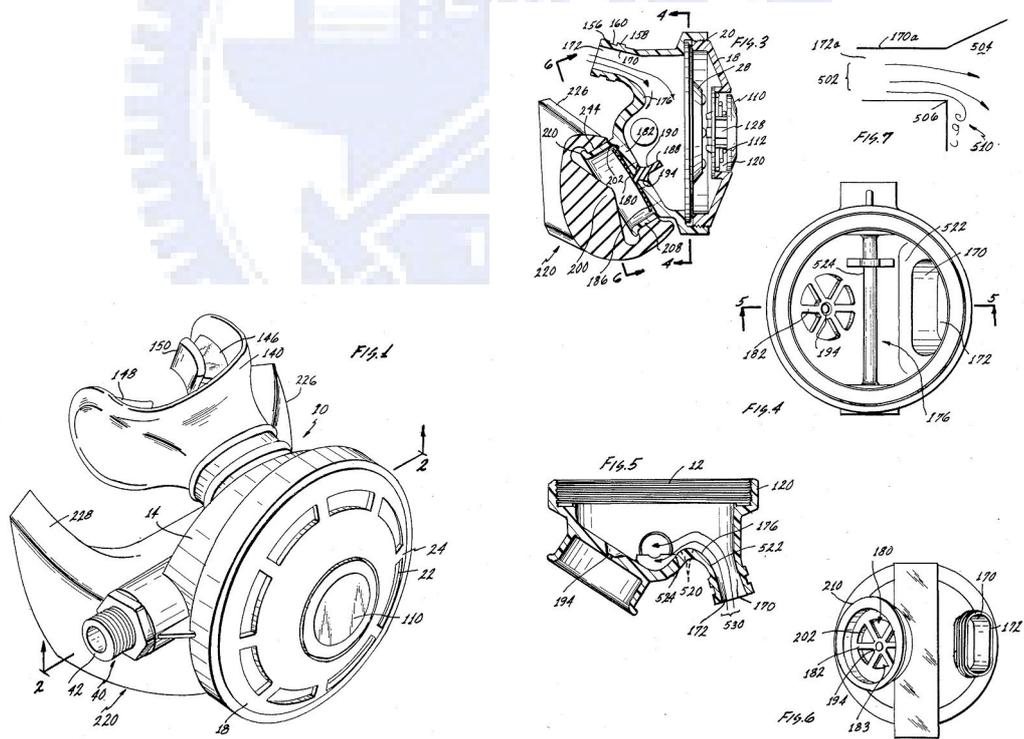


圖 2.13 特殊的曲面以降低紊流[3]

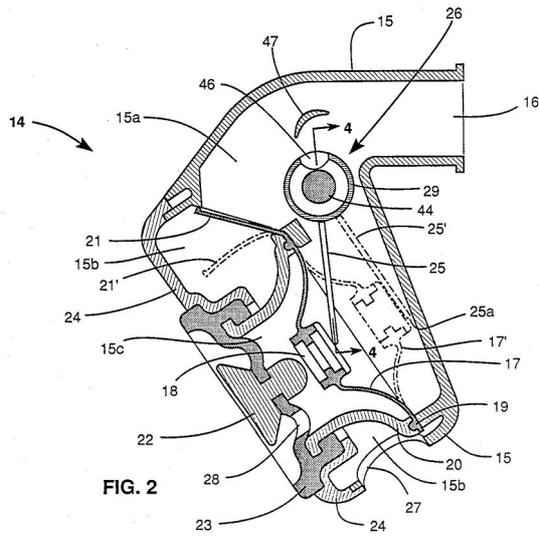


圖 2.14 半平衡式閥門結構[4]

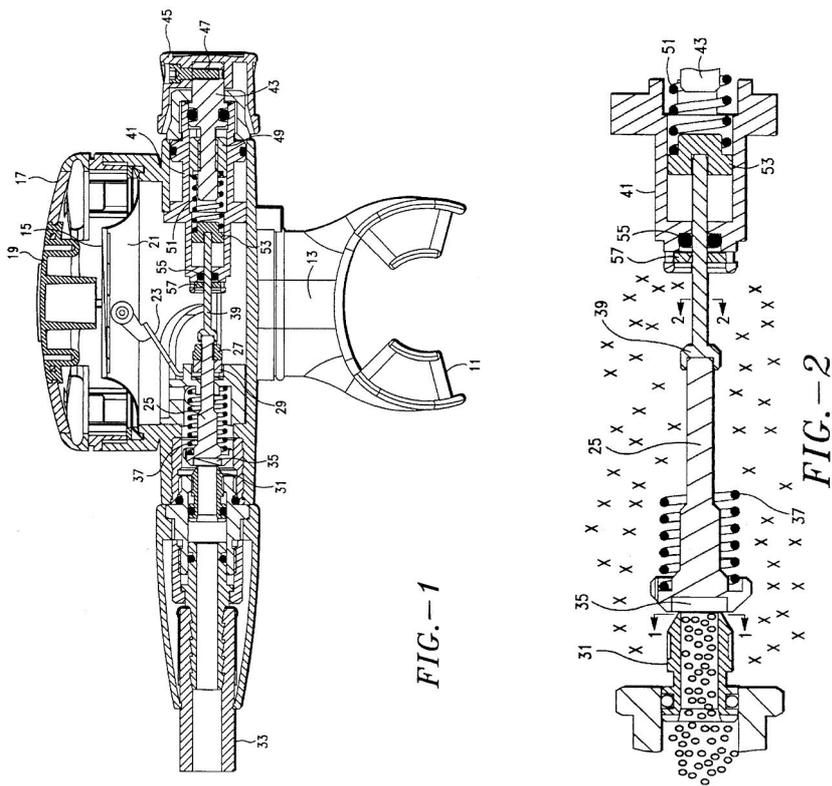


圖 2.15 可調式需求閥[5]

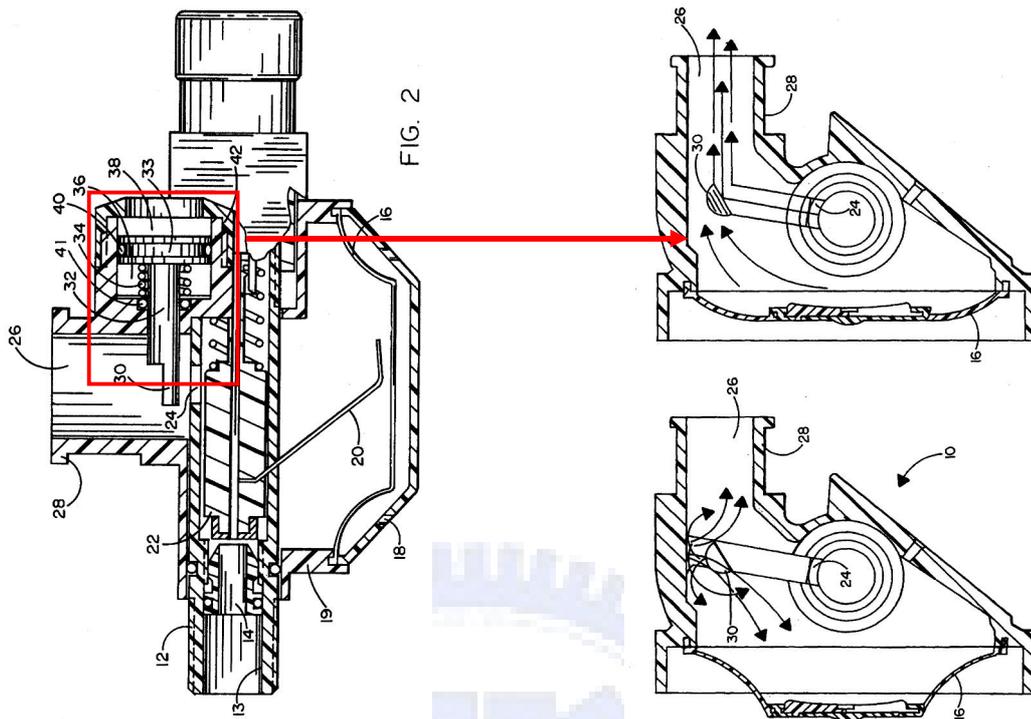


圖 2.16 隨著環境水壓改變氣道[6]

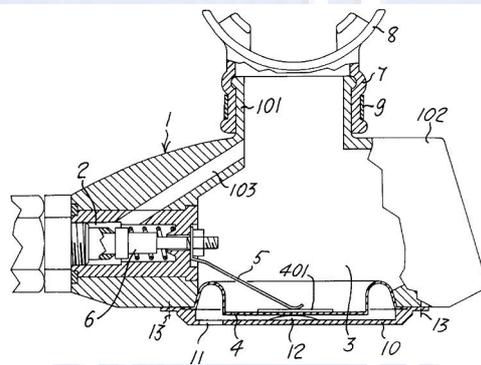


圖 2.17 增加氣流捷徑[7]

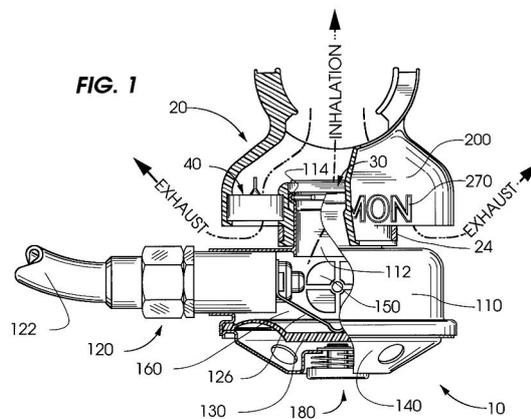


圖 2.18 將咬嘴與排氣閥結合[8]

## 第三章 研究方法與步驟

### 3-1 研究流程概述

本研究目的即在於找出調節器內部特徵參數與其性能之間的關係，以及設計出一套可以預測調節器性能分析方法。因此本研究之流程將分成兩個階段，第一階段先建立分析模型，並且找出影響調節器性能的各個參數間關聯性。而第二階段將以此分析流程以及參數探討改善呼吸調節器的可能性，並且製作改良後的模型實際測試。

第一階段主要建立模擬與實際的相關性，因此在初步規劃會設計幾組呼吸調節器，改變其中的特徵作為實驗的控制變因，在擬定的控制變因下建立分析模型與實體實驗的相關性。

在第二階段則利用電腦模擬輔助設計，設定不同的參數，包括本體體積大小、隔膜面積、氣道曲線、以及相關位置等，分析各種參數對於調節器的性能影響，進而改良調節器性能。最後在實際做出成品，以實驗測試機台測試並驗證分析模型的準確性。

### 3-2 實驗與模擬之參數設定

在第一階段中，為了能比較數值分析的準確性，必須統一設定實驗時的環境參數與測試條件。除此之外，也必須選用相同調節器模型。但是為了能找出調節器中影響性能的特徵參數，必須增加調節器

的控制參數組合，並且以多組數據來驗證模擬的可行性。

### 3-2.1 分析模型選用

分析模型以輝洋有限公司出產的呼吸調節RG9P為對象(圖3.1)。RG9P屬於一般非平衡式二級調節器，內部有一組需求式閥門，閥門開啟時的氣流被導流道引進吸氣口，而在吸氣口前端有一可調式導流板，使用者可以調整導流板的角度的，調整範圍從與流體方向平行的0度到垂直的90度。本體內部有兩個上下排列的噴射孔洞將氣流導引到隔膜上。為了能快速的製作實驗用調節器的控制變因，將改變本體內噴射孔的數目以及導流片的角度的作為控制變因(圖3.2)。5組實驗模型的噴射孔與導流板角度的特徵列於表3.1。

### 3-2.2 環境參數

測試環境的變數有環境水深所產生的壓力、一級調節器供氣壓力等。

**氣體供給**— 氣瓶經過一級頭降壓後會輸出穩定的中繼壓力，可以不受因鋼瓶氣體使用減少造成壓力降低，所以輸入端的壓力可以設定為固定值。但是可能會依一級頭的性能優劣，而影響到供氣流量值，所以在第二階段輸入端可能要依據現有產品實際作用時之數值做些微的調整。

**環境水深**— 海水會直接接觸隔膜，而隔膜平衡了內外壓差，使得內

部空氣壓力與海水相當，造成空氣壓力較大對於呼吸阻抗有相當的影響，在測試中將會以50 M深度作為測試的標準，這深度是一般市售調節器的極限深度，也是一般業餘潛水員最深的使用環境，在此極限下呼吸功率值不得因為過大的環境壓力使呼吸功率值超過1.5，如果能不因深度影響保持在1.0附近最佳。

### 3-2.3 測試項目

呼吸容積率是將呼吸頻率與單次呼吸的容積整合成一起，就可以表示為呼吸容積率(Respiratory Minute Volumes, RMV)，單位為每分鐘內的呼吸容積。主要測試62.5 RMV—以2.5公升單次吸氣量乘上每分鐘頻率25次，相當於潛水員在激烈活動中的換氣量，也是歐洲EN250（測試標準），美國海軍也主要依此來測試調節器。

### 3-3 實驗部份

#### 3-3.1 需求式呼吸調節器測試機

此測試機台是由 ANSTI 公司製造如圖 3.3，可以測試整組呼吸調節器，包括一級頭、二級頭的呼吸阻抗、功率及壓力等。而測試機台可以分成三個部分。

- ◆ **環境產生裝置** 呼吸產生機可以製造與人類相同的往複式吸氣動做，其原理是利用連桿與驅軸帶動汽缸內的活塞(圖3.4)，並將汽缸頂的出口端連接著調節器的咬嘴部分，活塞在汽缸內往復

運動就有如常人呼吸。而變驅軸的轉速就可以達到各種狀態下人的呼吸頻率，改變驅軸半徑就可以改變單次呼吸的吞吐量。為了產生與深海般的壓力環境，將調節器置於高水壓的加壓密封槽內，來模擬海水的環境壓力。除此之外，調節器的輸入氣壓也必須提供，因此需要一台空氣壓縮機，負責提供各種情況時的氣瓶壓力，並且可以給密封槽內加壓，以達到海水壓力的環境。

- ◆ **各項感測器** 為了能控制並且取得有效數據，此機台上有各種的感應器或壓力計，包括：水深壓力、中繼壓力、吸氣負載、腔內壓力等。
- ◆ **資料紀錄運算裝置** 將感測器接收到的咬嘴壓力 $P$ 與活塞變動的體積 $V$ 描繪出的曲線，即為 $P$ - $V$ 圖如圖3.5所示。圖中橫軸以上曲線表示吐氣時的狀態，因為吐氣時必須以正壓排出氣體。而吸氣時為了讓需求閥做動，本體內部壓力必須為負，所以橫軸以下曲線表示吸氣時的狀態。兩條曲線頭尾相接，以順時針方向繞完一圈可以代表完成一次呼吸的動作。將上下曲線與橫軸包圍的面積分別對橫軸積分起來就可以得到呼吸功率。
- ◆ **實驗參數及設定** 利用呼吸調節器測試機台做為量測呼吸阻抗的儀器。其測試機可以自行定義所需的環境參數，因此可以直接將現有產品置入機台中做測試。

### 3-3.2 電子壓力計

電子式壓力計如圖 3.6 所示，移除調節器的排氣鈕以及隔膜，然後將調節器本體置入測量台上，將壓桿對準壓力感應裝置。轉動測試台升降手把，緩緩的將測試台上升，進而對於壓桿施加力量，最終可輸出閥門開度與壓桿施力圖。

