

國立勤益科技大學  
冷凍空調與能源系碩士班  
碩士論文

高效率風扇過濾機組之開發

**The Development of a High Efficiency Fan-Filter Unit**



研究生：陳弘毅

指導教授：黃建民

中華民國 九十九 年 六 月

高效率風扇過濾機組之開發

**The Development of a High Efficiency Fan-Filter Unit**

研究生：陳弘毅

指導教授：黃建民

國立勤益科技大學

冷凍空調與能源系碩士班

碩士論文

A Thesis  
Submitted to  
Institute of Industrial Design  
National Chin-Yi University of Technology  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Refrigeration, Air-conditioning and Energy Engineering

June 2010

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 六 月

國立勤益科技大學  
研究所碩士班  
論文口試委員會審定書

本校 冷凍空調與能源系 碩士班 陳弘毅 君

所提論文 高效率風扇過濾機組之開發

The Development of a High Efficiency Fan-Filter Unit

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

口試委員：

卓靖松

許宇平

黃建民

指導教授：

黃建民

系(所)主管：

冷凍空調與能源系  
主 任 駱文傑

中華民國九十九年七月二十六日

# 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	III
誌謝 .....	V
圖目錄 .....	VI
表目錄 .....	IX
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景與動機 .....	1
1.2 研究目的與方法 .....	4
1.3 文獻回顧 .....	5
第二章 物理模型及實驗方法 .....	7
2.1 物理模型 .....	8
2.2 實驗方法及理論模型建構 .....	9
2.2.1 原產品測試 .....	9
2.2.2 幾何及網格建構 .....	14
2.2.3 CFD 流場模擬 .....	20
2.2.4 設計新風機 .....	37
2.2.5 委託工廠製作風機 .....	37
2.2.6 新風機測試 .....	38
2.2.7 縮減機殼高度 .....	39
第三章 結果與討論 .....	42
3.1 原型機測試 .....	42
3.2 新葉輪的設計 .....	50
3.3 改良及性能測試 .....	61
第四章 結論與建議 .....	66
參考文獻 .....	67
作者簡介 .....	69

# 高效率風扇過濾機組之開發

研究生：陳弘毅

指導教授：黃建民

國立勤益科技大學冷凍空調與能源系碩士班

## 摘要

節能減碳是現在及未來都必須嚴肅面對的課題。由於科技的進步，無塵室被大量使用在各行各業，舉凡是醫院、半導體工廠、研究室中皆需運用到無塵室，而無塵室上方的風扇過濾機組（Fan-filter Unit, FFU）需耗費大量的電能。

本文研究以一型常用於半導體工廠之 2'×4' FFU 原型機為例，進行性能量測，其原有性能為 0.0658CMM/W（或 15.2W/CMM）。經以 CFD 進行現有 FFU 原型機機殼內的流場分析，然後模擬改變 FFU 內部葉輪、外殼幾何及葉輪切線速度後的流場，加以探討幾何及流動參數對機殼內壓損的影響，以期找出性能改善的方向。結果顯示當 FFU 機殼減小時對機殼內壓降的影響很小；葉輪出風口切線速度越大，機殼內壓降越大；在出口渦流（swirl）固定的情況下，葉輪越大機殼內壓降

越小；切線速度固定時，葉輪出口寬度越大，機殼內壓降越小。

根據分析結果，重新設計葉輪，經加工、組裝及測試後，性能提升為 0.0762 CMM/W (或 13.1W/CMM)，另以新葉輪搭配經拆解、加工縮減厚度之機殼，再經組裝及測試後，性能提升為 0.0978CMM/W(或 10.23W/CMM)。

**關鍵字：**風扇過濾機組、性能改善、流場分析、測試



# The Development of a High Efficiency Fan-Filter Unit

Researcher : Hung-I Chen

Advisor : Jeng-Min Huang

Department of Refrigeration, Air-conditioning and Energy Engineering  
National Chin-Yi University of Technology

## ABSTRACT

The energy saving and Carbon Dioxide reduction is a serious topic that human must face in the present and future. As a result of the technical progress, cleanroom is widely applied in the hospital, the semiconductor factory, the laboratory. Fan Filter Unit is a large energy consumption equipment in cleanroom.

This article uses a common 2'×4' FFU as an example to measure its performance. The original performance of this FFU is 0.0658CMM/W (or 15.2W/CMM). This FFU is investigated by CFD to have an understanding to its inner flow field and pressure drop. The impeller diameter, the height of casing and the swirl at impeller outlet are varied to find a design of lower pressure drop. The results show that the height of casing affects the pressure drop in casing slightly. The pressure drop of casing increases as swirl increases. For a fixed swirl, the pressure drop of casing decreases as impeller diameter increases.

According to analysis result, a new impeller is redesigned by centrifugal fan design software. After manufacturing, assembly and test, the performance is promoted to 0.0762 CMM/W (or 13.1W/CMM). Furthermore, reduction of the height of casing combined with the new impeller, the performance is improved to 0.0978CMM/W (or 10.23W/CMM).

**Keyword:** FFU, performance improvement, flow analysis, testing





## 誌 謝

能再有機會讓自己在學業上、專業能力上更上一層樓，要感謝師長們無怨無悔的付出與辛若的指導，才能讓我在研究所的求學過程中順利完成學業。

首先要感謝許守平主任、黃建民教授，以及冷凍空調與能源系內所有教授們。師長們這幾年，不管是在課業上或為人處事上都給我許多指導及教誨，師恩浩蕩永銘於心，在此致上最誠摯的感謝。

此外，感謝許守平教授，黃建民教授，卓清松教授等口試委員，在百忙中撥冗指導，並不吝給予本論文之指正，使我受益匪淺，特此致謝。也要感謝我的家人在我求學期間的體諒與支持，本人才能無後顧之憂，順利完成學業，更感謝同事石時老師、良田老師、文賢老師及節能元件實驗室學弟們，在本人實物製作上及論文撰寫上給予建議與協助。最後，再次感謝曾經陪我一同走過這段經歷的師長、同學、學弟們，希望在未來的日子裡，祝福大家都能心想事成，身體健康，事事如意。

## 圖目錄

圖 1-1	半導體廠電力消耗分布圖.....	3
圖 1-2	半導體廠之冷氣負荷.....	3
圖 2-1	研究流程圖.....	7
圖 2-2	FFU 出入風向圖.....	8
圖 2-3	加 HEPA 之 FFU 出入風向圖.....	8
圖 2-4	FFU 連接風罩與轉速器放置.....	9
圖 2-5	HEPA 貼著入風口.....	10
圖 2-6	入風口以外的面積用紙板遮蔽.....	10
圖 2-7	用膠帶將小型濾網貼在風洞的入風口.....	11
圖 2-8	AMCA 風洞數據擷取系統圖.....	12
圖 2-9	控制儀表.....	12
圖 2-10	風洞噴嘴與流量對照表.....	13
圖 2-11	噴嘴內示圖.....	13
圖 2-12	以 PANEL 來定義圖座標每個點的位置.....	14
圖 2-13	定義內外弧圈的點.....	15
圖 2-14	將未能密合的點以線來連接劃分.....	15
圖 2-15	將連成線的區塊實體化.....	16
圖 2-16	將連成線的區塊實體化.....	16
圖 2-17	將圖 2-16 的實體區塊複製，成為一個完整的實體.....	17
圖 2-18	實體完成後以分割的形式呈現.....	17
圖 2-19	分割的形式須先 MERGE（合併）.....	18
圖 2-20	MERGE 後再 COUPLE（連結）.....	18
圖 2-21	COUPLE 後以完整的形式呈現.....	19
圖 2-22	先選擇要設多孔性材質的部份.....	20
圖 2-23	點選工具列的 TOOLS，再選擇 CELL TOOL.....	21
圖 2-24	圖解.....	21
圖 2-25	選擇 MODIFY TYPE 再點選 CELL SET 後完成設定.....	22
圖 2-26	設定完後選擇的部份會變為圖 2-24 所選的顏色.....	22
圖 2-27	完成選取多孔性材質的實體圖.....	23
圖 2-28	利用 STAR-CD 軟體設定邊界.....	24

圖 2-29	需設定的邊界有 INLET、OUTLET 及 WALL .....	25
圖 2-30	INLET 為入風口條件 .....	25
圖 2-31	OUTLET 為出風口條件 .....	26
圖 2-32	WALL 為旋轉體條件 .....	26
圖 2-33	完成邊界條件設定 .....	27
圖 2-34	邊界設定完成，再對 INLET 設 U (流速) 及 V (切線速度) ..	27
圖 2-35	WALL 也需設定 OMEGA (轉速) .....	28
圖 2-36	為設定空氣條件 .....	28
圖 2-37	為設定紊流模式 .....	29
圖 2-38	為設定監測與參考點 .....	29
圖 2-39	為 A、B 參數值設定 .....	30
圖 2-40	為設定計算流場的方式，本研究使用 SIMPLE 做迭代計算.....	30
圖 2-41	為設定迭代次數 .....	31
圖 2-42	為上述設定做儲存 .....	31
圖 2-43	開始流場計算 .....	32
圖 2-44	紅框部份顯示為收斂狀態，表示完成計算 .....	32
圖 2-45	紅框部份顯示為發散狀態，需重新設定各項數據再計算.....	33
圖 2-46	選擇需要的選項顯示流場 .....	33
圖 2-47	完成開啟流場圖 .....	34
圖 2-48	各種高度之流場圖 .....	34
圖 2-49	入風口之流場圖；輸入指令，計算入風口的平均壓力 .....	35
圖 2-50	框選各出風口位置；輸入指令，計算各出風口的平均壓力 .....	35
圖 2-51	為圖 2-50 所框選的各出風口流場圖 .....	36
圖 2-52	原葉輪 .....	36
圖 2-53	新葉輪 .....	38
圖 2-54	NC 電腦油壓剪床 .....	39
圖 2-55	經裁切後之邊框側板 .....	40
圖 2-56	氬焊間隔點焊方式焊接 .....	41
圖 2-57	重新組立後之 FFU 邊框 .....	41
圖 3-1	HEPA 在不同速度下的壓力曲線圖 .....	44
圖 3-2	入風口濾網在不同速度下的壓力曲線圖 .....	45
圖 3-3	不同切線速度下各種外殼高度的壓降曲線圖 .....	47
圖 3-4	不同風扇外徑下各種切線速度的壓差曲線圖 .....	49
圖 3-5	CFDC 主功能幕 .....	50

圖 3-6	CFDC 之風機操作條件設定 .....	51
圖 3-7	間隙形狀之選擇及摩擦係數之設定.....	53
圖 3-8	葉輪子午面特徵幾何的輸入.....	54
圖 3-9	性能計算之結果.....	55
圖 3-10	新設計風機之性能圖 .....	56
圖 3-11	細部設計功能幕.....	56
圖 3-12	子午面外形設計 .....	57
圖 3-13	r- $\theta$ 面外形設計.....	57
圖 3-14	將葉片加上厚度且計算流道截面積變化 .....	58
圖 3-15	新葉輪設計圖 .....	59
圖 3-16	FFU 改良前後在各種 CASE 下之風量比較.....	63
圖 3-17	FFU 改良前後在各種 CASE 下之能源效率比較.....	65