### 3-4 數值分析

依據第二章中呼吸調節器的運作原理，呼吸調節器在運作時有本體內部氣壓與氣流的關係，與壓力造成隔膜的推力，以及隔膜推力與閥門彈簧間互相作用的情況造成了呼吸時的阻抗，為了能將以上狀況利用數值分析軟體模擬出來，必須將調節器的內部運作情形分成機構與流體兩部份(圖3.7)。閥門機構則藉由AMS Adams的動態分析軟體進行分析，而本體內氣流場分析將使用FLOW-3D模流分析軟體。

### 3-5 閥門機構分析 MSC Adams

#### 3-5.1 分析程式 簡述 Adams

Adams 軟體是由美國 MDI (Mechanical Dynamics, Inc.) 公司開發的，由於其優異的“虛擬樣機”技術，使 Adams 軟體迅速發展成 CAE 領域中使用範圍最廣、應用行業最多的機械系統動態模擬工具，占據了該領域 53% 的市場 (Daratech 數據)，許多國際化大型企業

均採用 Adams 作為其機械系統動態模擬的主要平台。在 2002 年 MSC 公司以 1.2 億美元現金收購了 MDI 公司，從此 Adams 成為 MSC 公司的產品，稱為 Adams。Adams 可用於建立複雜機械系統的“虛擬樣機”，在真實工作條件下真實地模擬所有運動，並且快速分析比較各種設計，直到獲得最佳的設計方案，從而減少昂貴的物理樣機、提高產品設計水準，大幅縮短產品開發周期和開發成本。

其中 Adams 內建的模組有以下

Adams/Car Package  
Adams/Solver Package  
Adams/Engine Package  
Adams/Flex  
Adams/Vibration  
Adams/View  
Adams/Exchange  
Adams/Car Suspension Design Libraries  
Adams/Controls  
Adams/Durability  
EASY5 - Adams Combined Hydraulics Package

### **Adams 模組 - Adams/View**

使用 Adams/View，使用者可以像建立物理樣機一樣建立任何機械系統的虛擬樣機(圖 3.8)。首先建立運動部件（或者從 CAD 軟體中導入）、用約束將它們連接、通過裝配成為系統、利用外力或運動將他們驅動。為了提高模擬的精度，也可以在模型中使用彈簧、阻尼器和摩擦等。Adams/View 支援參數化建模，以便能很容易地修改模型並

用於實驗研究。使用 Adams/View，使用者在模擬過程進行中或者當模擬完成後，都可以觀察主要的數據變化以及模型的運動。這些就像做實際的物理試驗一樣。

### 3-5.2 建立模型

為了建立 amdamms 下所使用的模型，必須在 CAD 軟體下編輯其相關位置以及零件特徵，並且刪除部份沒用到的零件後，再組零件下存成 parasolid 的檔案，然後匯入 Adams 中。

為模擬隔膜推力與壓桿位移等相關性，因此刪除了導流片、排氣鈕、等零件，而隔膜則簡化成單一圓板型鋼體置於調節器前端，也就是原本隔膜的位置。

### 3-5.3 設定連結條件

在 Adams 下零件間可以兩兩互設連結關係，有直線滑動，旋轉等條件。但是在預設情況下，物件干涉時是不會發生碰撞的情況，必須對於會干涉且互相接觸碰撞的零件設定其碰撞參數，而摩擦力的設定是在碰撞下可以設定。本體及閥門主體與空間設為鎖定，限制其自由度。閥門設定直線滑動，自由度為 1。限定隔膜為直線移動，將隔膜與壓桿設定為接觸。

彈簧是設定於閥門與本體間，依據測試標準，彈力常數設為 1.7N/mm，而預載設定為 2.38N，其參數設定如(圖 3.9)。

### 3-5.4 測試項目及移動條件設定

利用 Adams 作為模擬工具，最主要的是需要得到閥門開啟時隔膜推力與位移等關係，而在過程中將會有隔膜移動速率，隔膜移動方向，隔膜推力等變數。因此在移動條件設定上將會有以下幾種變化。

首先測試隔膜在各個位置與推力的關係，因此設定隔膜以緩慢固定速度向前移動壓桿，速度設定在 10 mm/s、15mm/s(圖 3.10)。同時測速度對於推力的影響。接下來測試在變速度移動下的反應(圖 3.11)，中途停止再啟動後摩擦力與黏至力對於推力的增加。

### 3-6 FLOW-3D 本體內流場分析

第一階段主要是驗證模擬的可行性，為了能讓模擬更接近測試機台的條件，FLOW-3D的邊界條件設定也必須符合ANSTI測試機中的相關特性。測試機是利用活塞的往復運動來達到模仿人類呼吸時的動作，為了能準確的模擬測試機中活塞所造成的負壓吸氣，必須測試FLOW-3D下(General Moving Objects, GMO)效果，進而加入部分動態組件，確定組件在FLOW-3D下可以進行動態運動來達到實體活塞的效果。

如果以GMO進行模擬的結果不如預期，例如發生不可收斂或是運算時間過久，就必須降低模擬複雜度，因此假定活塞所造成的氣體流動速率與活塞相同，進而定義邊界條件為固定吸氣流速。

除了以實際機台作為模擬時邊界條件的參考設定外，考量到測試機台輸出一個重要資料就是出口端的吸氣負壓，因此將在邊界條件定如同測試機台輸出的負壓值，看是否能反映出不同的隔膜推力，來達到區別不同控制變因的效果。

總結本有限元素分析將會以三種方式進行，如圖3.12，在相同的模型與測試環境下，以三種不同的邊界條件模擬分析，找尋最佳的方法。

### 3-6.1 分析程式

本研究是以 solid work 軟體作為模型建立工具以及 FLOW-3D 前處理與有限元素法分析之具。在電腦資訊突飛猛進的現在，許多利用電腦輔助分析軟體 (CAE) 軟體在工程應用上提供了產品設計者許多資訊，並在軟體的幫助下減少許多非必要實驗過程，不只可大幅度縮短產品開發時間，同時也提供了相當準確的趨勢，這對於科學上的研究有相當大的幫助。並隨著高速電腦的普及及進步，數值化的方法被廣泛應用在模流分析軟體上，且因電腦運算能力不斷提升，數值分析的技術與計算效率也提升。

### Flow 3D 介紹

FLOW-3D 是由美國 Flow Science Inc. 所製作，可以研究液體及

氣體的動態行為，是專門用來作模流分析的一種軟體，例如可以用來做壓鑄模穴之充填分析、熱傳分析、料管波形分析等等。由於理論基礎乃是根據流體力學之連續方程式、動量方程式以及白努力定理等等，因此幾乎可以應用在各種流動型態。計算液體自由表面時則以VOF法 (Volume Of Fluid Method) 為主，不但能夠模擬複雜的流體行為，還可避免大量的記憶空間浪費並節省計算時間，採用的數值方法為有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)。本套軟體本身即有前處理器，也就是可以建構簡單的幾何圖形，並具有網格建立的功能。其網格切割法為矩行網格，相當容易建構，其軟體以FAVOR (部分面積/體積) 法表示幾何，可以在矩行且較少的網格中表現平滑的圖形。

FLOW-3D 經由有限差分法的計算之後，可以提供使用者流體充填過程的流動模式、壓力場分佈、速度場分佈、冷卻熱傳分析以及凝固分析等等，使用者可以藉由這些資料評估判斷出整個充填過程將會有什麼樣的缺陷並修正原來的設計。

## GMO

FLOW-3D 裡面的一般移動物件 (GMO) 模組可以模仿剛性物體的運動，不管是使用者自行定義動作 (*prescribed motion*)，或是與流體間相互運動 (*coupled motion*)。在 *prescribed motion* 下流體會

受到物件的影響而做動，但是物件不受流體影響，而在 coupled motion 下物體與流體會互相的影響。在兩種模式下皆可獨立定義物件各軸向運動，包括沿單軸移動或旋轉，或是單獨限制單軸的運動量等。

一般移動物件（GMO）模組已擴充成可以處理多個交互作用之 GMO 元件與其他運動中或靜態物件的碰撞行為，包括設定為牆或對稱的網格區塊邊界。此一重要的改良使得使用者可以更真實的模擬流體中多個剛體的交互運動。

此版本導入了不同方向軸上線性的 GMO 位移限制器，以實現旋轉物體在角度上所遇到的位移限制。限制方式為定義每個方向軸上的最大位移量，每個軸方向兩個數值分別代表正負向的限制。這些線性限制器為諸如來自機械裝置的物體移動限制條件提供了簡單的設定方式。

另一個與 GMO 有關的新增功能是壓力的隱性求解方式，這是為了能更精確描述移動物體與流體間的交互作用。當模擬輕質物體在流體中運動所產生的耦合運動行為，以及當所加上的質量與 GMO 質量相當時，這都是一個相當有用的求解選項。

GMO 模組已經完全擴充為支援圓柱座標系統，這使得原來的移動障礙物模組將被棄置不用。我們強烈建議原來使用舊模組的案例全

部改用新的GMO模組，只要將參數  $IMO(NO B)=\pm 1$  修改為

$IMO(NO B)=3$ ，其中 NOB 代表元件編號，其他參數都不需更動。

然而因為 FLOW-3D 採用的是矩形網格及有限差分法，因此本身也存在著某些優缺點：

優點：

- 網格切割為矩形網格，容易建立。
- 由於網格簡單，因此求解較為容易。

缺點：

- 假如函數定義域為複雜的幾何圖形，有限差分法在處理邊界條件時並無法有效近似。
- 處理邊界條件時並不容易

在做切割時必須盡量做均勻等長度的切割，使得求解的結果更為正確。

### 3-6.2 模型與網格建立

依據現有的產品的 CAD 模型對 RG9P 呼吸調節器做修改，先將本體部份獨立出來，利用布羅運算反向繪出內部主要本體 3D 圖型。調節器中的隔膜元件是橡膠材質，所以會產生饒性的變形，因此在每個閥門開度下都會有不同的外型(圖 3.13)，又因為隔膜是屬於本體內部其中一個曲面，所以不同的外型隔膜對於本體內部的負壓產生的推

力也會不一樣，因此依據閥門開度將隔膜變形設定成四個階段(表 3.2)，此時決定了本體的形狀。

在三種不同邊界條件中，將統一使用相同的中開度模型進行分析，假設遇到流量不足或是過量，才進而調整閥門開度為小或大。不過為了因應三種不同邊界條件的設定，在本體模型繪製上也有不同的特徵，如下面所示。

**定吸氣負壓(圖 3.14)** 定吸氣負壓的模型直接將本體與內部元件匯入即可。

**定活塞速度(圖 3.15)** 模型主要參考 ANSTI 呼吸測試機中的往復活塞運動，但是為了有效利用網格，將活塞與汽缸截面設計成正方形。其中後方的長方柱的體積為一次呼吸量的容積，也就是 2.5L。

**定流速模型(圖 3.16)** 定流速主要是簡化定活塞速度的模擬，因此不需要過多的汽缸體積，並且也簡化了活塞的零件。

### 3-6.3 參數設定

#### 初始條件設定

模擬的初始條件參數為本體內起始的壓力，在本體內部以及隔膜外側皆須設定初始氣體，並且其壓力必須依照當時水深作調整，如果欲測試水深為 20m 則環境壓力大約為 3atm，此時初始壓力就必須與

環境壓力相等。

### 3-6.4 邊界條件設定

三種不同邊界條件設定差別只在於出口端，入口端的部份以同樣狀態供應氣體。

#### 入口端邊界條件

實際情況輸入端是由一級頭輸入的穩定的壓力，此壓力範圍在 14~14.5atm 之間，看使用狀態以及一級調節器性能而定，在 FLOW-3D 下模擬時，此輸入端的邊界條件將設為 14atm。

#### 出口端邊界條件

##### a. 定吸氣負壓

參考呼吸 P-V 圖中的縱軸 P 為吸氣壓力，吸氣壓力是在本體的出口處量測出來，因次定義咬嘴的邊界條件為等效吸氣負壓(圖 3.17)，然後測量隔膜推力。假設隔膜推力過高，則降低吸氣負壓，反之隔膜推力過低則提高吸氣負壓，此時邊界條件的負壓代表為 ANSTI 測試機中量測到的吸氣負壓。

##### b. 定活塞速率

利用 FLOW-3D 內建的 GMO 功能，可以提供物體的移動，因此可以設定活塞的移動來達到吸氣的效果。而根據 EN250 測試標準，一次呼吸的容積為 2.5L，每分鐘 25 次(吸吐氣)，相當於 1.2 秒跑完一個行

程，換算之後可得活塞移動速度為 58 cm/s。

### c. 定吸氣流速

為了減少 GMO 在 FLOW-3D 下的運算時間，參考上述邊界條件中的活塞速度，假設定活塞速度所造成內部空氣移動與活塞速度相同，因此將出口邊界條件設定成固定流速。



表 3.1 各種參數實驗模型

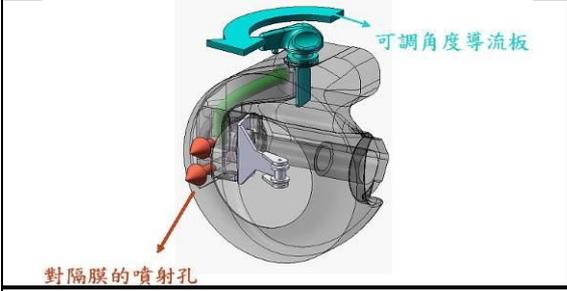
		特徵		
		噴射孔 開=0 關=X		導流板角度
編號	代號	上	下	
一號模型	N0	0	0	0
二號模型	B0	X	0	0
三號模型	T0	0	X	0
四號模型	S0	X	X	0
五號模型	S22.5	X	X	22.5
六號模型	S45	X	X	45

表 3.2 隔膜壓縮量與閥門開度

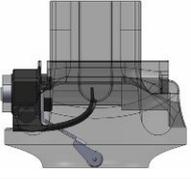
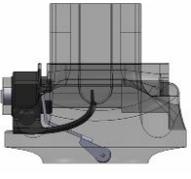
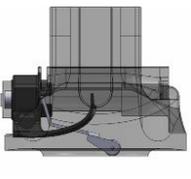
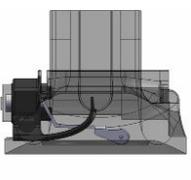
參考圖	狀態	隔膜壓縮量(mm)	閥門開度(mm)
	小開度	2.38	0.3
	中開度	5.14	0.6
	大開度	8.3	0.9
	極限	11.3	1.16