## 表目錄

表 3-1	4 種 CASE 安裝出入濾網之狀況.....	42
表 3-2	原風機在各轉速及阻抗下的風量、電壓、電流值及功率 .....	43
表 3-3	入風口濾網在不同速度下的壓力值.....	44
表 3-4	入風口濾網在不同速度下的壓力值.....	45
表 3-5	不同切線速度下各種外殼高度的壓降.....	47
表 3-6	在不同風扇外徑下，各種切線速度的壓降.....	48
表 3-7	4 種改良狀況內容說明.....	61



# 第一章 緒論

## 1-1 研究背景與動機

近幾年來，由於半導體產業快速發展，使得晶圓製造或光電技術層級從微米、次微米到奈米，生產技術的進步與發展對於產品的高精密化、小型化、高品質化及高可靠性之需求更加迫切，因此控制產品所接觸之大氣的潔淨度及溫濕度，使產品能在一個良好之環境空間中生產、製造更是刻不容緩，因此即發展出無塵室（Cleanroom）。

無塵室之定義為將一定空間範圍內之空氣中的微塵粒子、有害空氣、細菌等之污染物排除，並將室內之溫濕度、潔淨度、室內壓力、氣流速度與氣流分佈、噪音振動及照明、靜電控制在某一需求範圍內，而所給予特別設計之空間，亦即是不論外在之空氣條件如何改變，其室內均能具有維持原先所設定要求之潔淨度、溫濕度及壓力等性能之特性[1]。

無塵室的空調系統對半導體的設計、製程、產品的良率及可靠性有很大的影響。然而無塵室耗能為一般空調系統之5~10倍[2]，其最大的差異有以下幾點：1.溫濕度的要求比一般空調低。2.恆溫恆濕的控制。3.對空氣品質的要求較嚴格。4.全外氣量和換氣次數大。5.潔淨室空調系統24小時全天運轉。6.氣流分佈需均勻。7.運轉成本相當

高。8.需與鄰近區域維持壓差。

目前無塵室的送風系統可以分為軸流風扇型 (Axial Fan Type)、空調箱 (Air handling Unit) 系統及風機-濾網機組 (Fan-Filter Unit, FFU) 系統, FFU的使用大概始於1980年代, 到1990年代幾乎所有新建的無塵室(特別是亞太地區)均屬FFU型態[6], 採用高效率FFU系統, 用以取代傳統無塵室風量循環系統中之大型可變距軸流風機或空調箱系統, 其優點如下[2]:

- (1) 天花板可模組化施工, 工期短, 有利製程調整 FFU 之彈性安裝。
- (2) 天花板內氣壓低於 C/R 之氣壓, 塵埃不易進入無塵室, 天花板面密封簡單, 濾網更換及維修方便, 不影響製程。
- (3) FFU 循環系統壓損小, 馬達耗電小。
- (4) FFU 噪音與耗電皆較小, 不像軸流風機或 AHU 系統, 出入口需加裝消音器。
- (5) 對 FFU、軸流風機、空調箱循環系統之耗能比較, 以 FFU 消耗電力最低[3]。

半導體產業是所有產業中最耗能源的一種, 依據半導體廠的耗能比例調查[4] [9], 廠務系統的耗能佔了整廠耗能的 56.6%, 而空調系統約佔了全部耗能的 40%是最大的部分。FFU產品技術基本上是送風機技術的延伸, 耗電量佔了整個工業無塵室約 19%, 如圖 1-1、1-2

所示，若能藉由使用氣動效率(aerodynamic efficiency)高的扇葉與風道，加上注重整體組裝的品質，即能同時達到振動與噪音的抑制及提升能源效率的目的。能源高效使用不但能使社會整體經濟成本降低，同時也能降低對自然環境的衝擊，而從使用無塵室相關產業的角度而言，高能源使用效率可降低生產成本，是面對競爭者的利器，同時也是技術密集度高的產業永續發展的保障。

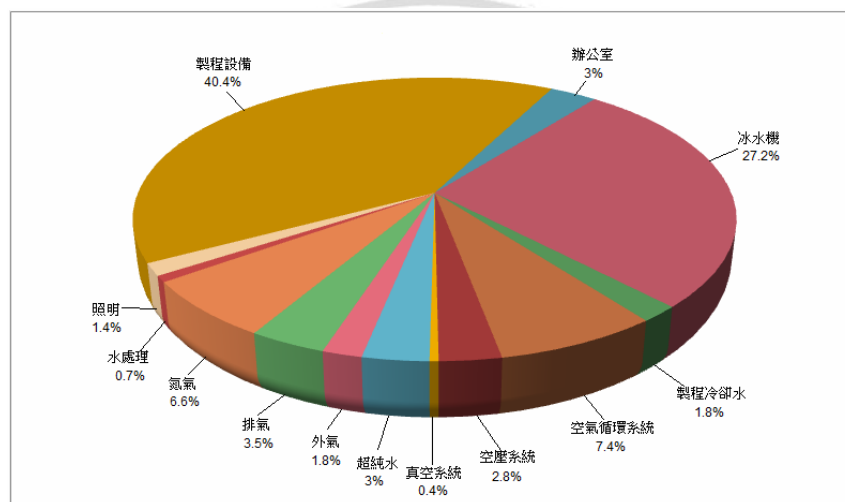


圖 1-1 半導體廠電力消耗分布圖[4]

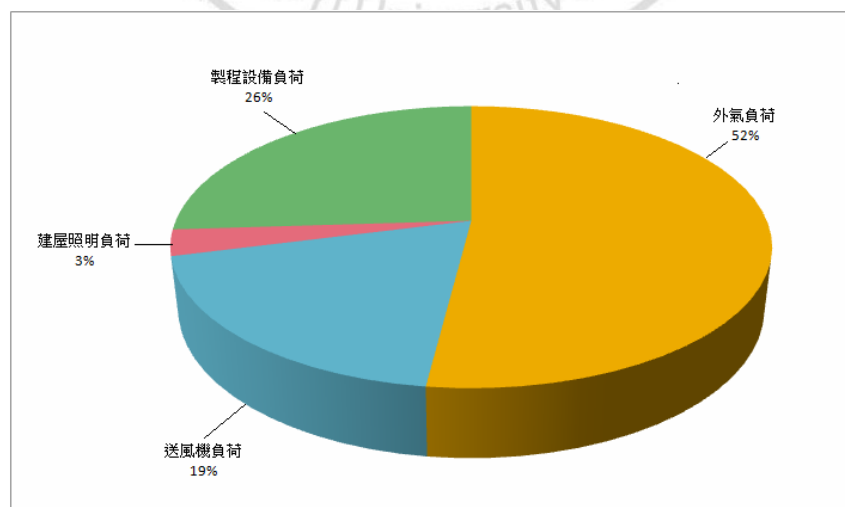


圖 1-2 半導體廠之冷氣負荷[4]



## 1.2 研究目的與方法

先以計算流體力學軟體進行 FFU 機殼內流場分析，找出壓損較小的設計，根據這些結果以離心風機設計軟體進行新風輪設計及製造，以其改善現有 FFU 之單位風量耗能 (W/CMM)。此外，現行市售 FFU 機殼材質多為不鏽鋼板、烤漆鋼板或鋁合金板所製成，體機龐大，因此本文也實際對於 FFU 原型機進行改裝，若能縮減機殼高度而不影響其性能，不但能增加無塵室天花板更換濾網及維修空間，同時由於材料減少、重量減輕，對於吊頂天花龍骨(Ceiling grid)的重量負荷也能減輕。



### 1-3 文獻回顧

李延青等人[6]進行 4'×4' FFU 之平行圓盤無流線導葉片擴散器之分析研究，以 CFD 進行模擬分析，其結果顯示使葉輪吹出氣流動壓會轉換成靜壓，文中對壓力轉換過程及機制做一詳細分析。

陳俊傑等人[7]以流場速度差劃分無塵室工作區之可行性與系統節能分析，藉由改變 FFU 個別出風量劃分工作區域的可行性，無塵室內非工作區域，釋放高濃度固定粒徑之化學粒子，監測工作區域內該化學粒子之分布情況，可以評估無塵室內以流場速度差建立的空氣圍幕（Air Curtain）對高濃度污染之阻絕效果。文中並探討無塵室以流場速度差劃分工作區於能源上的節約效果。

李延青等人[8]進行 4'×4' FFU 之 3D 流線導葉片擴散器之應用，此為[6]的延伸研究，由 CFD 模擬分析 4'×4' FFU 葉輪出口裝流線導葉片擴散器與無流線導葉片擴散器並比較其結果，葉片擴散器的擴壓效果較佳，但只有侷限在設計點附近，遠離設計點時，葉片擴散器的存在反而降低性能。FFU 加上前後過濾器後較難確定其設計點。

Hu 等人[10]以 CFD 比較探討軸流式及離心式 FFU 無塵室之性能，風扇性能曲線與系統元件一併納入 CFD 的計算過程中。Wu[11]探討 FFU 系統的噪音量測與音量預估，無塵室中，噪音值超過設計團對預期的事情經常發生，有時甚至比仿冒品的噪音值還要大，這篇

文章探討形成這個不合理現象的原因，以理論分析及實驗量測進行研究。Xu 等人[12]評估 FFU 在實驗室中的氣體動力及能耗的性能，文中共呈現了 10 組新款 1220mm × 610mm (4'×2') 的 FFU 的性能數據。Xu 等人[13]探討無塵室用之大型 FFU 之性能，是[12]的延伸研究，本文以[12]的方法測試 7 型新款 122cm × 122cm (4'×4') 大型 FFU 之氣動特性及能耗。

曹芳海等人[5]以一相同樓板面積、層流設計無塵室為例，假設運轉模式為 365 天、每天 24 小時，FFU 運轉點固定在(10mmAq, 0.4m/s) 的用電量比較，單位風量耗能最差值為 32W/CMM，最佳值為 9W/CMM，平均值為 14W/CMM。

## 第二章 物理模型及實驗方法

本文研究進行的流程圖如圖 2-1 所示：

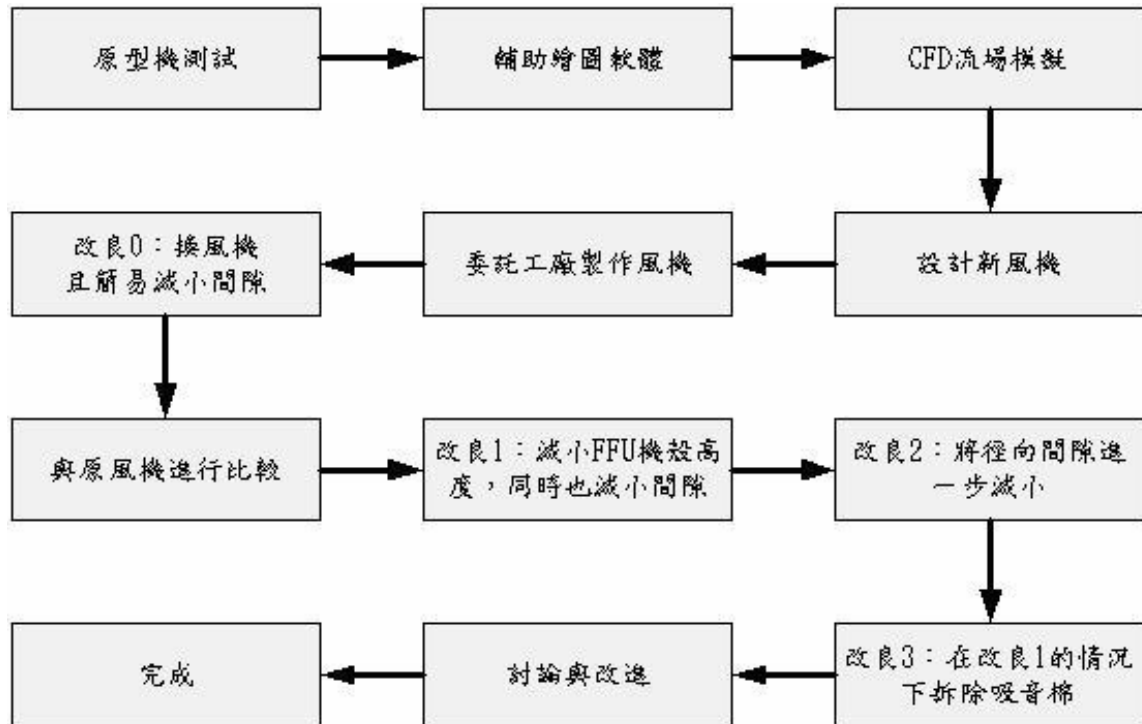


圖 2-1 研究流程圖

## 2-1 物理模型

風由入風口吸入再經由風扇向兩側吹出，兩側壁面各有風道設計，可將風向下輸送，如圖 2-2 所示；如有加裝高效率微粒空氣濾網 (High Efficiency Particulate Air filter, HEPA)，可使向下吹的風有整流的效果，讓風平均分配向下輸送，如圖 2-3 所示。

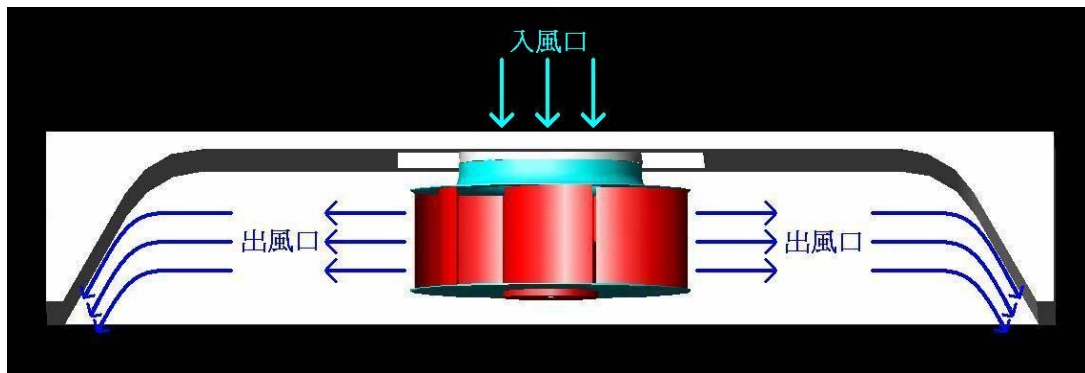


圖 2-2 FFU 出入風向圖

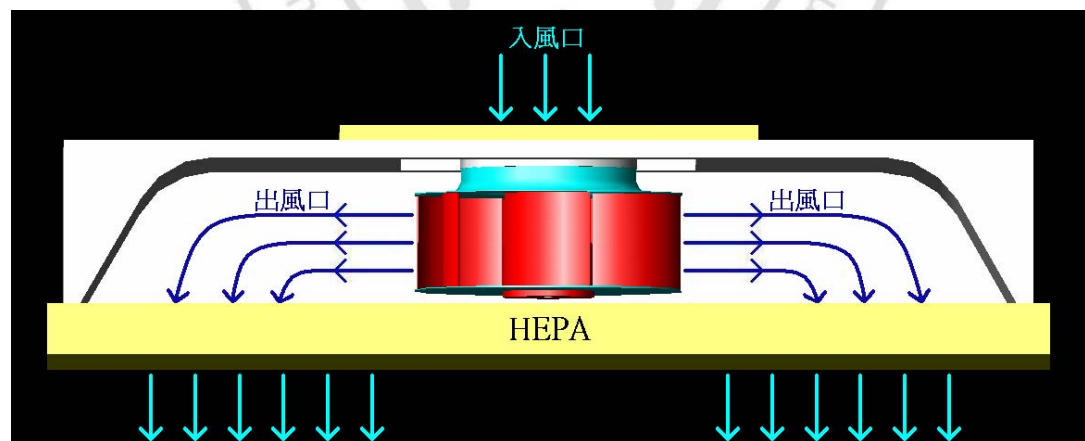


圖 2-3 加 HEPA 之 FFU 出入風向圖

## 2-2 實驗方法及理論模型建構

### 2.2.1 原產品測試

本產品為半導體無塵室中的 FFU，進行內部各元件與附件的測試。其測試項目包括整體 FFU 性能、出風口 HEPA 及入風口濾網。

(1) 整體 FFU 性能：先將機殼反轉墊高，使入風口離地面約 40 公分，以利轉速器的測速；出風口連接風罩，測其風速及風量，如圖 2-4 所示；將 FFU 整機接上 220V 的單相電源，再以夾式電表測不同情況下之電壓及電流。



圖 2-4 FFU 連接風罩與轉速器放置

(2) HEPA、入風口濾網：利用風洞來測量HEPA以及入風口濾網的風阻 ( $P_s$ ) 與風量 ( $Q$ )。圖 2-5 至 2-7 為HEPA及入風口濾網與風洞的實驗裝置圖，因為風洞入風口的面積小於HEPA的整體面積，故使用紙箱來遮蔽HEPA其餘的面積，使HEPA留下與風洞入風口面積一樣大小的吸入口。利用本系空調實驗室的AMCA(Air Movement and Control Association International, Inc) 風洞來測得數據，圖 2-8 至 2-11 為AMCA風洞的各種儀器設備。



圖 2-5 HEPA 貼著入風口



圖 2-6 入風口以外的面積用紙板遮蔽

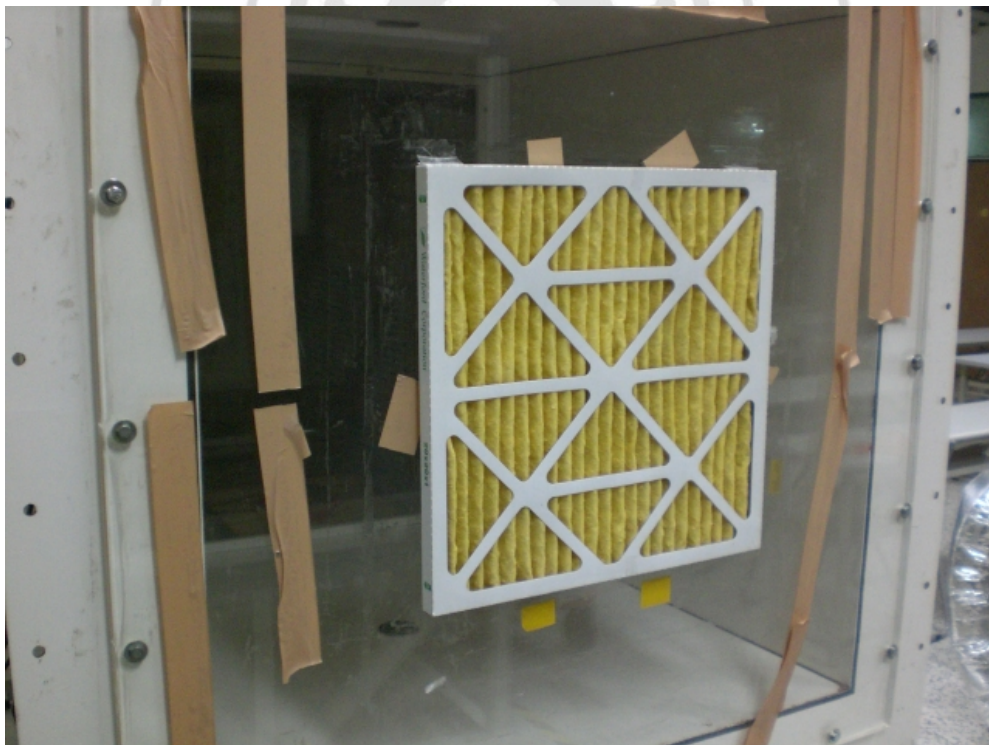


圖 2-7 用膠帶將小型濾網貼在風洞的入風口



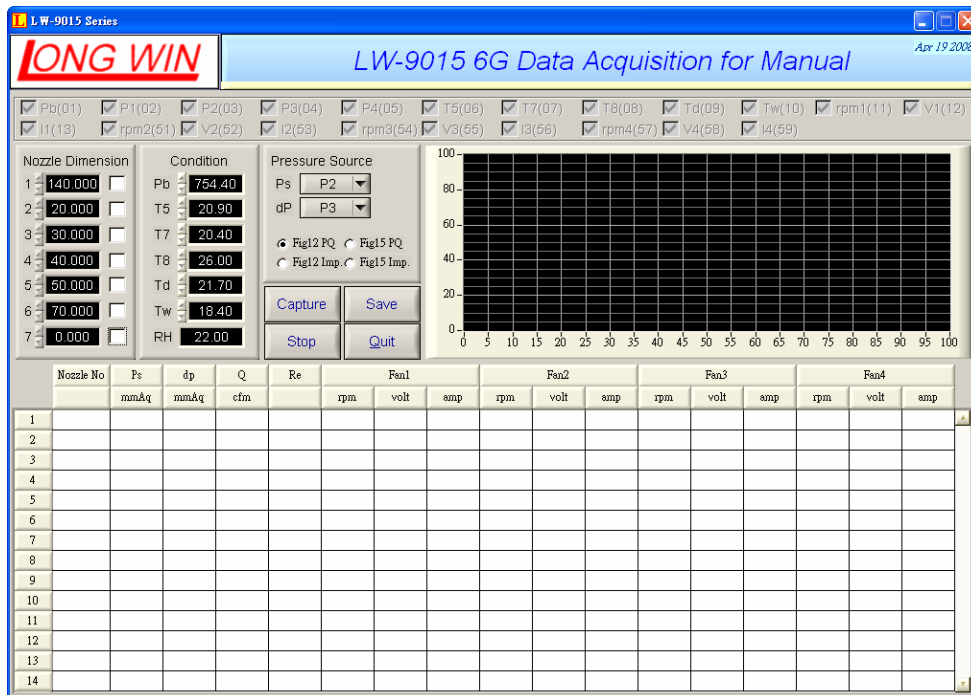


圖 2-8 AMCA 風洞數據擷取系統圖



圖 2-9 控制儀表

No.	噴嘴尺寸 (mm)	最低壓力 12.6 mmAq 對應流量 CFM	最高壓力 127 mmAq 對應流量 CFM
#1	10	2.9	7.3
#2	20	9.2	30
#3	30	21	67
#4	40	38	119
#5	50	57	184
#6	70	111	361
#7	100	227	737
#8	140	445	1444