圖 3.1 RG9P 二級調節器

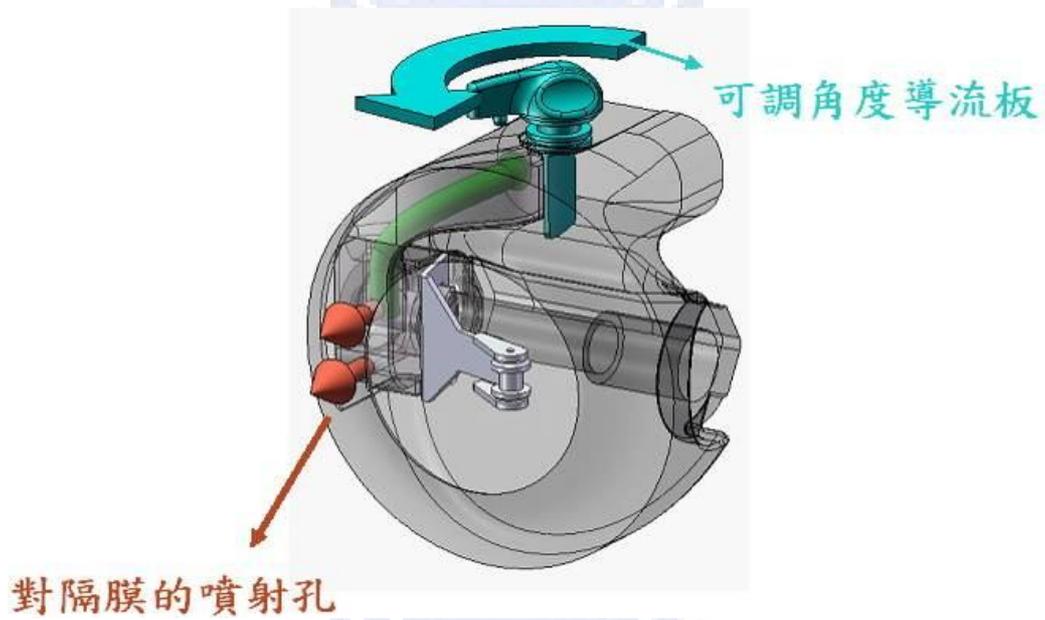


圖 3.2 本體內部特徵



圖 3.3 ANSTI 呼吸調節器測試機台

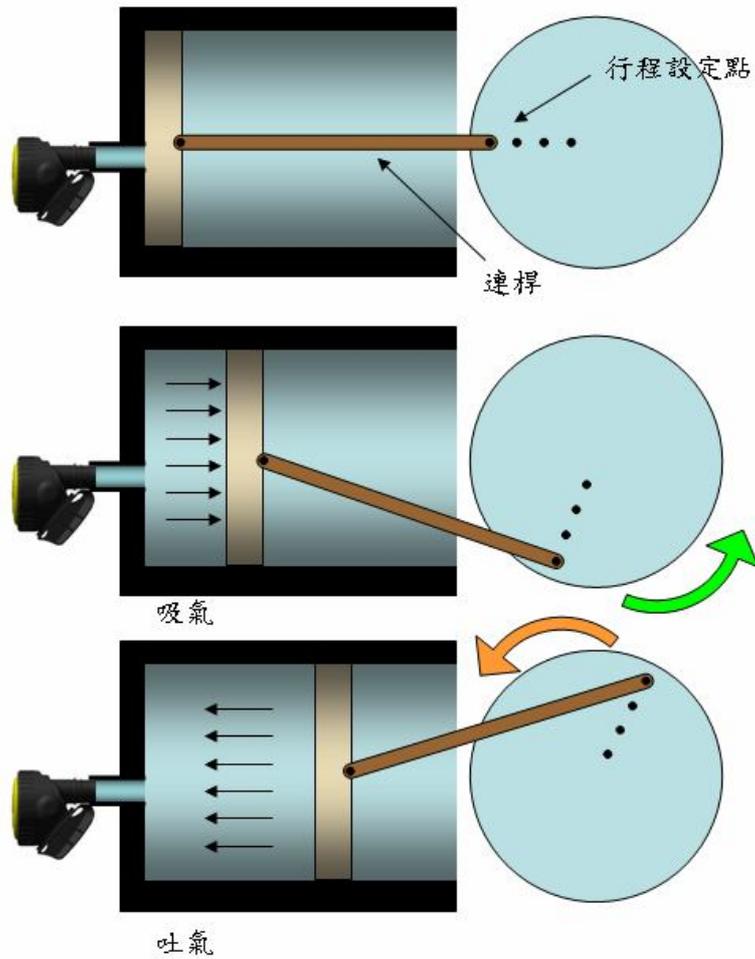


圖 3.4 呼吸模擬器示意圖

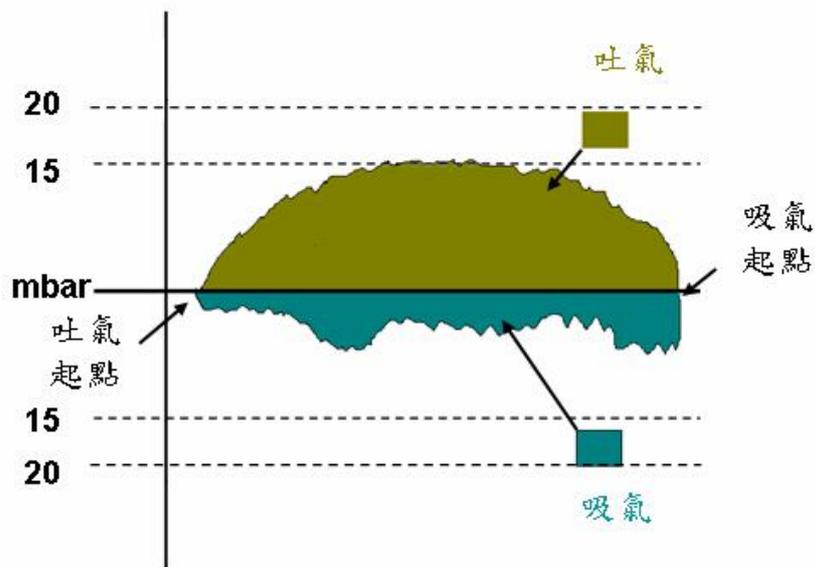


圖 3.5 ANSTI 輸出 P-V 圖



圖 3.6 電子式壓力計

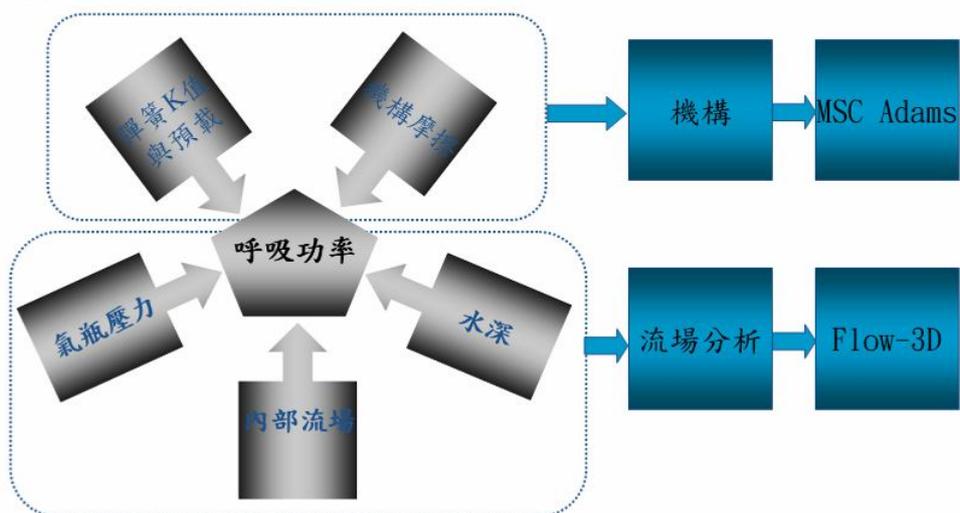


圖 3.7 數值分析軟體選用

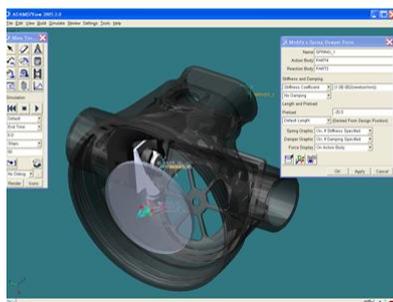


圖 3.8 Adams View 操作介面

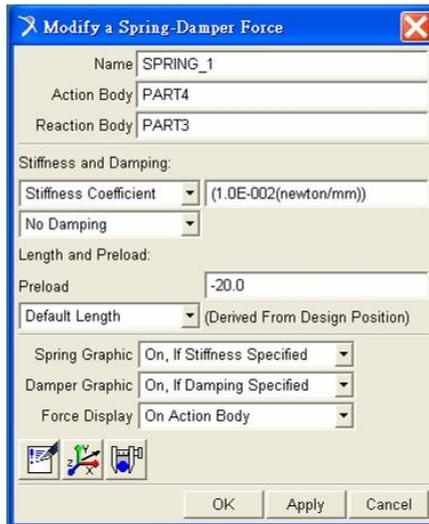


圖 3.9 彈簧參數設定

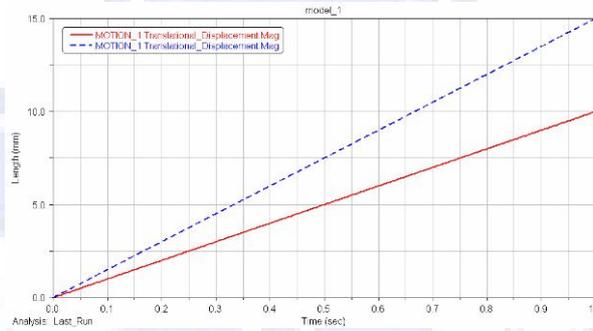


圖 3.10 隔膜位置-時間圖

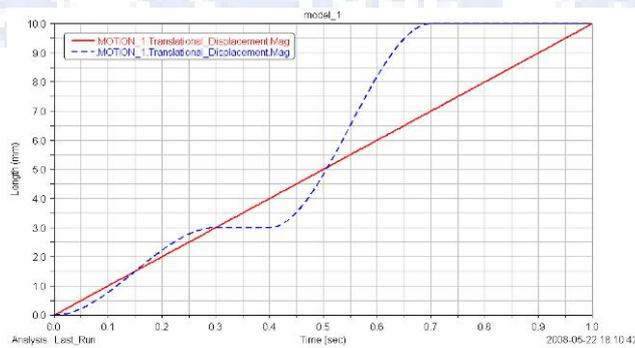


圖 3.11 隔膜變速曲線

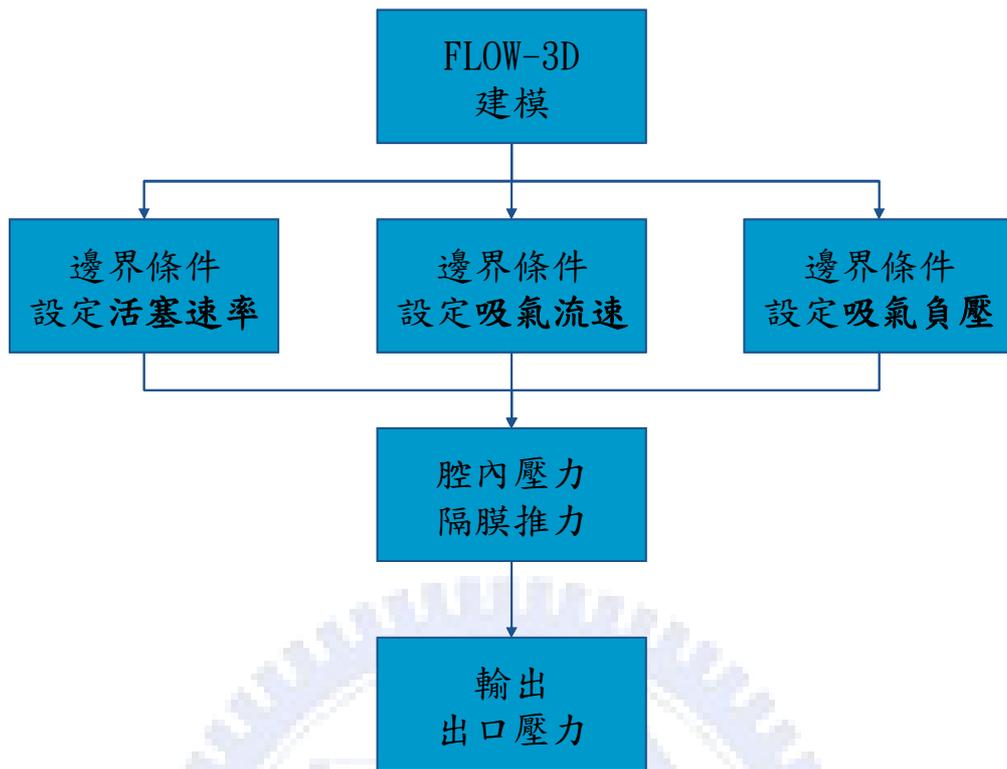


圖 3.12 FLOW-3D 分析流程圖

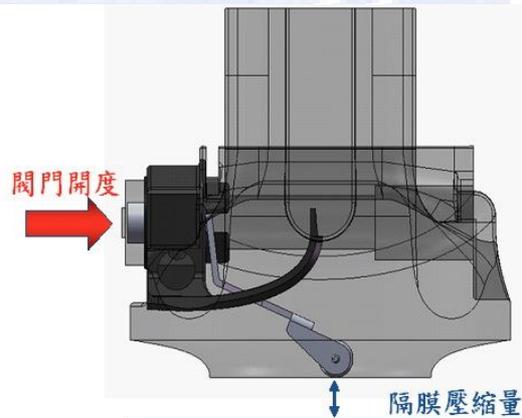


圖 3.13 隔膜壓縮量與閥門開度

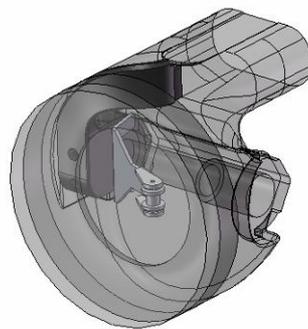


圖 3.14 定吸氣負壓模型

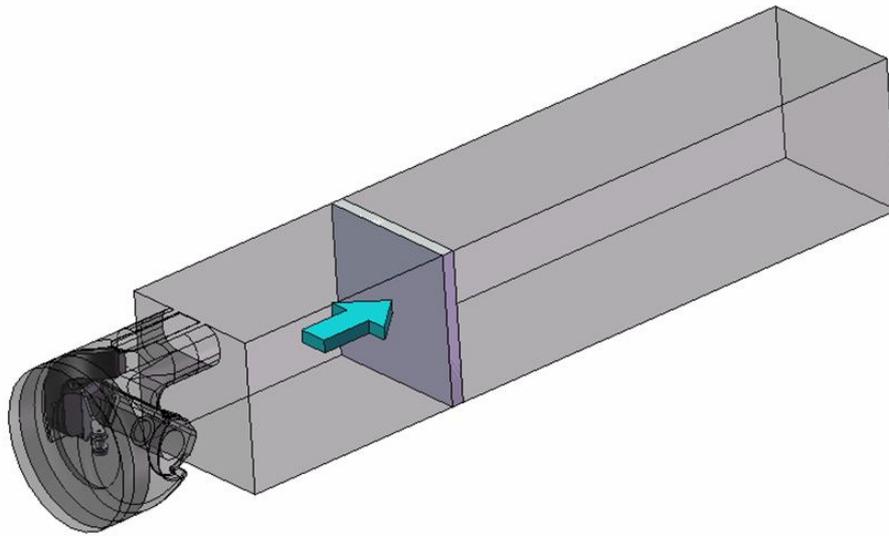


圖 3.15 定活塞速度模型

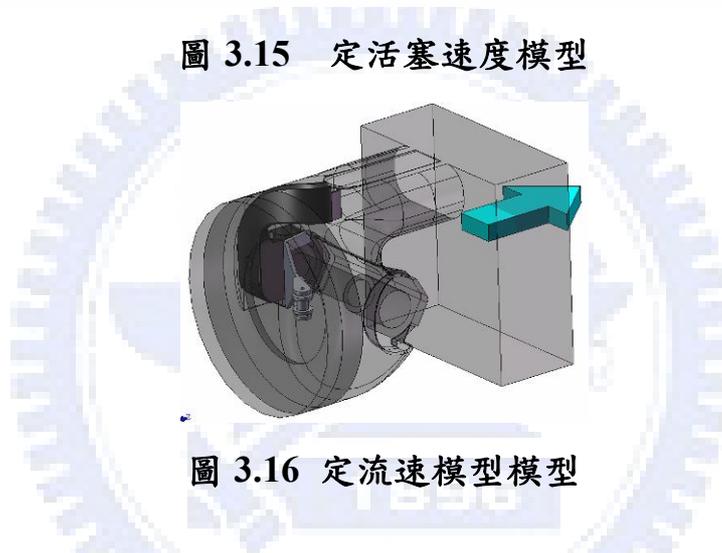


圖 3.16 定流速模型模型

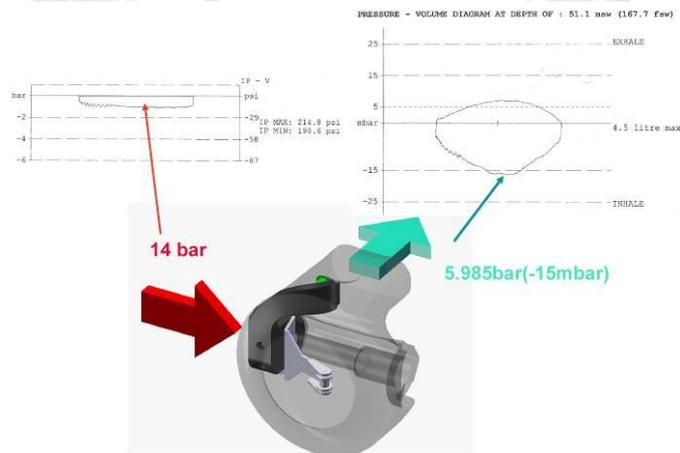


圖 3.17 定吸氣負壓邊界條件設定

## 第四章 實驗結果與討論

### 4-1 實驗數據

參考附件，ANSTI呼吸模擬機可以輸出以下幾個數據，室內溫度、中繼壓力、吐氣壓力，吸氣功率、吐氣功率，呼吸P-V圖等。

**P-V圖** 咬嘴處輸出壓力P與活塞變動的體積V描繪出的曲線，即為P-V圖。

**吸氣功率** 吸氣功率有分正負功，一般情況下吸氣負功即為P-V曲線圖下半部面積，不過當吸氣時閥門開度夠大，不需負壓即可吸氣，並且主動有氣體流入口腔中，這部份即為吸氣時的正功。

**吐氣功率** 即為P-V圖上半部曲線與X軸包圍面積，對於呼吸行為而言是屬於負功。

**總功率** 吸氣與吐氣時的負功相加即為呼吸時的總功率。

**吐氣壓力** 吐氣時為了抵抗海水給予排氣閥的壓力，使得吐氣時必須提供一定量大於環境的正壓。測試機台輸出的吐氣壓力表示在吐氣過程中所發生的最大壓力，相對應於P-V圖中，上半部曲線的最高點。

**吸氣壓力** 因為吸氣時壓力除了負壓外，有時還會出現正壓，因此P-V圖中下半部的吸氣曲線，最高點為吸氣正壓，最低點為吸氣負壓。

**中繼壓力** 其數據表示氣瓶透過一級調節器減壓後提供給二級調節器的壓力。在ANSTI測試機中除了測試二級調節器的呼吸性能外，也可以反應出鋼瓶使用的壓降與一級調節器的性能，因此中繼壓力穩定

度與壓降程度，顯示了一級頭的好壞，所以在下列數據表中不會列出。

#### 4-1.1 實驗數據

各項模型測試結果於附件中，並將數據整理列於表 4.1。T0 模型因為每次呼吸所測得的 P-V 圖不固定，造成誤差過大，使得測試機台無法記錄，所以不列入。

#### 4-1.2 討論

##### a. 臨界壓力

當吸氣時為了讓閥門開啟，必須產生一定量的負壓，使隔膜被外界壓力推動，而這使閥門剛剛好開啟時的壓力及稱為臨界壓力。在閥門開啟前本體內部氣體流動較平緩，因此對於本體對於臨界壓力的影響較小，所以在相同閥門機構上來說，臨界壓力差距不大。

由實驗結果中(圖 4.1)，同樣的閥門結構，不同的本體設計吸氣曲線開始時都同樣為 6mbar。

##### b. 吐氣功率與導流板關係

如實驗數據列表 4.1 與圖 4.2 可以發現，S45 這模型因為導流板角度最大，使得吐氣時的功率高過其他情形。而 S22.5 也因為導流板角度非零度，使得吐氣功率與壓力排在第二。所以雖然可以靠著改變導流板角度來提高呼吸阻抗來降低 Free-flow 的發生，但也會因此提高吐氣時的阻抗。

##### c. 推測模型 T0 數據不穩定原因

模型T0的特徵是將下噴射孔封住，獨留上噴射孔，在ANSTI測試時，不像其他模型，經過幾十次呼吸後輸出曲線還是一樣。推測其造成不穩的原因是唯一的上噴射孔容易被隔膜影響。

#### d. Free flow 的發生

一般情況下，必須靠吸氣的負壓使本體內的壓力下降，然後靠壓力差使得閥門打開。但是當吸氣流量夠大的時候，或者本體內流速夠快，依據伯努力定律速度越快壓力越低，此時已經不需靠吸氣負壓來維持閥門的開啟，除此之外還可以提供額外的正壓給使用者。但是當提供的正壓過大，足以開啟排氣閥，這就是所謂的free flow的情況

S0的模型吸氣時的正壓，明顯大過吐氣時的壓力如圖4.3所示，表示已經發生了Free flow的情形。

### 4-2 MSC Adams 閥門結構分析結果

#### 4-2.1 隔膜定速推動

下左圖中藍線表示不同的隔膜移動速率，而紅線代表固定移動速率10mm/s。由閥門與推力曲線圖(圖4.4)可知，隔膜推力與隔膜移動速度不相關，即使是在變速度下與停止後再移動，曲線皆相同，因此隔膜推力與速度不相關。

#### 4-2.2 彈簧 K 值

閥門彈簧的彈力常數對於曲線的影響最大。參考圖4.6，彈簧K值與曲線中Y值的幅度呈線性相關，當K值提高為原本1.2倍時，曲線Y值也提

高為原本的 1.2 倍。

也因此當彈簧發生疲勞時對於呼吸阻抗的影響也最嚴重

#### 4-2.3 閥門機構與吸氣臨界壓力

依據閥門開度與隔膜推力圖，當過了 2N 推力曲線開始下降，類相似於克服靜摩擦力的階段，當過了曲線中的峰值後，閥門可視為開啟狀態，此峰值接近 2N。將這 2N 除以隔膜面積(圖 4.7)約等於 6mabr，與實驗中的臨界壓力符合，因此在設計上即可預測調節器的臨界壓力。

### 4-3 FLOW-3D 本體流場分析

#### 4-3.1 定吸氣負壓

##### a. 數據整理

此邊界條件是對每種模型設定各種吸氣負壓，模擬分析完成後，判斷出隔膜推力在哪種吸氣負壓下會相同。

例如在模型N0在吸氣負壓15mbar下隔膜推力為1.79，此時模型S22.5在吸氣負壓6mbar下有相同的隔膜推力，因此可以猜想模型S22.5的實際吸氣壓力值為-6mbar。

##### b. 討論

將實驗數據列於表4.2中，實際測試比較後發現(圖4.8)，固定吸氣負壓的邊界條件設定較不符合實驗值。推測測試機台所測量到的壓力值為靜壓