圖 2-10 風洞噴嘴與流量對照表

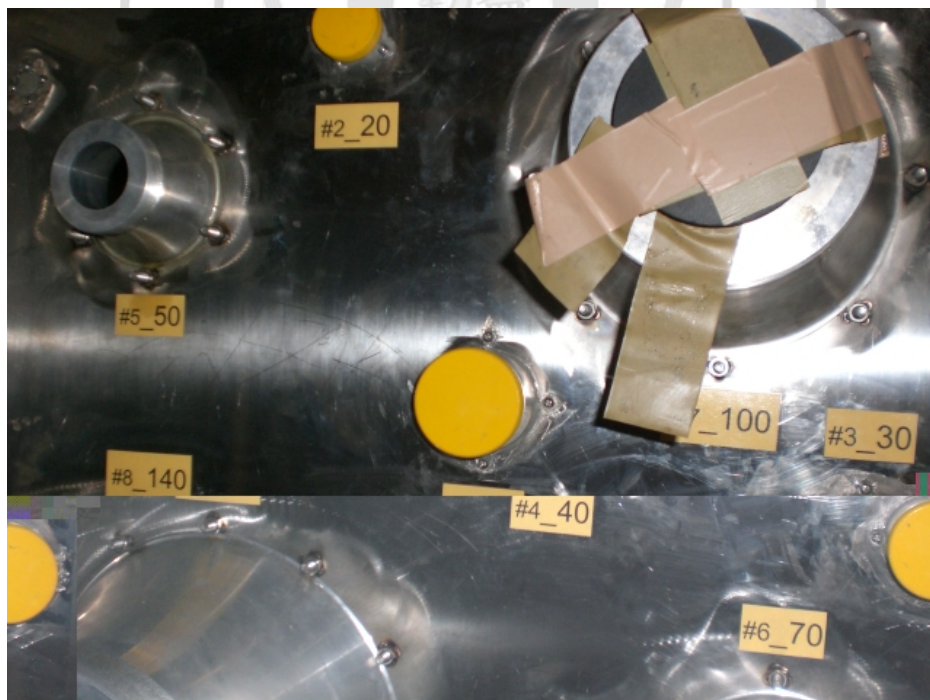


圖 2-11 噴嘴內示圖

## 2.2.2 幾何及網格建構

圖 2-12 至 2-21 為幾何建模及計算用網格建立的過程，基本上是以 STAR-CD 內的 Panel 來定義圖座標每個點的位置，再定義內外弧圈的點，將未能密合的點以線來連接劃分，最後將每個點及連成線的區塊實體化，把一半的實體複製成完整的實體。

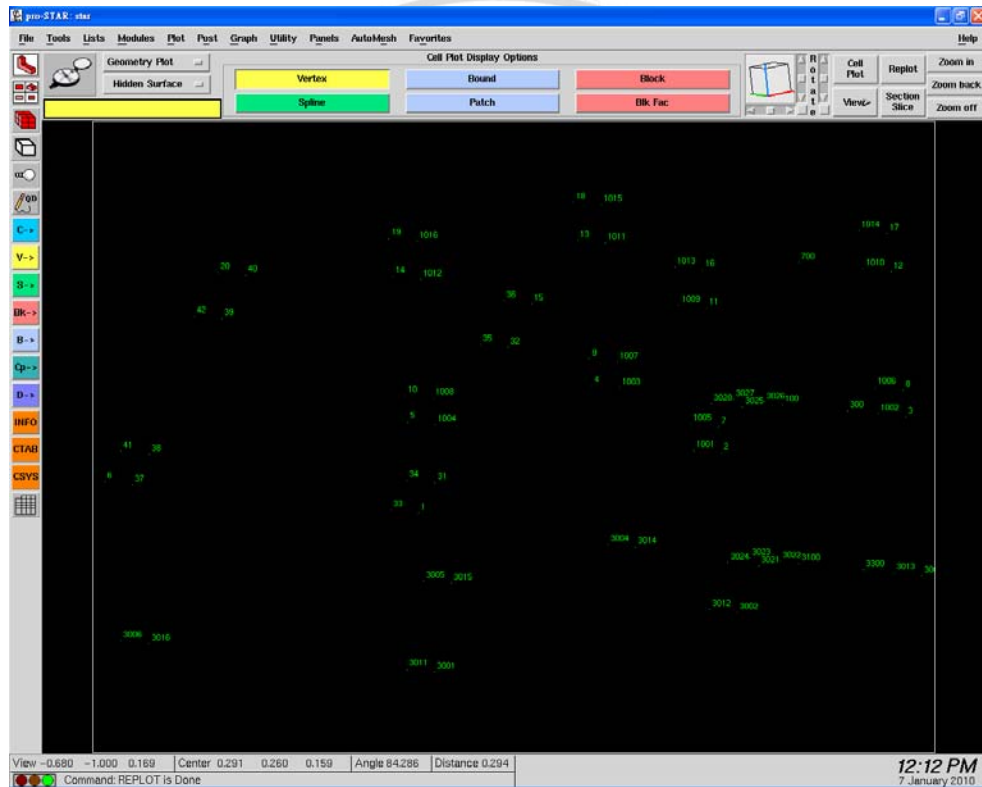


圖 2-12 以 PANEL 來定義圖座標每個點的位置

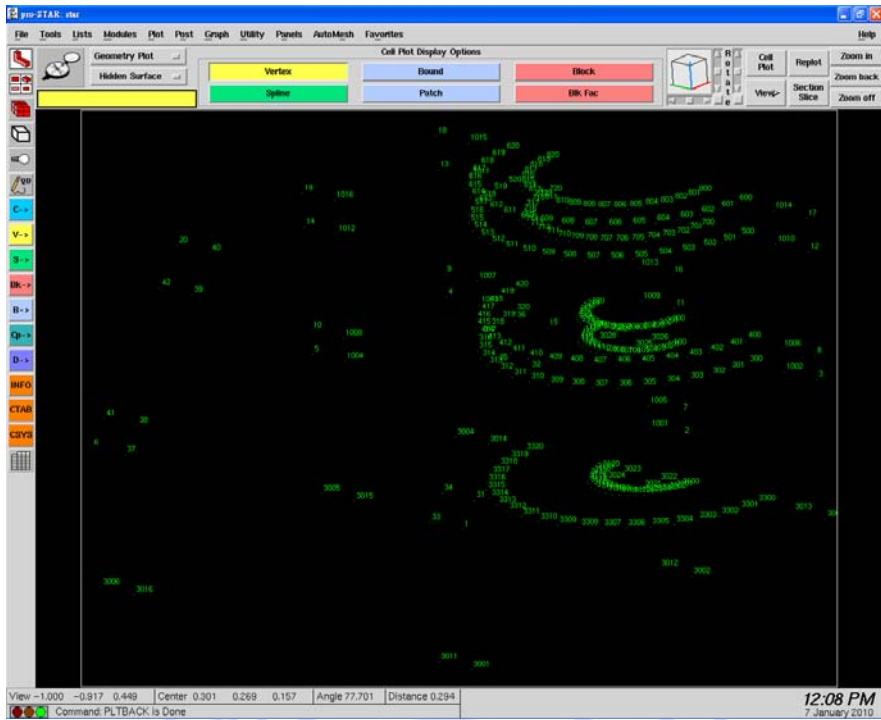


圖 2-13 定義內外弧圈的點

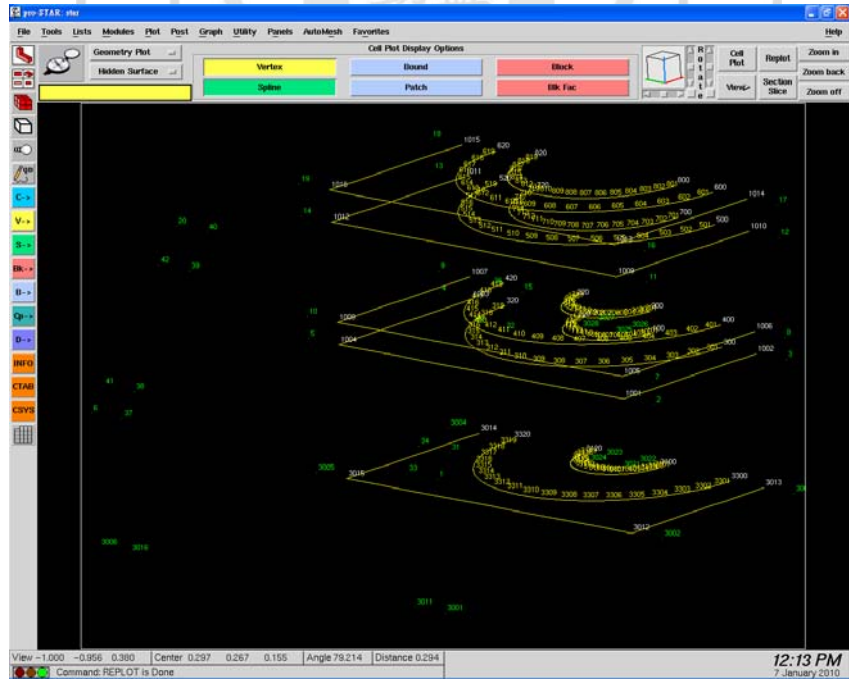


圖 2-14 將未能密合的點以線來連接劃分

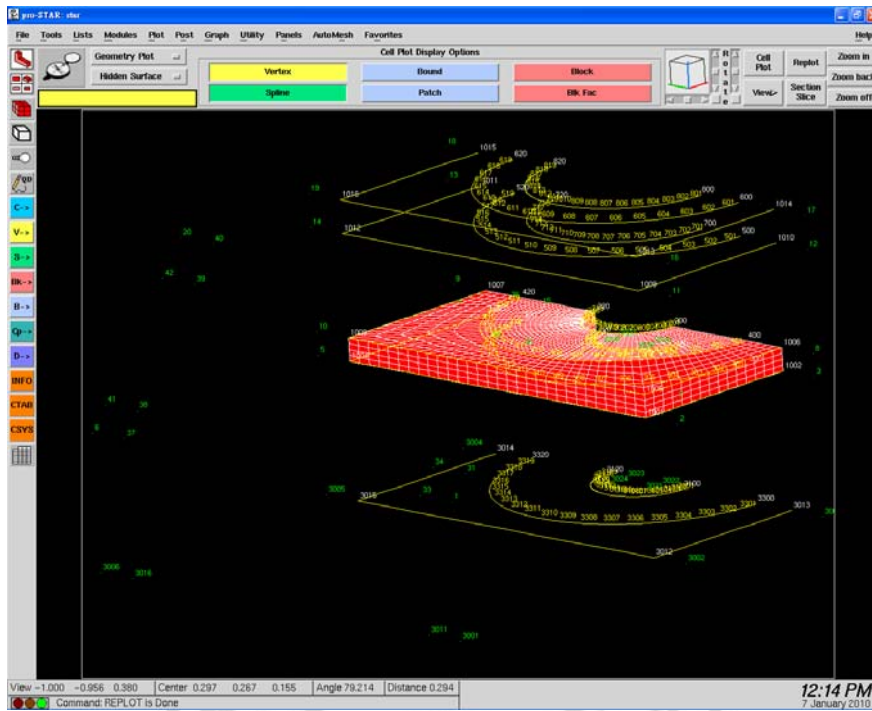


圖 2-15 將連成線的區塊實體化

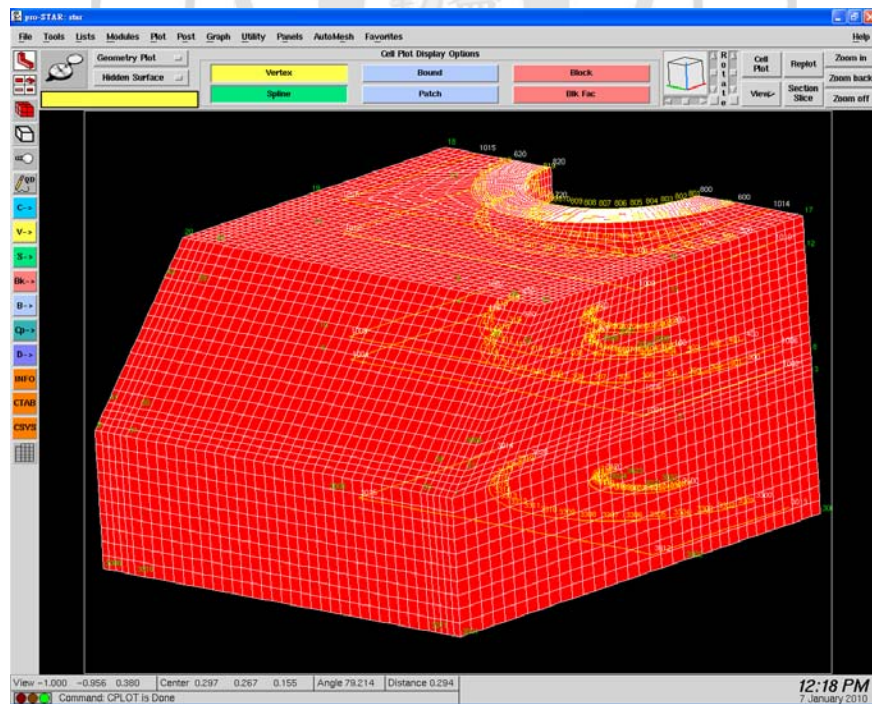


圖 2-16 將連成線的區塊實體化

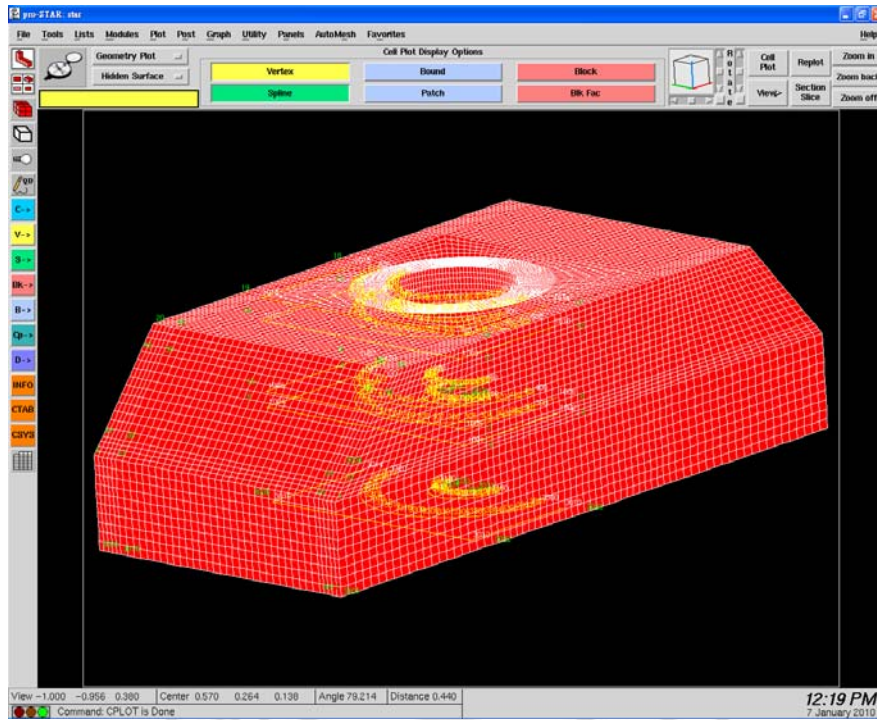


圖 2-17 將圖 2-16 的實體區塊複製，成為一個完整的實體

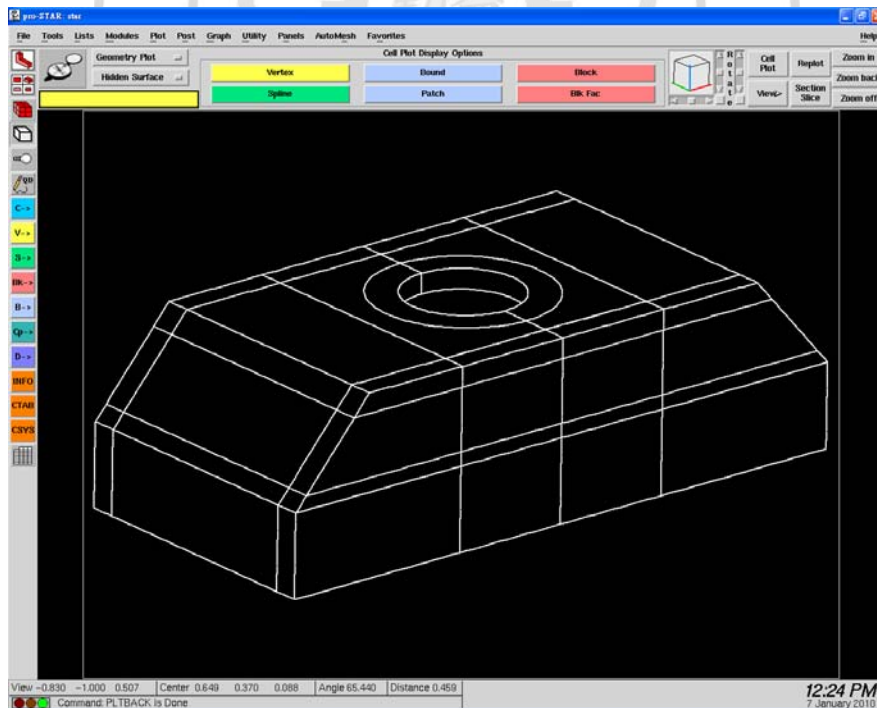


圖 2-18 實體完成後以分割的形式呈現

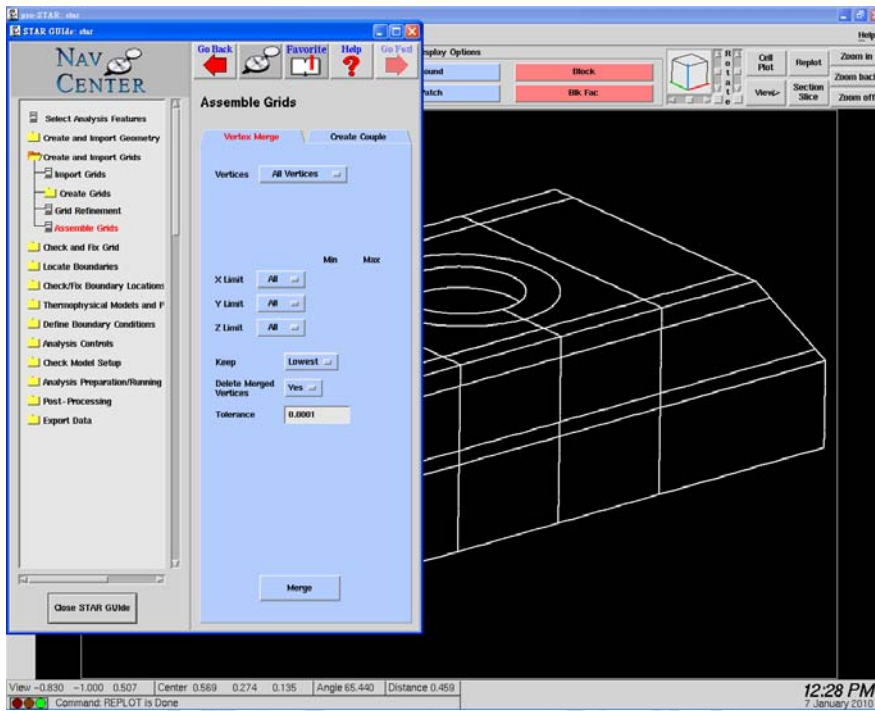


圖 2-19 分割的形式須先 MERGE (合併)

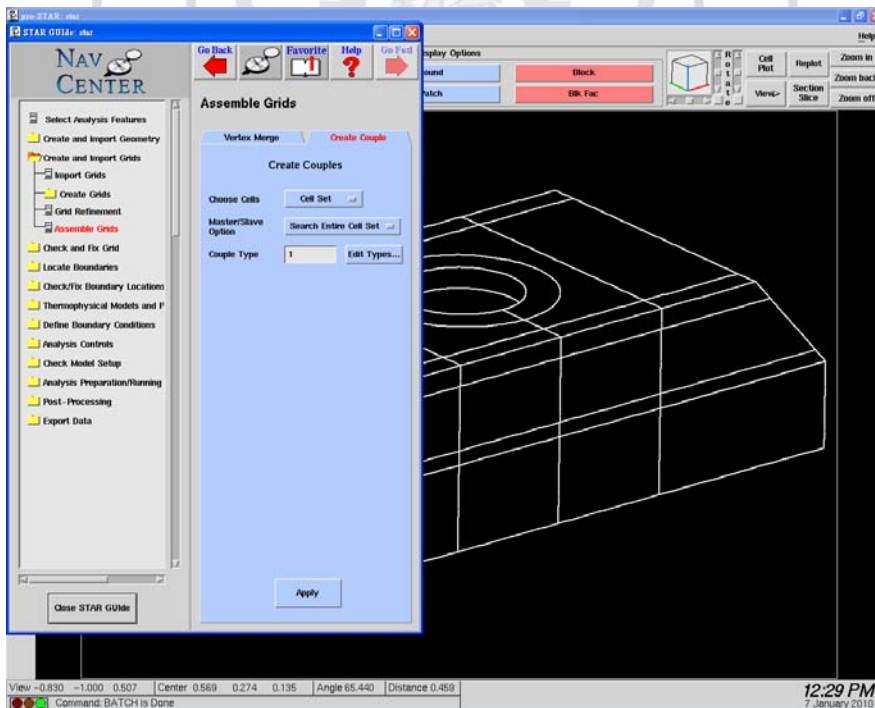


圖 2-20 MERGE 後再 COUPLE (連結)