力，表示包含了氣體流速所造成的壓力，而FLOW-3D下設定的吸氣壓力沒有考慮到流速的問題，所以對於流速較快的S等模型無法反映出靜止時的壓力值，也因此無法正確的預測實際情形。

#### 4-3.2 定活塞移動速度

在固定活塞移動的邊界條件下，是靠著活塞的移動來達到模擬吸氣的效果，活塞的後移所造成的真空帶會使空氣填補並且膨脹，此時數值分析軟體必須考慮到氣體的膨脹性、熱傳參數等物理性質。也因為如此複雜的參數設定，在運算此邊界條件下發生了不收斂的情形，所以沒有結果產生。

#### 4-3.3 定吸氣流速

##### a. 數據整理

將測試結果以壓力圖顯示。因為流道的設計與孔洞位置，所以同樣將邊界條件下，設定成固定流速流出，會使得各個模型間的壓力不相等，例如孔洞數最多的N0模型流量較大，會使得槍體內整體壓力上升。因此將調整閥門開度來控制流量，使得各模型間的壓力差距不大。

但是各個模型間的壓力差還是存在，所以讀取吸氣端與槍體內的壓力值如圖4.9，並計算出差值作為依據。

將分析後的數據列於表4.3，並求出腔內與吸氣端壓力差。

##### b. 討論

將機台實際測試數據與模擬分析結果繪製出來(圖4.10)，除了S0的模型

外，其餘各點皆極為相近，實驗與分析結果相當吻合。所以在未來設計上可以透過FLOW-3D的分析，求出本體內壓力與吸氣壓力的差，此壓力差足以做為預測調節器的性能指標。

而S0模形則是在數值分析中高估吸氣正壓，推測其發生原因，是真實情況下過高的吸氣正壓會經由排氣閥排出，也就是Free-flow的發生，因此只要當分析出的吸氣正壓高過排氣壓力，則以排氣壓力作為最高的吸氣正壓。

#### 4-4 建立預測規則

依照本章分析結果，數值分析軟體與實際實驗是可以互相對應。因此可利用本研究方法建立分析一套步驟，以預知設計初期調節器的性能。如要能預測調節器性能，必須繪製調節器性能指標P-V圖。P-V圖可以大致分成吸氣初期造成閥門開啟所需的臨界壓力，以及達到最大流量時的本體內壓。

第一步必須建立閥門機構模型，因為P-V圖中的臨界壓力與閥門、彈簧等幾何結構有關。因此透過Adams可以分析出開啟閥門所需的力量(圖4.11)，即可換算出P-V圖中的臨界壓力(圖4.12)。

第二步必須仰賴FLOW-3D，分析出當吸氣達到最大流量時，吸氣端所測量到的壓力值，此壓力值即可作為P-V圖中的吸氣壓力，如圖4.13所示。

最後只需將P-V圖連成封閉曲線，即可對應出實際的P-V圖，因此依照此步驟，可在設計初期得到調節器的性能。

## 4-5 調節器特徵與效能關係

依據上一章 利用FLOW-3D可以做為預測呼吸調節器性能的工具，也因此可以透過數值分析軟體快速的模擬各種特徵對於調節器性能的影響。本節將會討論各種特徵的效果，而其中包含導流道，導流板，噴射孔等變化的探討。

### 4-5.1 導流道

#### a. 特徵描述

導流道負責導引閥門釋放出氣體到淺水者的口中，也因此導流道的設計與呼吸阻抗、呼吸功率及氣體流速息息相關。所以將會以三種導流道設計來觀察其效果如圖4.14。其中三種導流道包含原始設計，以及加長型可以完整涵蓋整個吸氣口。最後還有短流道設計，來嘗試提升氣體的密集度藉此增加流速。

#### b. 討論

根據分析數據整理於表 4.4，並做成長條圖比較(圖 4.15)，變更導流道長短來提升呼吸時的順暢度控制吸氣阻抗，不如預期般的降低吸氣阻抗。當導流道過長完全包覆吸氣口的上半部，會使得本體內氣體被阻擋無法進入吸氣端，造成本體壓力上升。而過短的導流道，會使得流道內氣體往本體內部流動，造成吸氣端壓力下降。所以要經由改變導流道設計來達到改良的效過必須經過完整的分析。

## 4-5.2 噴射孔角度的影響

### a. 特徵描述

噴射孔對於隔膜與本體內壓的影響甚大。依據先前的壓力圖做假設，噴射孔的高流速氣體直接撞擊隔膜，造成隔膜內壓上升。

因此改變噴射孔對於隔膜的角度，希望來降低噴射孔對於隔膜的沖壓，並且保持噴射出來氣流的流速，降低腔內壓力來提高與吸氣時的壓力差。

此實驗以B0模型作為對照組，改變唯一的下噴射孔角度。因為噴射孔位置在槍體外測因此噴射孔角度將設計往內45與往內90度(圖4.16)，以及向下60度總共三種設計(圖4.17)。

### b. 討論

將分析數據整理於表4.5，並做成長條圖比較(圖4.18)。

原始(圖4.19) 單一垂直噴射孔B0會對於隔膜產生單點的壓力。而由流線圖中發現部份氣流，會被上方導流道的高速氣流所產生的低壓區吸引，所以可以稍微增加吸氣壓力。

往下60度(圖4.20) 而將噴射孔向下60度作調整的模型，噴射氣流集中不會擴散，且可以環繞下本體一周。

往內45度(圖4.21) 此噴射孔角度正對隔膜中心，此噴射氣流在本體內擴善，填補本體內的負壓。

往內90度(圖4.22)，此時噴射氣流撞擊到本體內側的另一面，這平面角度

剛好將氣流導引進吸氣口。觀察數據(表4.6)也顯示，因為額外的氣流導入使得吸氣壓力上升，降低呼吸時的功率。

#### 4-5. 3孔洞大小

##### a. 特徵描述

依據實驗將原始模型封住上孔成為模型B0, 雖然能大大的降低呼吸阻抗值, 但是在吸氣時依然無法提供額外的正壓。而將上下兩噴射孔全部封住的模型S0, 產生了過多的吸氣正壓導致Free flow的情況發生, 造成浪費, 因此不得不調整導流板角度, 來控制吸氣正壓, 但也增加了吐氣時的阻抗。所以為了能在B0與S0模型間找尋較平衡的設計, 將改變B0的孔徑大小, 實驗三組孔徑3mm 2mm 1.4mm, 如圖4.23。

##### b. 討論

依照分析數據表5.3與圖4.24, 內孔洞孔徑大小與本體內壓成正相關, 當孔徑越大本體內壓也越大也降低了與吸氣端的壓力差, 當孔徑縮小到1.4mm時增加的壓力差也讓吸氣壓力從負提升到正。因此有效控制孔徑大小, 將能夠準確的調整吸氣阻抗值。

觀察孔徑3.0mm(圖4.25)與1.4mm(圖4.26)的流線圖, 當孔徑為3mm時約有一半流線被吸氣端負壓吸入, 剩下的流線使得本體內壓力上升。而當孔徑為1.4mm時所有的流線都被吸氣端吸入, 使得氣流無法填充本體內壓力下, 造成本體壓力下降, 與吸氣壓力差提高, 進而降低呼吸阻抗。因此可

以依造流線數目來作為判斷流量的依據，並且預測因流量多寡所產生的壓力值。

## 4-6 改良

### 4-6.1 改良模型建立

綜合以上特徵對於調節器性能的影響，以調整內部噴射孔徑與角度這兩個控制參數，對於目前調節器性能有最大的改善。為了能驗證分析準確性，必須建立出實體模型，以呼吸調節器測試機實際測試其呼吸效率。

ANSTI呼吸測試機可以模擬潛水者呼吸的頻率以及下潛的深度，也因為如此調節器在測試時必須處在高壓力差的環境運作。如果以CNC製作測試RP模型，將會承受不住來自一級頭的高壓氣體以及外界環境的高壓。所以將選用改變孔徑的參數設定作為改善調節器測試的模型。製作噴射孔為1.4mm的模型，只需將原有產品噴射孔封住，再鑽以1.4mm的孔徑。當模型製作完成後，置於ANSTI測試機中進行測試。