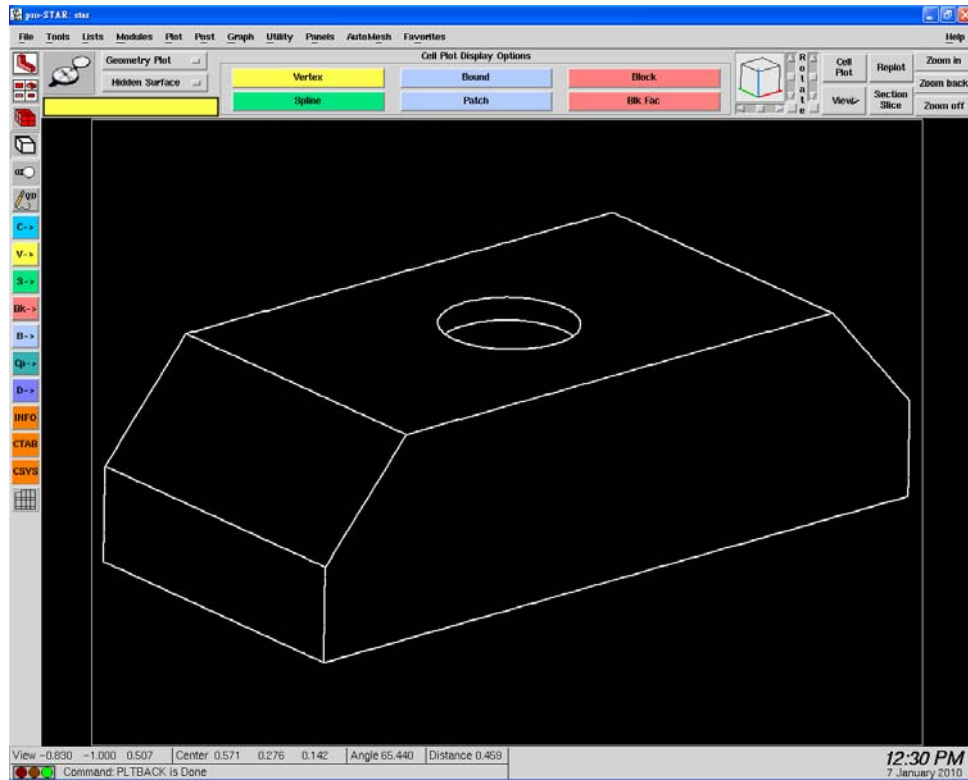


圖 2-21 COUPLE 後以完整的形式呈現





### 2.2.3 CFD 流場模擬

使用 CFD 做流場模擬前需先設定多孔性材質、邊界條件與一些基本參數值等，使模擬出來的流場可以較接近實際。多孔性材質是為了模擬 HEPA，圖 2-22 至 2-27 為設定多孔性材質的步驟。

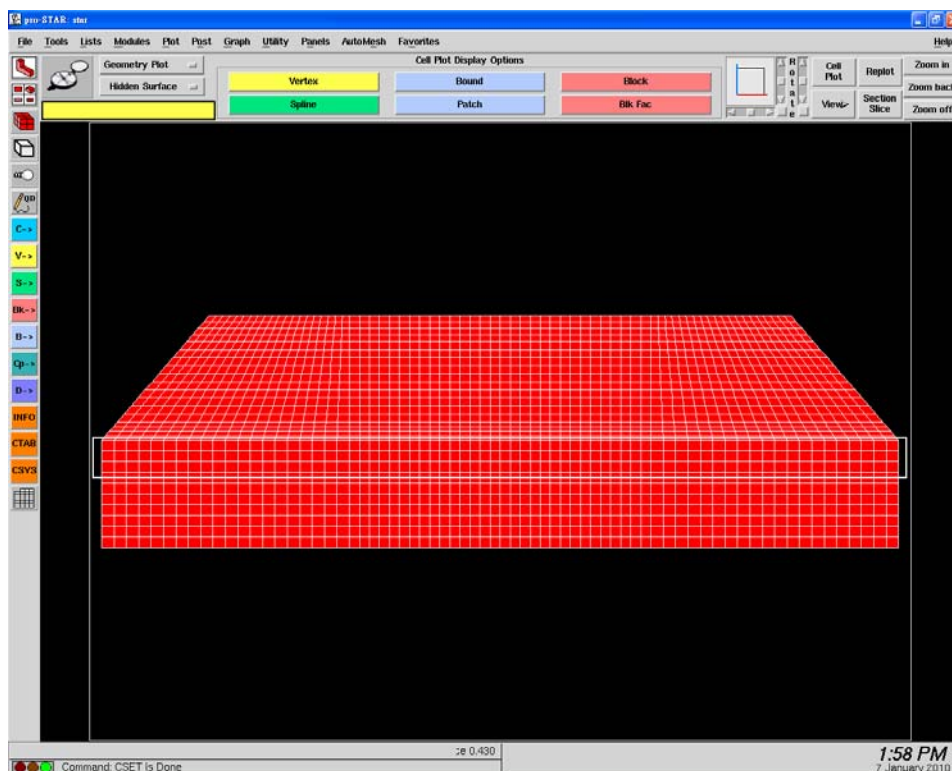


圖 2-22 先選擇要設多孔性材質的部份

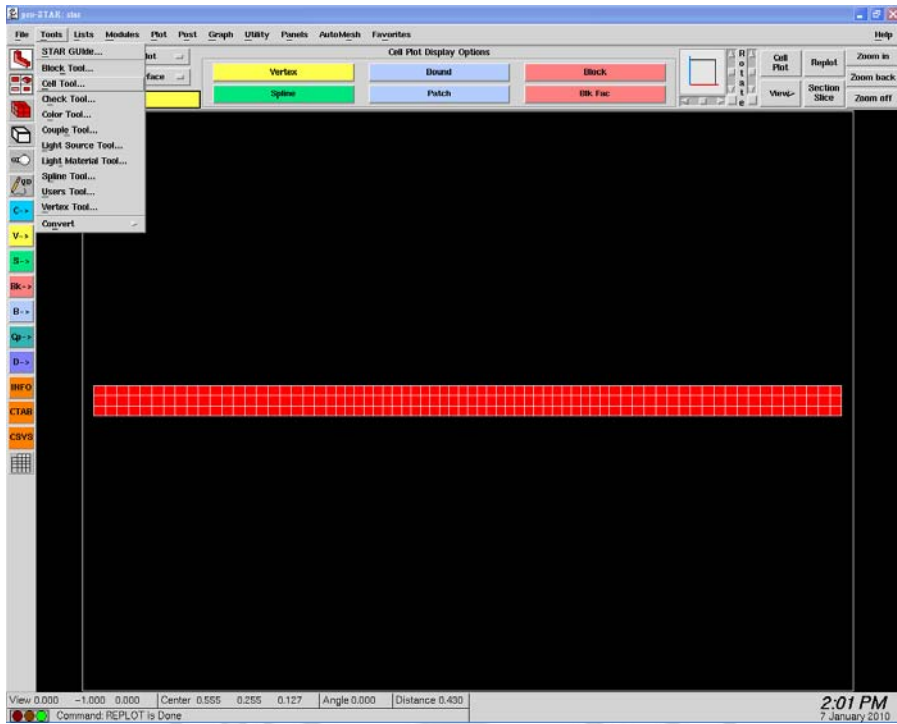


圖 2-23 點選工具列的 TOOLS，再選擇 CELL TOOL

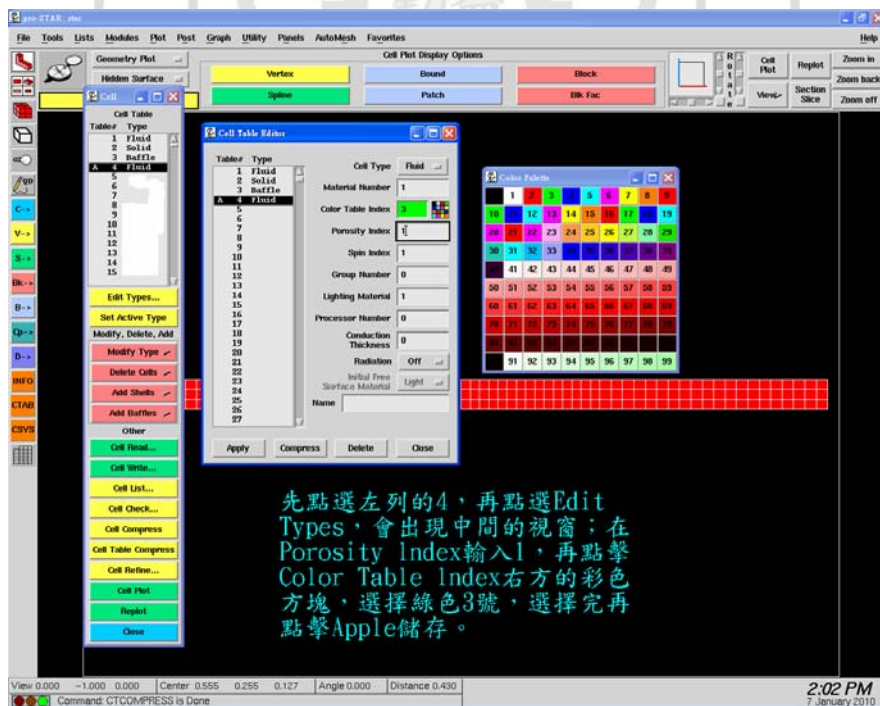


圖 2-24 圖解

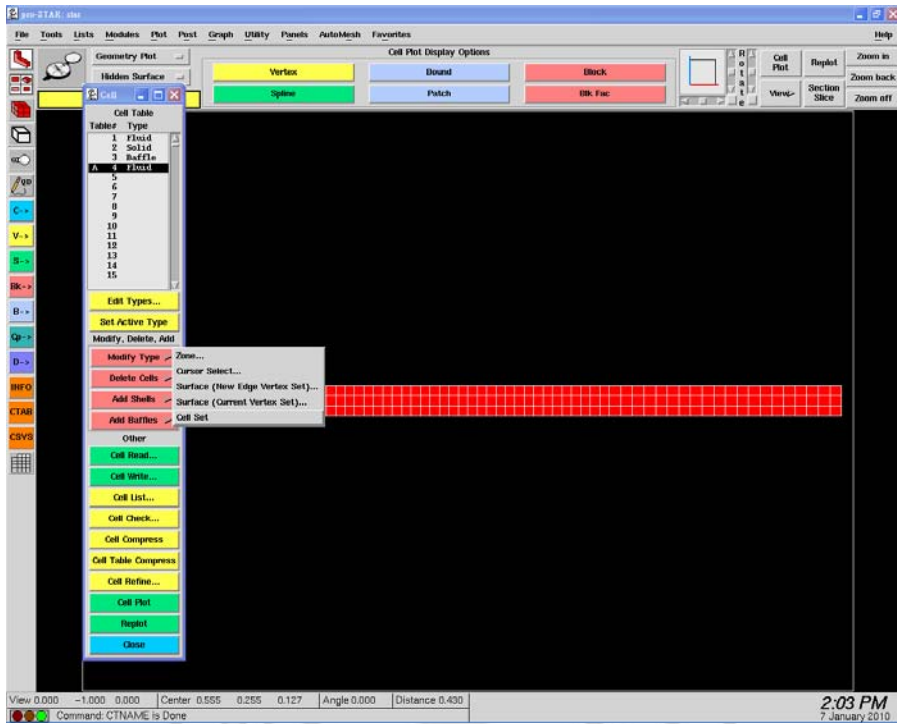


圖 2-25 選擇 MODIFY TYPE 再點選 CELL SET 後完成設定

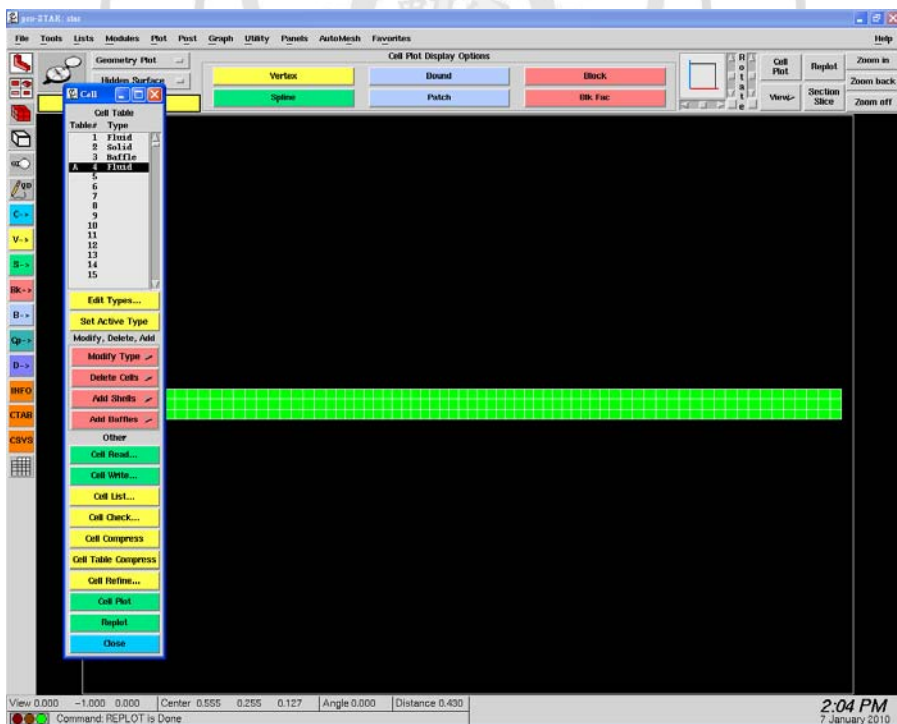


圖 2-26 設定完後選擇的部份會變為圖 2-24 所選的顏色

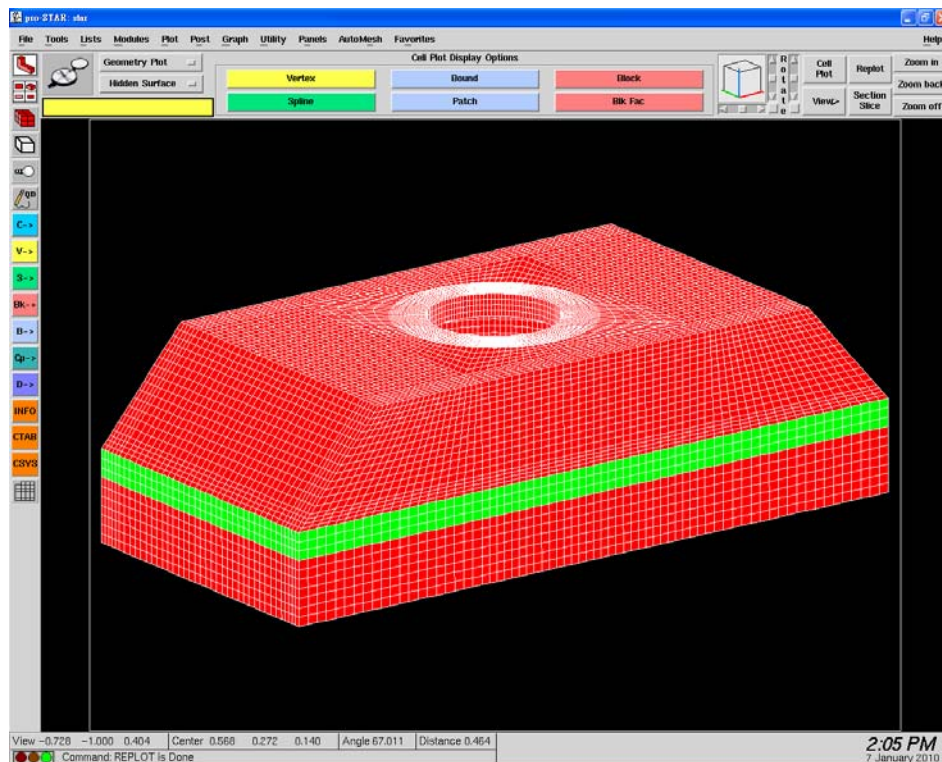


圖 2-27 完成選取多孔性材質的實體圖

圖 2-28 至 2-33 為邊界條件的設定流程，入口邊界 (inlet) 設定在風輪的出口處，如圖 2-30 所示，本研究不進行風扇流場的模擬。出風口設在 HEPA 的出口，如圖 2-31 所示。由於 HEPA 有整流的效果，會使出口流速較均勻，較容易收斂。風輪的上、下蓋設為旋轉壁面邊界，如圖 2-32 所示，模擬風輪摩擦空氣。圖 2-34 至 2-42 為流動條件的設定，包括設定流體物理性質、選定紊流模式 (k- $\epsilon$  high Reynolds number model)、選定觀測點 (位於出口上)、設定多孔材料性質等，做為計算的基礎。

本研究選用 SIMPLE 做為迭代程序，在這個案例中，有內部壓力

迭代的PISO並沒有顯示出較佳的收斂性，且計算時間較長，故不予選用。收斂條件定為速度、壓力、紊流動能的相對殘餘值皆低於  $1 \times 10^{-4}$ 。圖 2-43 至 2-45 為計算的過程，大部份的情況都能收斂，但仍有少數無法計算出答案來。

圖 2-46 至 2-51 為後處理過程，由於本研究重點在計算機殼內的壓力損失，因此要切出進風口及出風口的網格，分別計算其平均全壓（total pressure）後再相減，即可得出進、出口全壓差。