### 4-6.2 實驗數據

改良後測試結果如圖4.27，其吸氣阻抗壓力值為4mbar，與模擬分析結果相同。表示當孔徑縮小成1.4mm時可以得到正的吸氣壓力值，除此之外驗證了數值分析的準確性，此準確性對於往後設計上有極大的幫助。

表 4.1 ANSTI 呼吸調節器測試機實驗數據

	吸氣壓力(mbar)		吐氣壓力 (mbar)	功率 (J/l)			
	正	負		吸氣(負)	吸氣(正)	吐氣	總功率
N0	0.00	16.44	7.1	1.19	0.00	0.48	1.67
B0	0.00	8.56	6.96	0.59	0.00	0.48	1.08
T0							
S0	8.43	5.43	7.22	0.08	0.3	0.49	0.57
S22.5	5.56	5.93	7.46	0.14	0.13	0.50	0.65
S45	1.71	6.89	8.22	0.36	0.01	0.56	0.92

表 4.2 定吸氣負壓分析數據

	隔膜推力(N)	吸氣負壓 (mbar)	ANSTI測試機台實驗數據 (mbar)
N0	1.749	-15	-16.4
B0	1.749	-8	-5
S0	1.749	+8	8.43
S22.5	1.749	-6	5.56
S45	1.749	-5	-6.89

表 4.3 定吸氣流速分析數據

	腔內壓力 (bar)	吸氣端壓力 (bar)	壓力差 (mbar)	offset (mbar)	ANSTI測試機台實驗數據 (mbar)
N0	7.0905	7.111	20.5	-15.5	-16.4
B0	6.899	6.931	32	-4	-5
S0	8.468	8.515	47	11	8.43
S22.5	6.655	6.696	41	5	5.56
S45	6.654	6.683	29	-7	-6.89

表 4.4 改變流道 FLOW-3D 分析數據

改變導流道	槍體內壓 (mbar)	吸氣壓力 (mbar)	壓力差 (mbar)	Offset (mbar)
原本	6.899	6.931	32	-4
短	7.0272	7.047	19.8	-16.2
長	6.883	6.9065	23.5	-12.5

表 4.5 改變孔洞角度 FLOW-3D 分析數據

改變孔洞角度	槍體內壓 (mbar)	吸氣壓力 (mbar)	壓力差 (mbar)	Offset (mbar)
2mm	6.4685	6.5025	34	-2
下 60	6.7395	6.775	35.5	-0.5
內 45	6.6745	6.7095	35	-1
內 90	6.623	6.665	42	6

表 4.6 改變孔徑大小 FLOW-3D 分析數據

改變孔徑大小	槍體內壓 (mbar)	吸氣壓力 (mbar)	壓力差 (mbar)	Offset (mbar)
3mm	6.899	6.931	32	-4
2mm	6.4685	6.5025	34	-2
1.4mm	6.3835	6.3435	40	+4

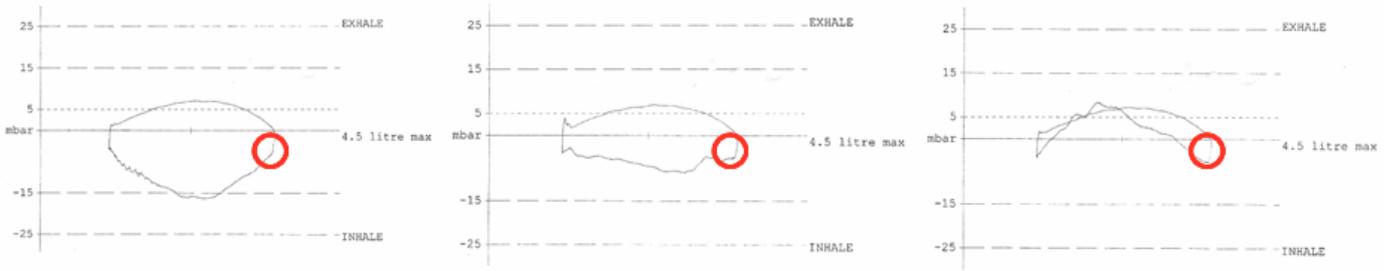


圖 4.1 各模型吸氣閥門開啟時臨界壓力比較

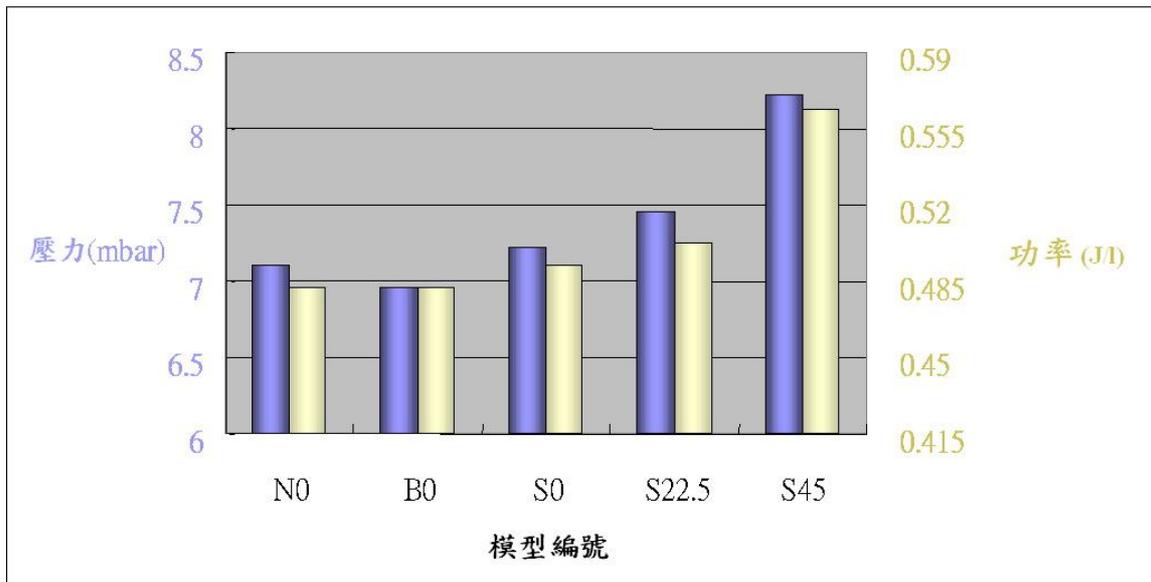
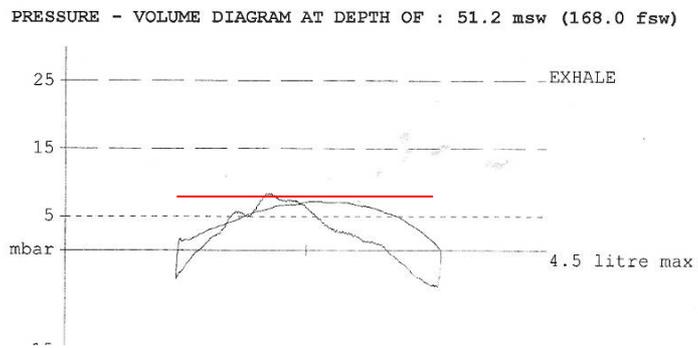
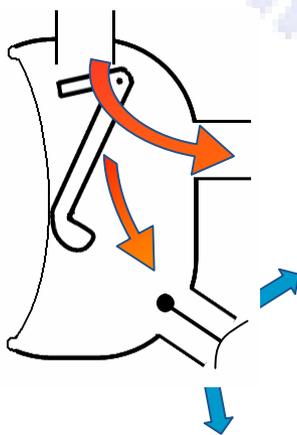


圖 4.2 各模型吐氣壓力與功率



(a) Free flow 示意圖

(b) Free flow P-V圖

圖 4.3 Free flow 發生

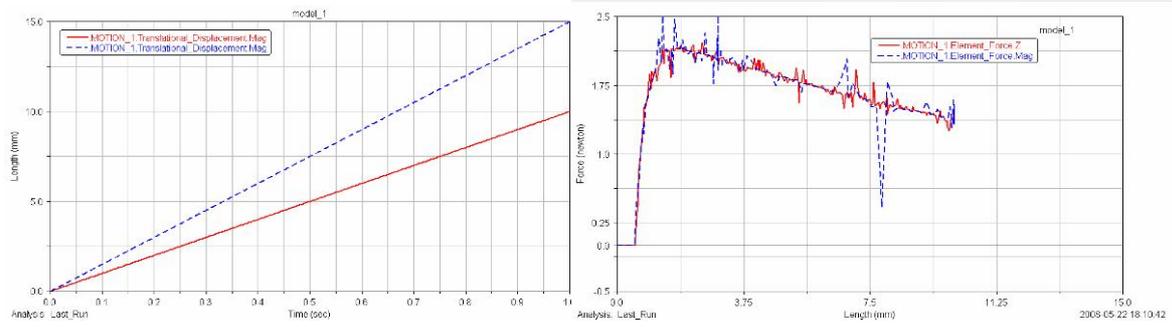


圖 4.4 不同隔膜移動速度 F-d 圖

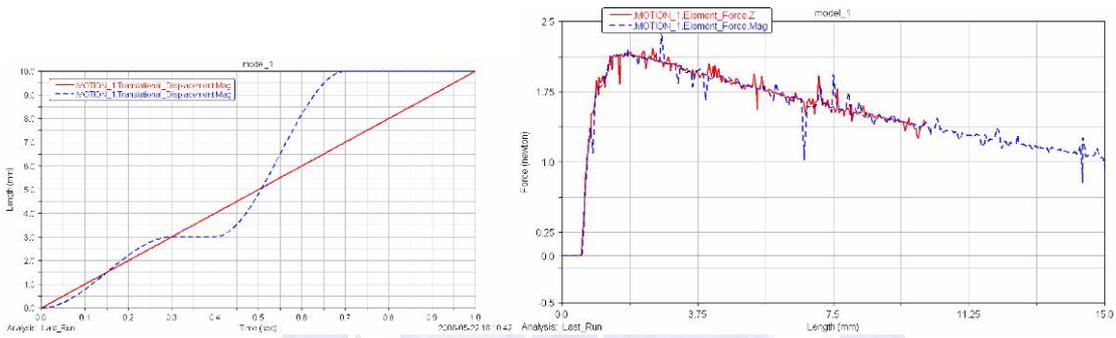


圖 4.5 不等速隔膜移動 F-d 圖

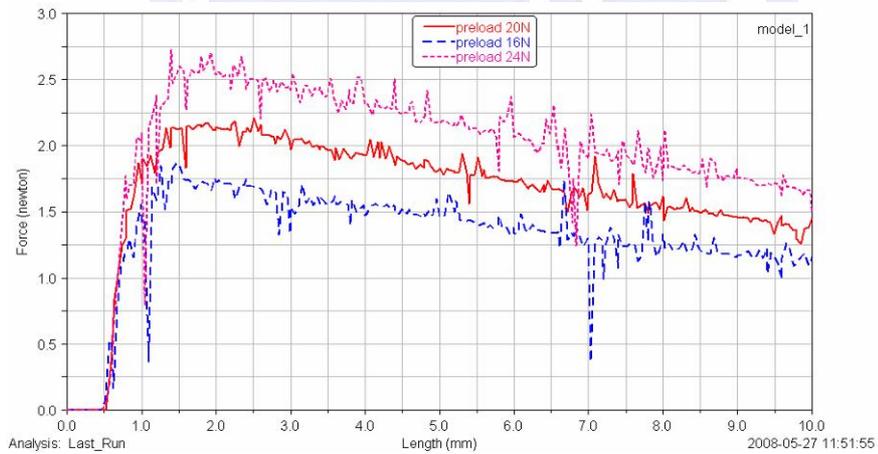


圖 4.6 不同彈力常數隔膜 F-d 圖

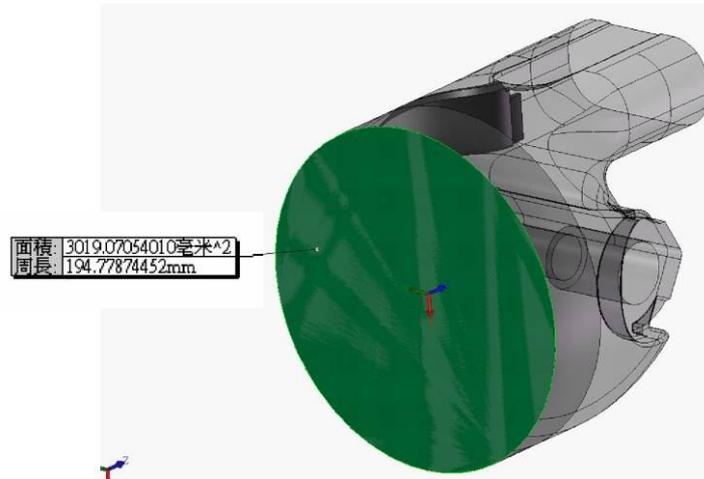


圖 4.7 隔膜面積

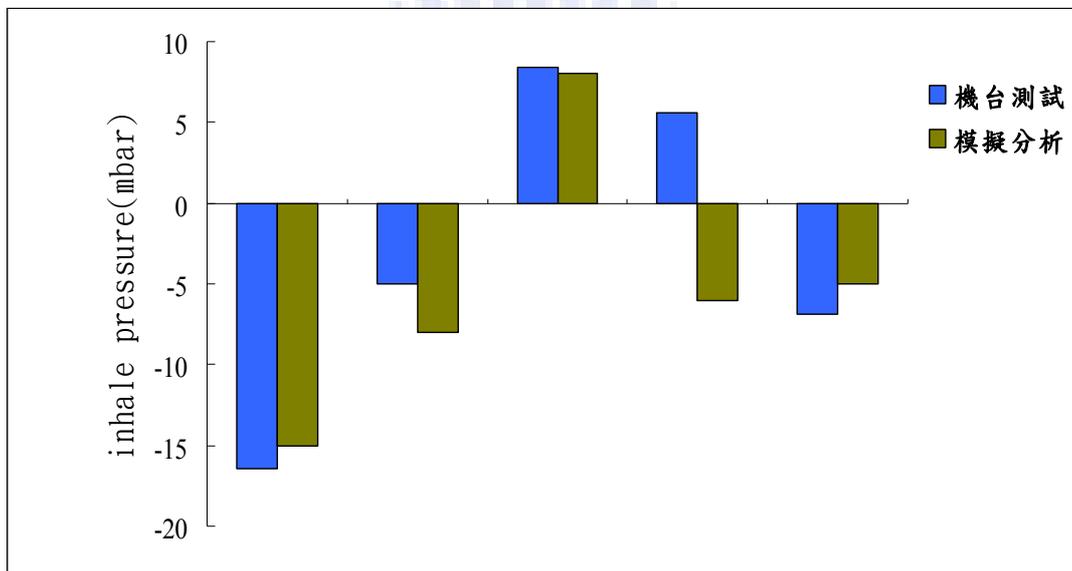


圖 4.8 定吸氣負壓實驗與分析數據比較

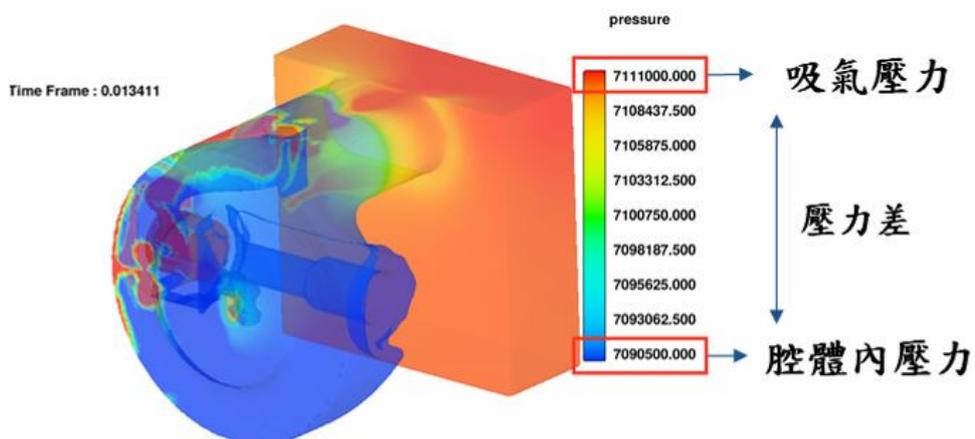


圖 4.9 吸氣壓力與本體內壓力差

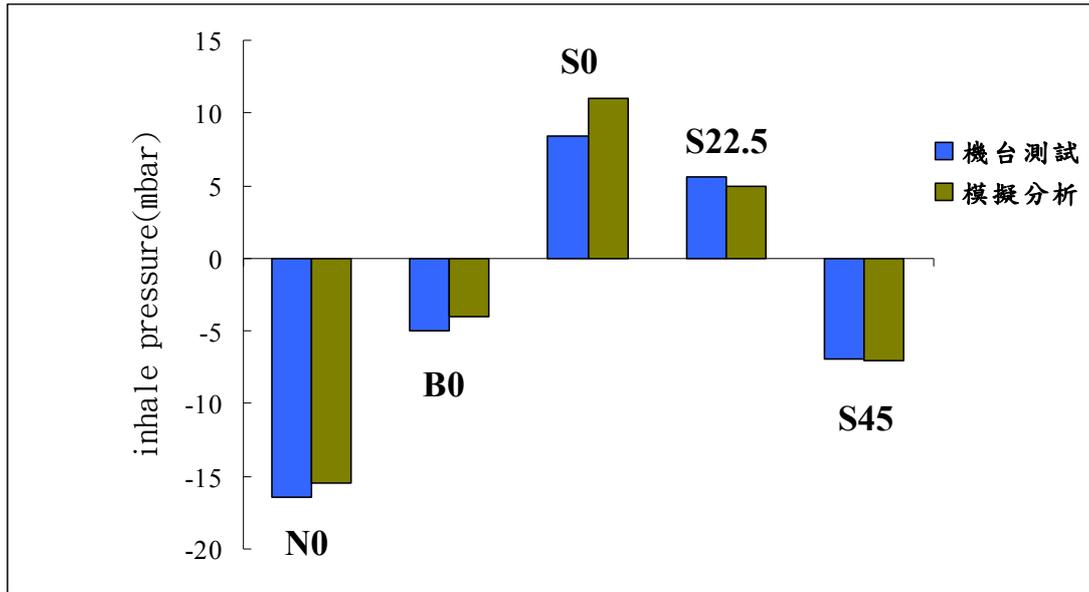


圖 4.10 定負壓實驗與分析數據比較

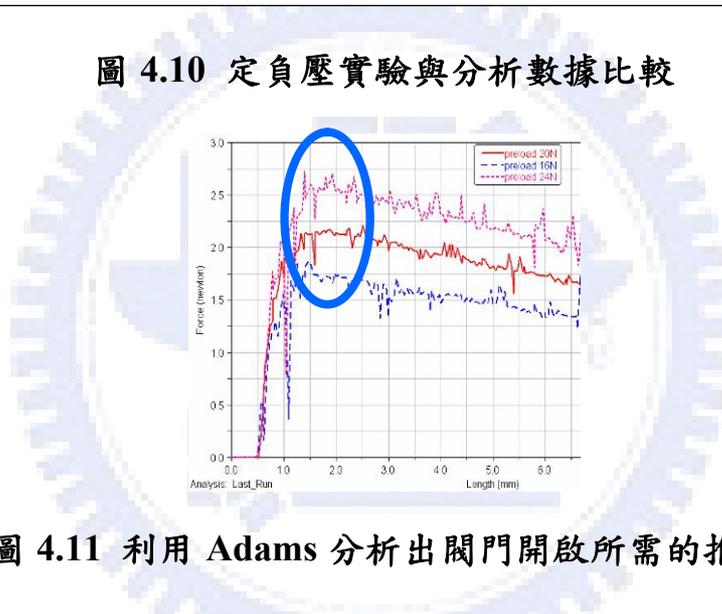


圖 4.11 利用 Adams 分析出閥門開啟所需的推力

PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.1 msw (167.7 fsw)

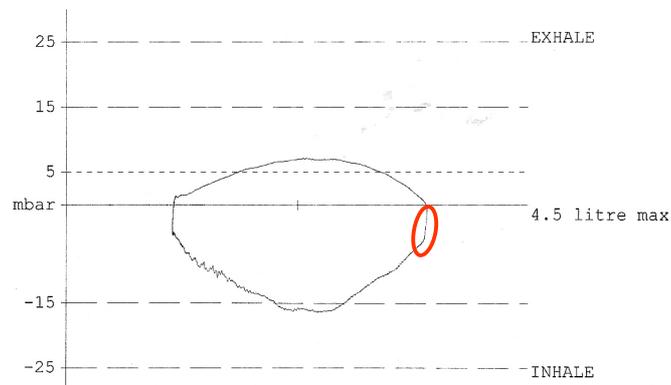


圖 4.12 將閥門開啟的推力轉成 P-V 圖中的臨界壓力

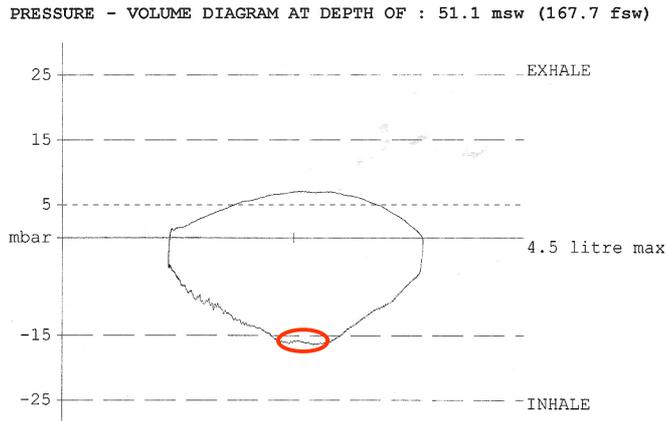
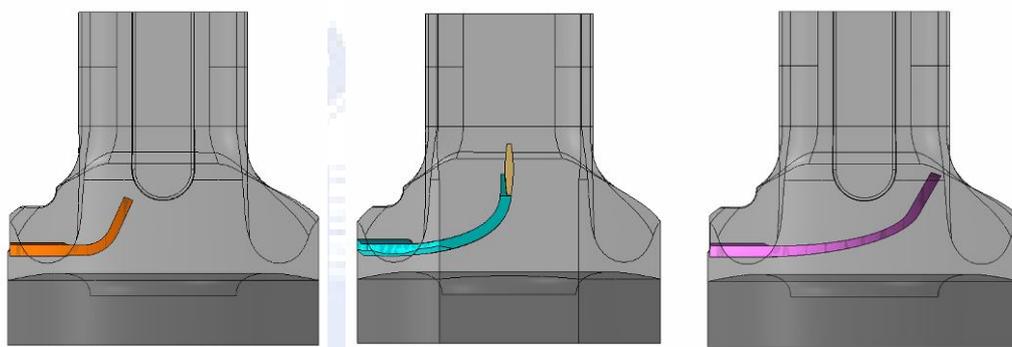


圖 4.13 利用 FLOW-3D 建立吸氣 P-V 圖中峰值壓力



(a) 短流道設計

(b) 原始流道設計

(c) 長流道設計

圖 4.14 不同導流道設計比較圖

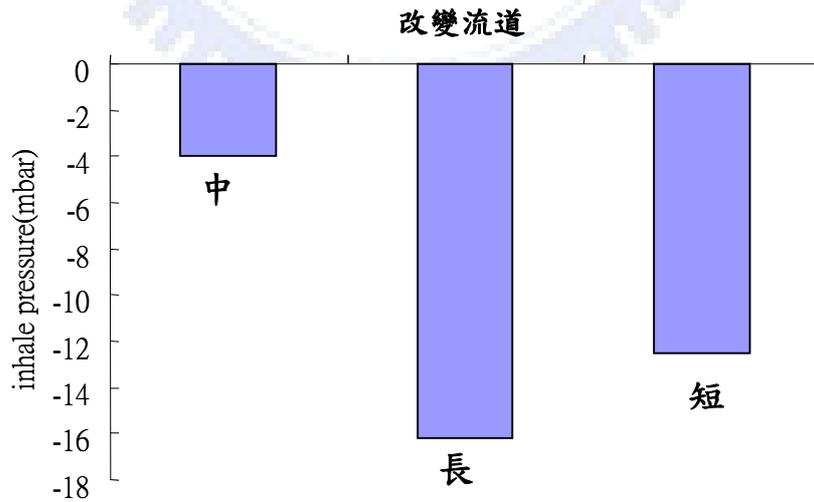


圖 4.15 改變流道後吸氣壓力圖

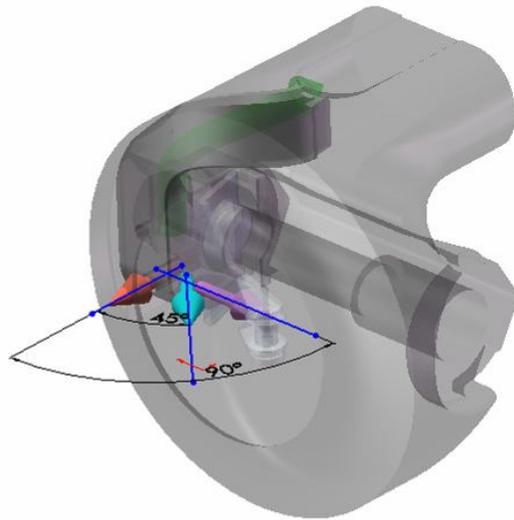


圖 4.16 噴射孔向內 45 度與 90 度

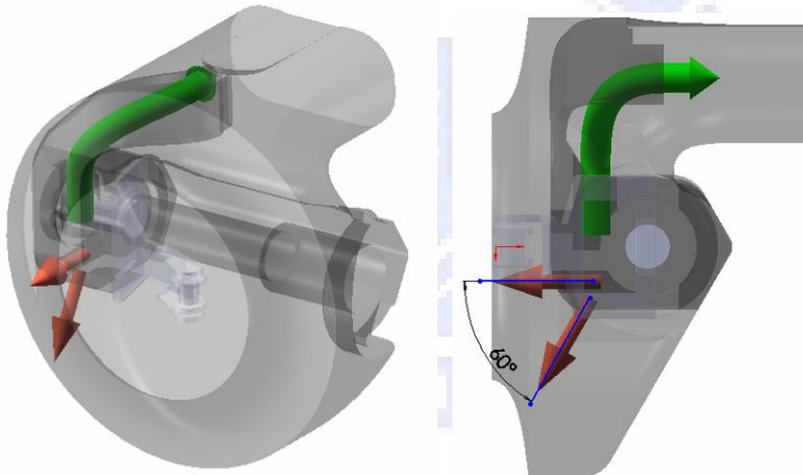


圖 4.17 噴射孔向下 60 度

改變角度

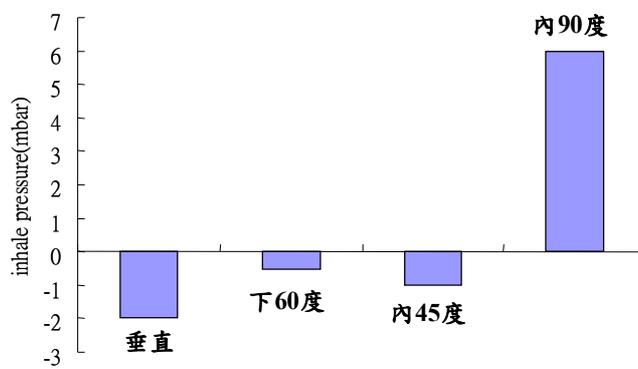


圖 4.18 改變噴射孔角度後吸氣壓力圖

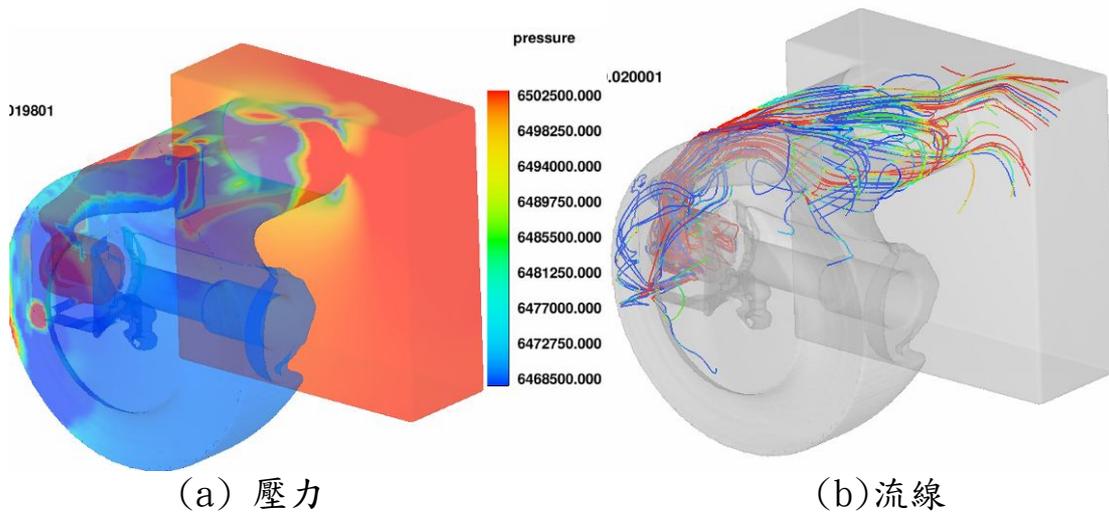


圖 4.19 孔洞垂直噴射於隔膜

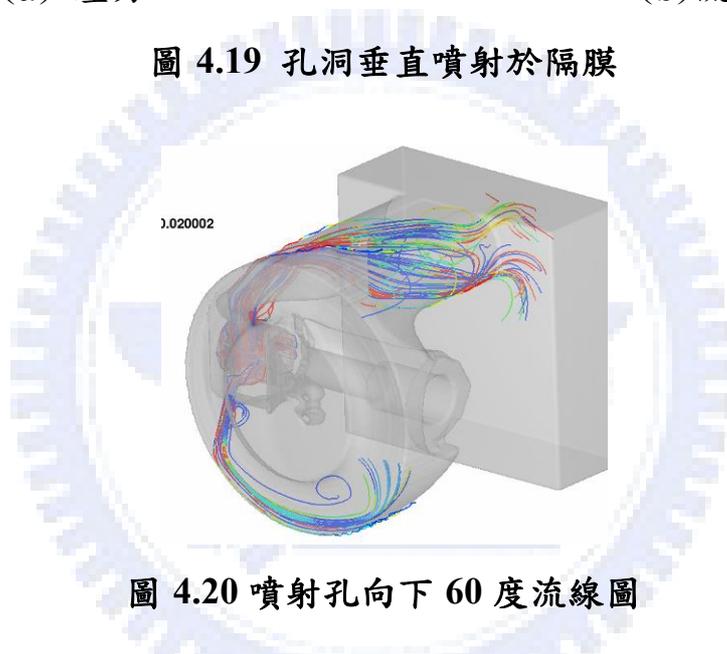


圖 4.20 噴射孔向下 60 度流線圖

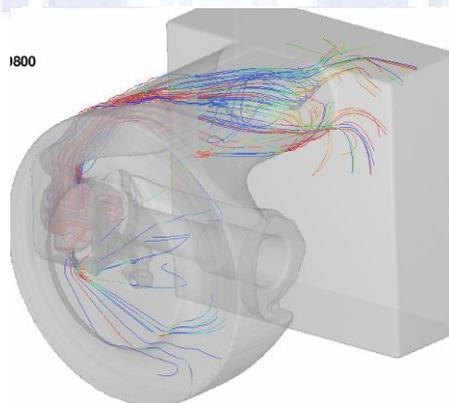


圖 4.21 噴射孔向內 45 度流線圖

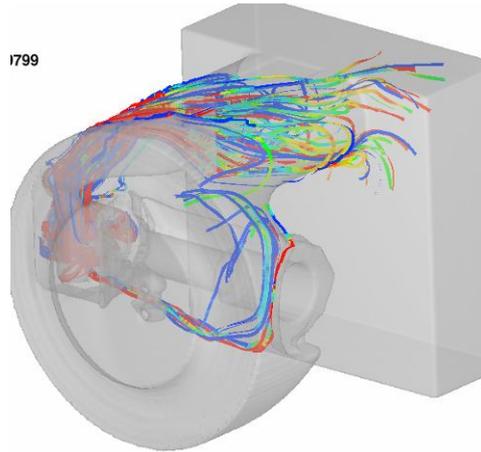


圖 4.22 噴射孔向內 90 度流線圖

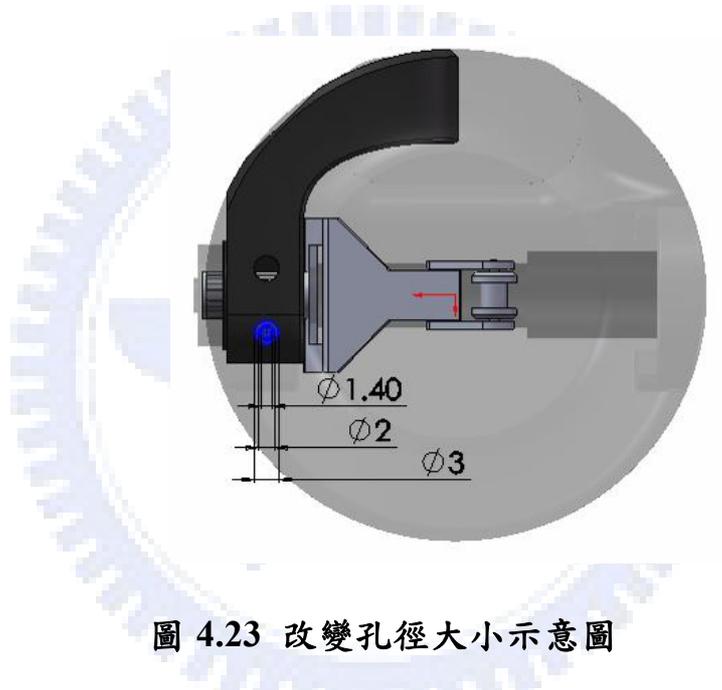


圖 4.23 改變孔徑大小示意圖

改變半徑

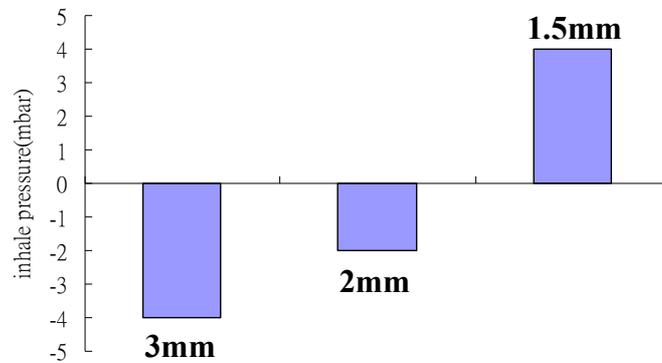


圖 4.24 改變噴射孔孔徑後吸氣壓力圖

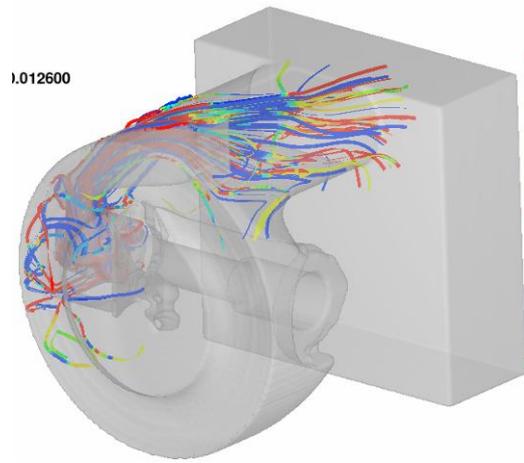


圖 4.25 孔徑 3.0mm 流線圖

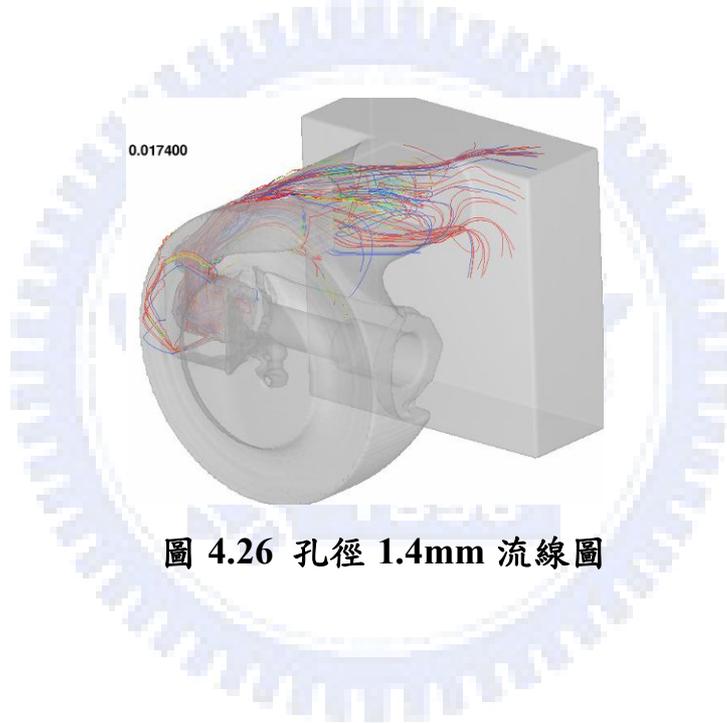


圖 4.26 孔徑 1.4mm 流線圖

DEMAND REGULATOR PERFORMANCE

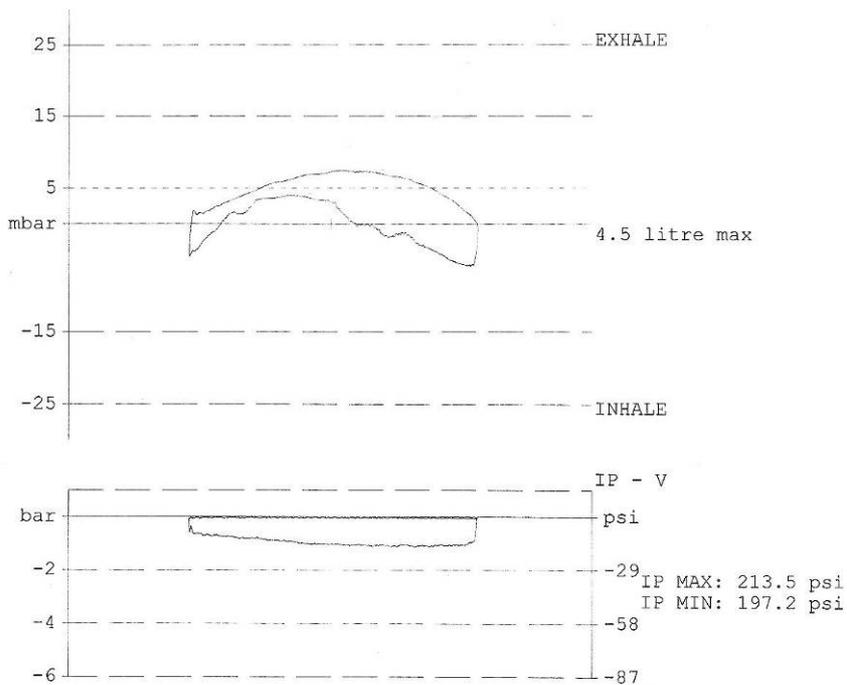
---ANSTI--- OCEAN DIVERS ---ANSTI---  
 CERTIFICATE REFERENCE : DTS-0310584  
 DATE : 2008/3/27 TIME : 下午 01:33:07

EQUIPMENT  
 REGULATOR TYPE : RG9  
 SERIAL NUMBER : 1st: 06060019 ; 2ed: 07123144  
 INTERSTAGE PRESSURE : 0.0 psi

CONDITIONS OF TEST  
 ROOM TEMPERATURE : 75.2 F  
 HP SUPPLY PRESSURE : 3019.2 psi  
 TIDAL VOLUME : 2.50 litre BREATH RATE : 24.94 bpm  
 VENTILATION RATE : 62.3 lpm

RESULTS  
 INHALE PRESSURE = 5.93 mbar  
 INHALE POS PRESSURE = 5.56 mbar  
 EXHALE PRESSURE = 7.46 mbar  
 EXT WORK OF BREATHING = 0.65 J/l  
 INHALE WORK = 0.14 J/l  
 POS INHALE WORK = 0.13 J/l  
 EXHALE WORK = 0.50 J/l

PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.3 msw (168.3 fsw)



REMARKS : OCAEN DIVER

---DTS-0310---

圖 4.27 孔徑 1.4mm 測試數據

## 第五章 結論

### 5-1 結論

此研究之目的在於探討以數值分析軟體建立潛水用呼吸調節器之性能預測之分析方法。並藉由模擬結果歸納出影響呼吸調節器之參數設定如：內噴射孔角度、內噴射孔孔徑、導流道設計等。最後再進行實際改良實驗，確定分析成果。由實驗結果得出以下的結論。

1. 利用FLOW-3D與MSC Adams數值分析軟體可以有效預測呼吸調節器之性能，對於調節器的設計有極大的幫助。
2. 內噴射孔角度與孔徑大小為呼吸調節的關鍵參數，內噴射孔孔徑大小與吸氣壓力成負相關。
3. 將現有產品內部上噴射孔封住，與縮小下噴射孔孔徑至1.5mm，能有效改善其吸氣阻抗值。

### 5-2 未來展望

前水用呼吸調節器可以分為一級調節器與二級調節器，本研究只探討二級調節器，希望能在未來上加入一級調節的分析。除此之外，呼吸測試機可以同時測試吸氣與吐氣兩者的呼吸阻抗值，不過吐氣的阻抗值差異不大，因此在本研究中也沒有加以討論，不過好的呼吸調節器也需要有低的吐氣阻抗值，所以往後能對於吐氣時的狀況加以分

析，

對於整體機構來說，也希望能提出一套完整呼吸調節器的設計理論方式，此原理能做最佳化的設計，並且改良目前現有的調節器。或是設計出一種新式機構，此機構可以主動調節呼吸器效能，足以應付各種使用者與環境。



## 參考文獻

- [1] Pete Wolfinger, SCUBA Regulator Ssvvy, A division of Peter Built Co., Galion, Ohio, USA
- [2] Douglas J. Toth, US patent, 4508118, 1985
- [3] Harmon R. Hansen, Thomas A. Lingenfelter, US patent, 4683881, 1987
- [4] Tony Christianson, US patent, 4862884, 1989
- [5] Arthur R. Ferguson, US patent, 5660502, 1995
- [6] Dean R. Garraffa, US patent, 5678541, 1997
- [7] Alberto Belloni, US patent, 6279575, 2001
- [8] Richard I. Brown, David S. Brown, US patent, 6354291, 2002
- [9] Kurtzmaan, J. & Zauhar, J. (1997). A Wave in Time—The Sports Tourism Phenomena. *Journal of Sport Tourism*, 4(2), 5-20
- [10] 大地地理雜誌，2005，「水肺潛水」，頁 22-23，1 月。
- [11] 蘇焉（1991）：潛水理論與技能，台北：海琦出版社

# 附錄 ANSTI 輸出資料

## DEMAND REGULATOR PERFORMANCE

—ANSTI—
OCEAN DIVERS
—ANSTI—  
 CERTIFICATE REFERENCE : DTS-0310579  
 DATE : 2008/3/27 TIME : 下午 12:12:02

**EQUIPMENT**

REGULATOR TYPE : RG9  
 SERIAL NUMBER : 1st: 06060019 ; 2ed: 07123144  
 INTERSTAGE PRESSURE : 0.0 psi

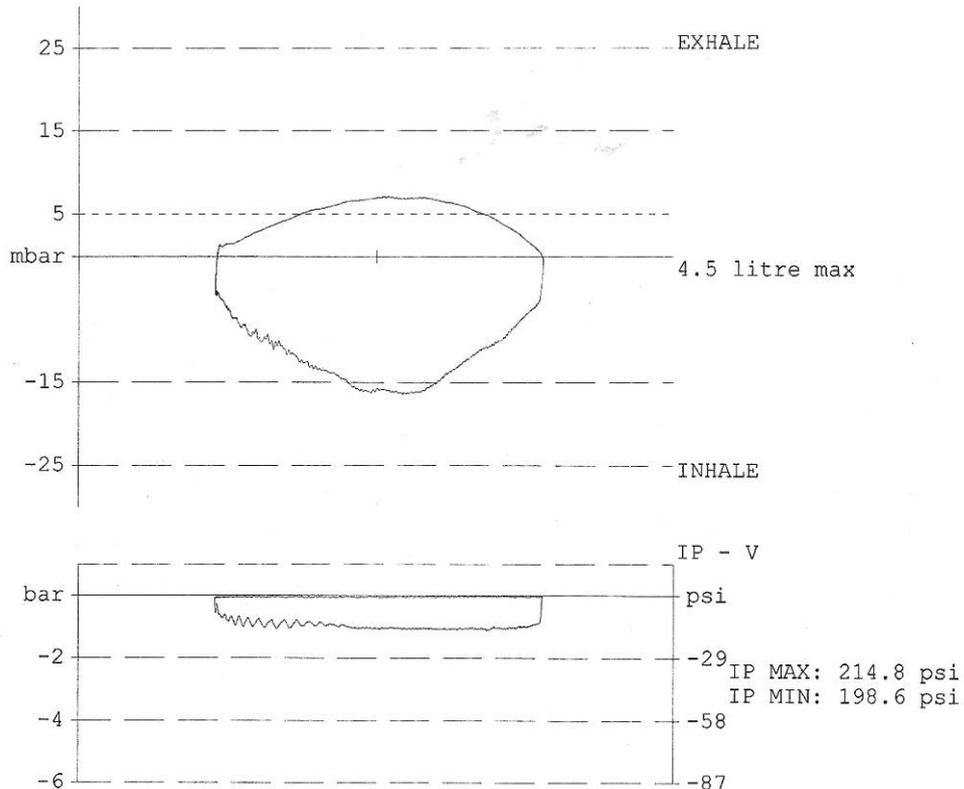
**CONDITIONS OF TEST**

ROOM TEMPERATURE : 75.2 F  
 HP SUPPLY PRESSURE : 3369.8 psi  
 TIDAL VOLUME : 2.50 litre BREATH RATE : 25.09 bpm  
 VENTILATION RATE : 62.7 lpm

**RESULTS**

INHALE PRESSURE = 16.44 mbar  
 INHALE POS PRESSURE = 0.00 mbar  
 EXHALE PRESSURE = 7.10 mbar  
 EXT WORK OF BREATHING = 1.67 J/l  
     INHALE WORK = 1.19 J/l  
 POS INHALE WORK = 0.00 J/l  
     EXHALE WORK = 0.48 J/l

PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.1 msw (167.7 fsw)



REMARKS : OCAEN DIVER

DTS-0310

模型 NO

**DEMAND REGULATOR PERFORMANCE**

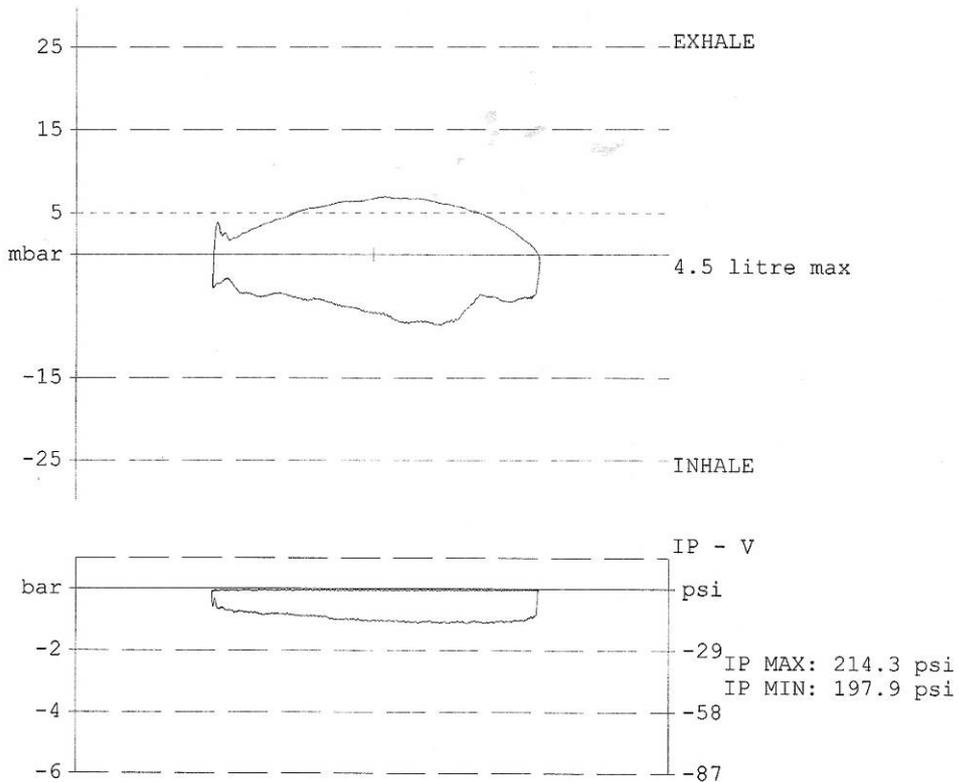
-----ANSTI----- OCEAN DIVERS -----ANSTI-----  
 CERTIFICATE REFERENCE : DTS-0310580  
 DATE : 2008/3/27 TIME : 下午 01:16:59

**EQUIPMENT**  
 REGULATOR TYPE : RG9  
 SERIAL NUMBER : 1st: 06060019 ; 2ed: 07123144  
 INTERSTAGE PRESSURE : 0.0 psi

**CONDITIONS OF TEST**  
 ROOM TEMPERATURE : 75.2 F  
 HP SUPPLY PRESSURE : 3175.1 psi  
 TIDAL VOLUME : 2.50 litre BREATH RATE : 25.10 bpm  
 VENTILATION RATE : 62.8 lpm

**RESULTS**  
 INHALE PRESSURE = 8.56 mbar  
 INHALE POS PRESSURE = 0.00 mbar  
 EXHALE PRESSURE = 6.96 mbar  
 EXT WORK OF BREATHING = 1.08 J/l  
     INHALE WORK = 0.59 J/l  
 POS INHALE WORK = 0.00 J/l  
 EXHALE WORK = 0.48 J/l

PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.0 msw (167.4 fsw)



REMARKS : OCAEN DIVER

DTS-0310

模形 B0

**DEMAND REGULATOR PERFORMANCE**

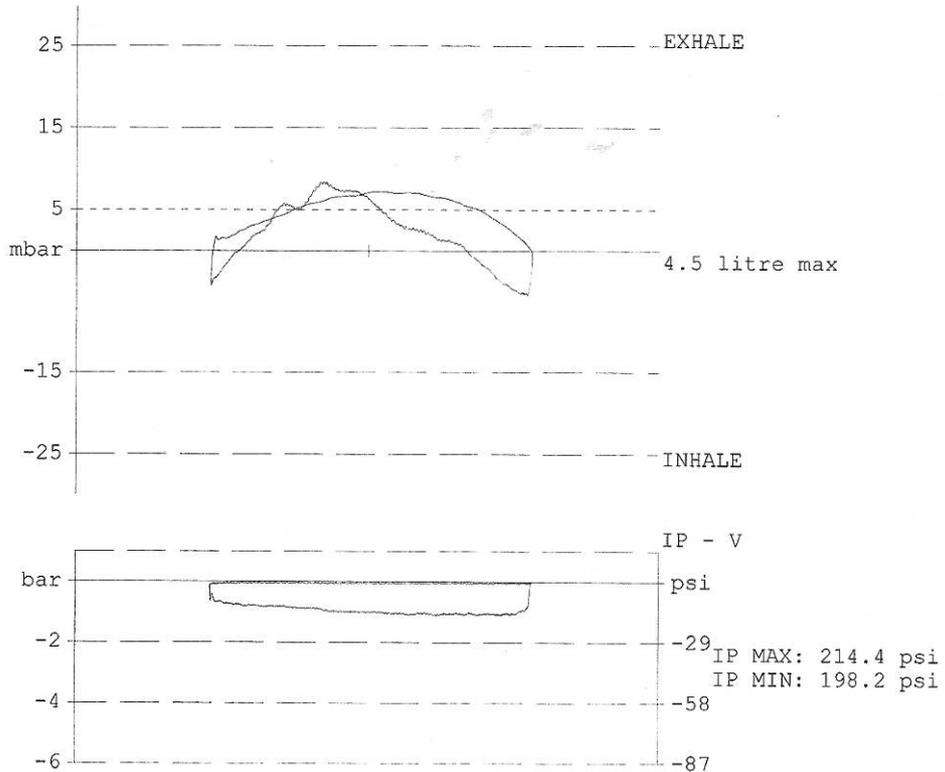
—ANSTI— OCEAN DIVERS —ANSTI—  
 CERTIFICATE REFERENCE : DTS-0310582  
 DATE : 2008/3/27 TIME : 下午 01:24:56

**EQUIPMENT**  
 REGULATOR TYPE : RG9  
 SERIAL NUMBER : 1st: 06060019 ; 2ed: 07123144  
 INTERSTAGE PRESSURE : 0.0 psi

**CONDITIONS OF TEST**  
 ROOM TEMPERATURE : 75.2 F  
 HP SUPPLY PRESSURE : 3079.8 psi  
 TIDAL VOLUME : 2.50 litre BREATH RATE : 25.09 bpm  
 VENTILATION RATE : 62.7 lpm

**RESULTS**  
 INHALE PRESSURE = 5.43 mbar  
 INHALE POS PRESSURE = 8.43 mbar  
 EXHALE PRESSURE = 7.22 mbar  
 EXT WORK OF BREATHING = 0.57 J/l  
     INHALE WORK = 0.08 J/l  
 POS INHALE WORK = 0.30 J/l  
     EXHALE WORK = 0.49 J/l

**PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.2 msw (168.0 fsw)**



REMARKS : OCAEN DIVER

DTS-0310

模型 S0

**DEMAND REGULATOR PERFORMANCE**

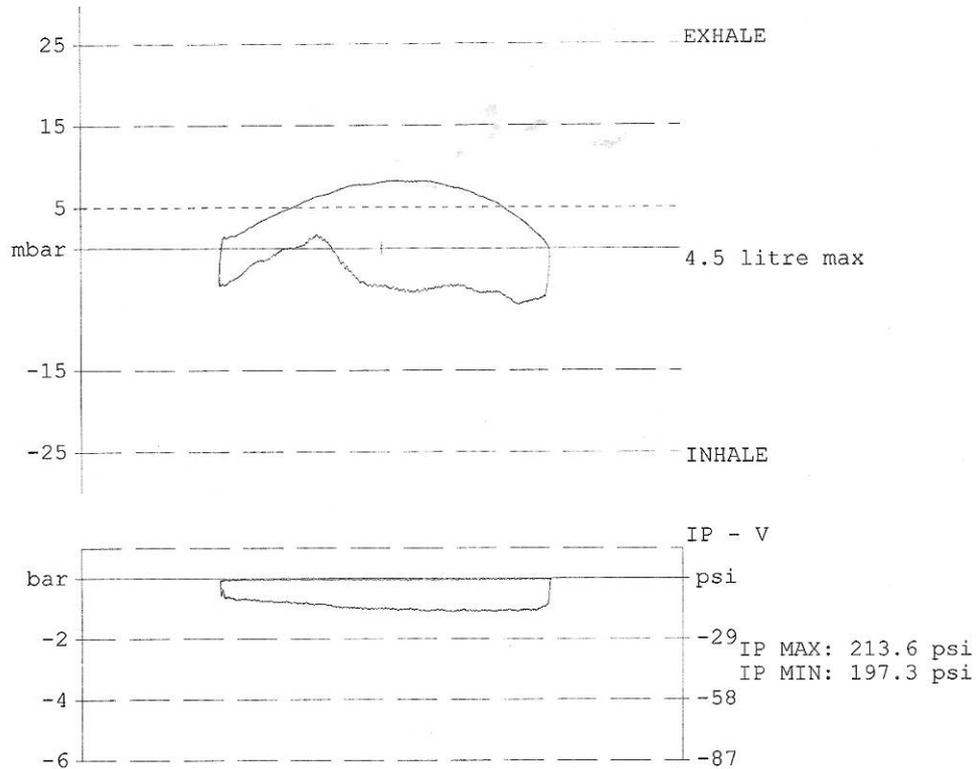
—ANSTI— OCEAN DIVERS —ANSTI—  
 CERTIFICATE REFERENCE : DTS-0310583  
 DATE : 2008/3/27 TIME : 下午 01:28:42

**EQUIPMENT**  
 REGULATOR TYPE : RG9  
 SERIAL NUMBER : 1st: 06060019 ; 2ed: 07123144  
 INTERSTAGE PRESSURE : 0.0 psi

**CONDITIONS OF TEST**  
 ROOM TEMPERATURE : 75.2 F  
 HP SUPPLY PRESSURE : 2992.5 psi  
 TIDAL VOLUME : 2.50 litre BREATH RATE : 24.93 bpm  
 VENTILATION RATE : 62.3 lpm

**RESULTS**  
 INHALE PRESSURE = 6.89 mbar  
 INHALE POS PRESSURE = 1.71 mbar  
 EXHALE PRESSURE = 8.22 mbar  
 EXT WORK OF BREATHING = 0.92 J/l  
     INHALE WORK = 0.36 J/l  
 POS INHALE WORK = 0.01 J/l  
     EXHALE WORK = 0.56 J/l

PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.2 msw (168.1 fsw)



REMARKS : OCAEN DIVER

DTS-0310

模型 S45

**DEMAND REGULATOR PERFORMANCE**

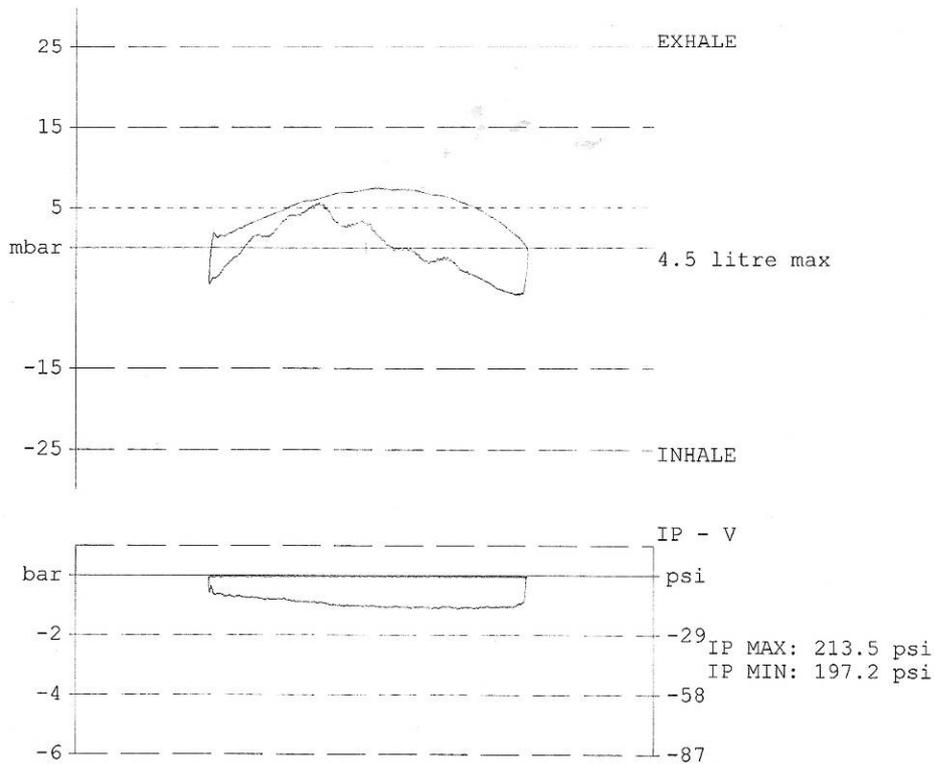
~~ANSTI~~ ~~OCEAN DIVERS~~ ~~ANSTI~~  
 CERTIFICATE REFERENCE : DTS-0310584  
 DATE : 2008/3/27 TIME : 下午 01:33:07

**EQUIPMENT**  
 REGULATOR TYPE : RG9  
 SERIAL NUMBER : 1st: 06060019 ; 2ed: 07123144  
 INTERSTAGE PRESSURE : 0.0 psi

**CONDITIONS OF TEST**  
 ROOM TEMPERATURE : 75.2 F  
 HP SUPPLY PRESSURE : 3019.2 psi  
 TIDAL VOLUME : 2.50 litre BREATH RATE : 24.94 bpm  
 VENTILATION RATE : 62.3 lpm

**RESULTS**  
 INHALE PRESSURE = 5.93 mbar  
 INHALE POS PRESSURE = 5.56 mbar  
 EXHALE PRESSURE = 7.46 mbar  
 EXT WORK OF BREATHING = 0.65 J/l  
     INHALE WORK = 0.14 J/l  
 POS INHALE WORK = 0.13 J/l  
 EXHALE WORK = 0.50 J/l

PRESSURE - VOLUME DIAGRAM AT DEPTH OF : 51.3 msw (168.3 fsw)



REMARKS : OCAEN DIVER

DTS-0310

模型22.5