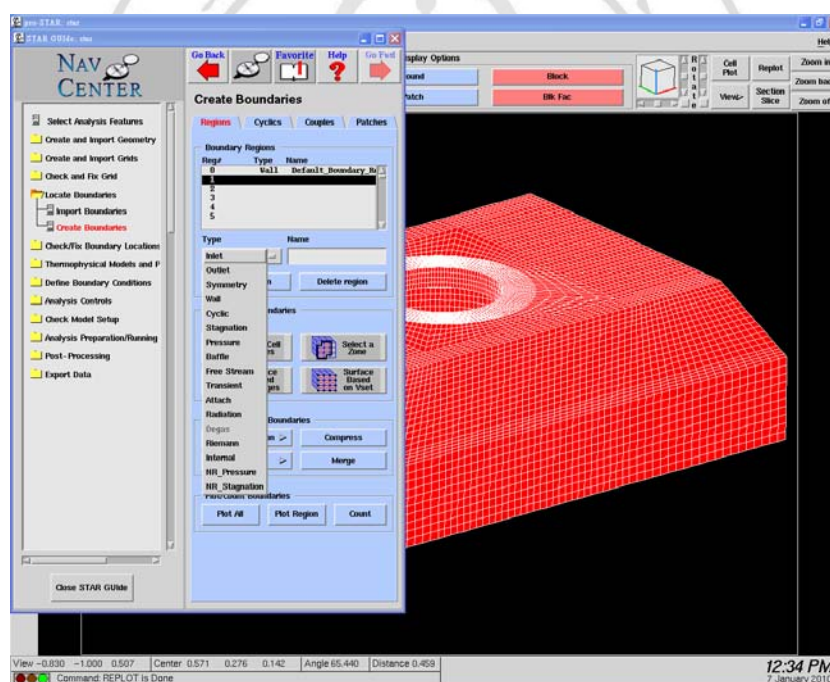


圖 2-28 利用 STAR-CD 軟體設定邊界

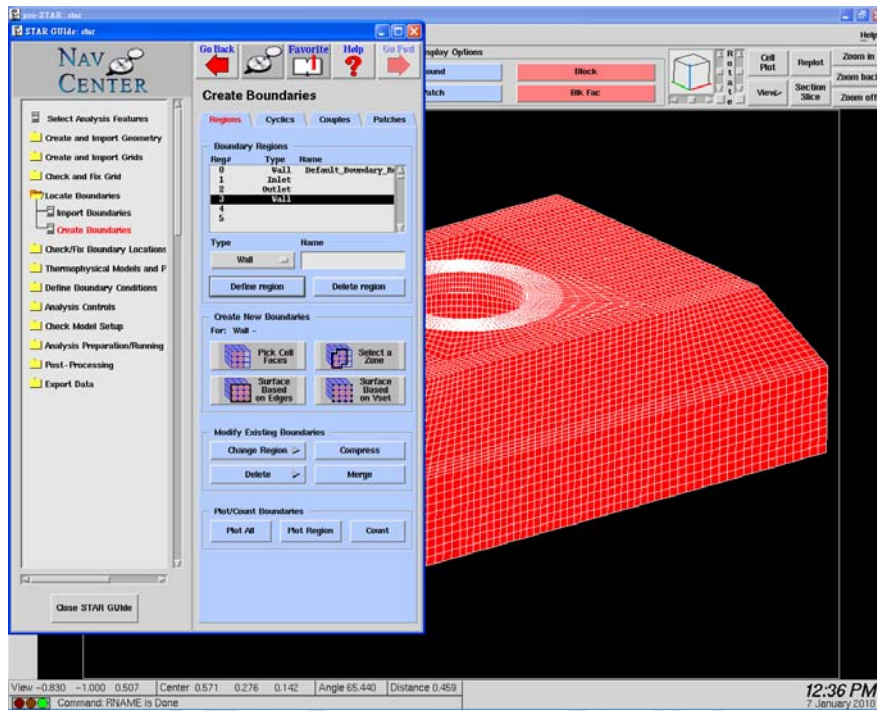


圖 2-29 需設定的邊界有 INLET、OUTLET 及 WALL

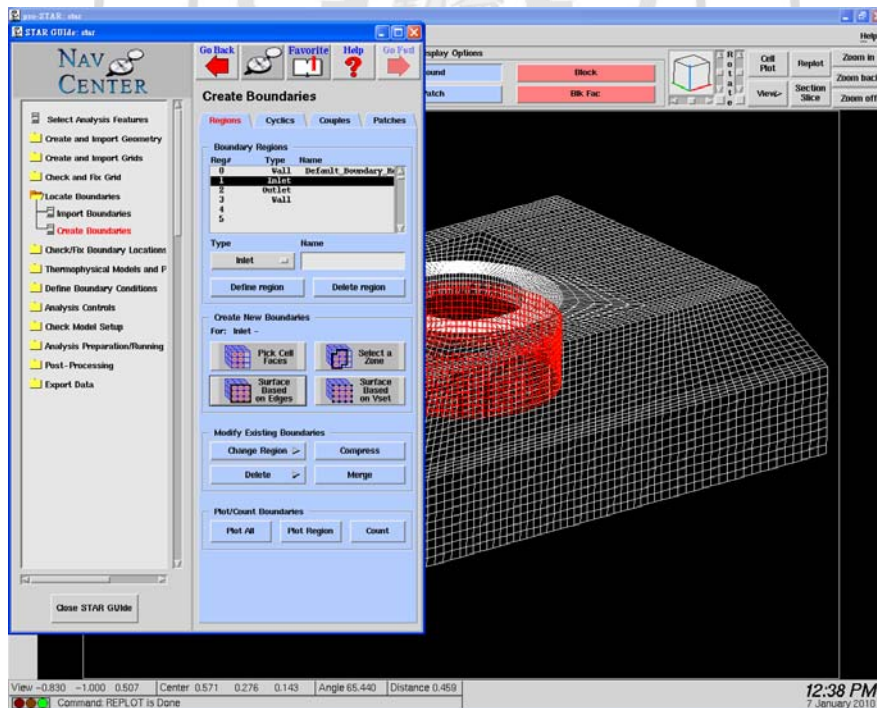


圖 2-30 INLET 為入風口條件

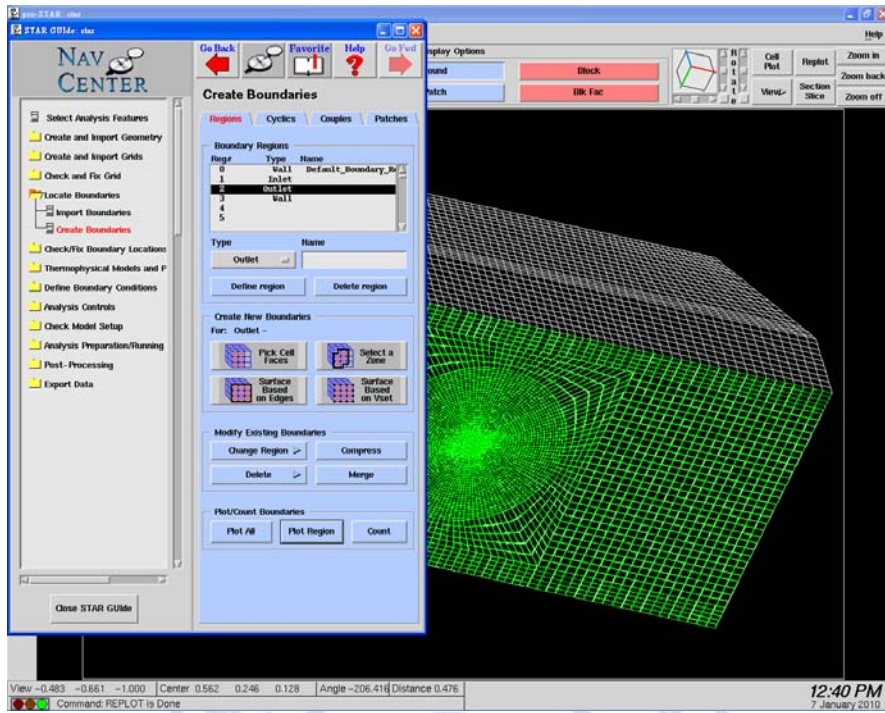


圖 2-31 OUTLET 為出風口條件

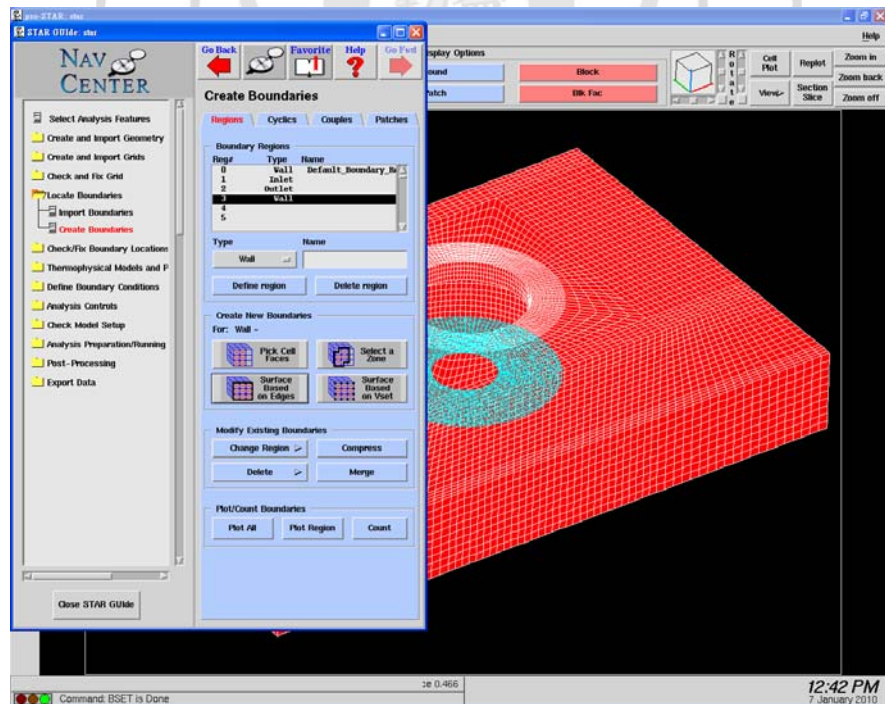


圖 2-32 WALL 為旋轉體條件

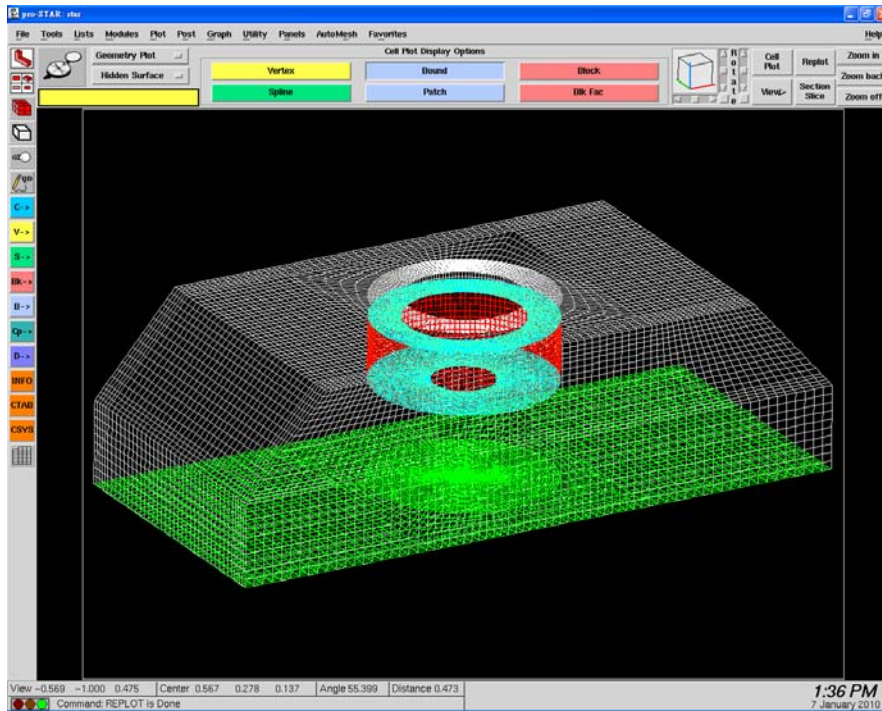


圖 2-33 完成邊界條件設定

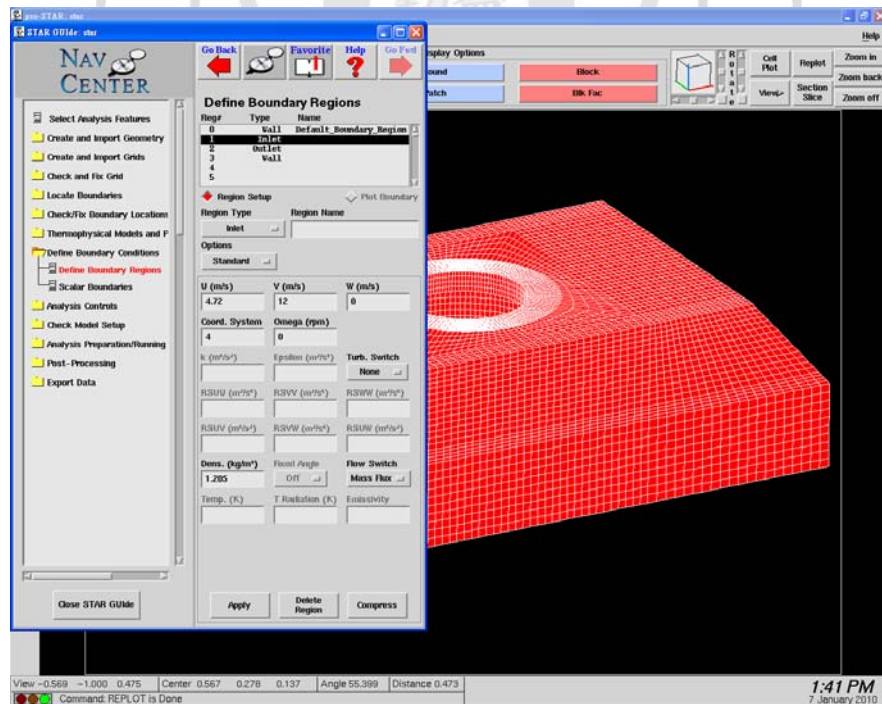


圖 2-34 邊界設定完成，再對 INLET 設 U (流速) 及 V (切線速度)



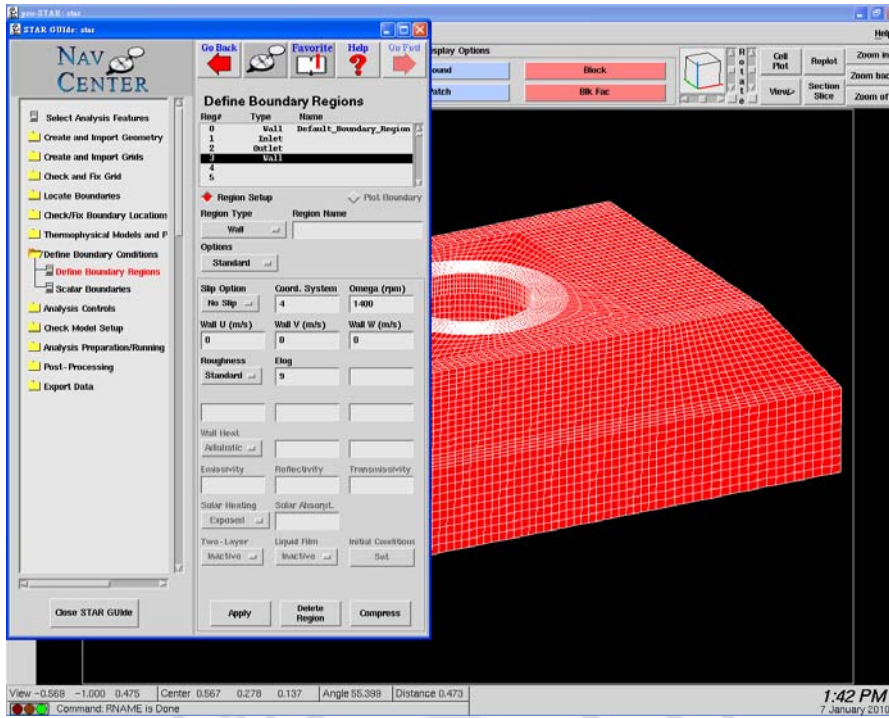


圖 2-35 WALL 也需設定 OMEGA (轉速)

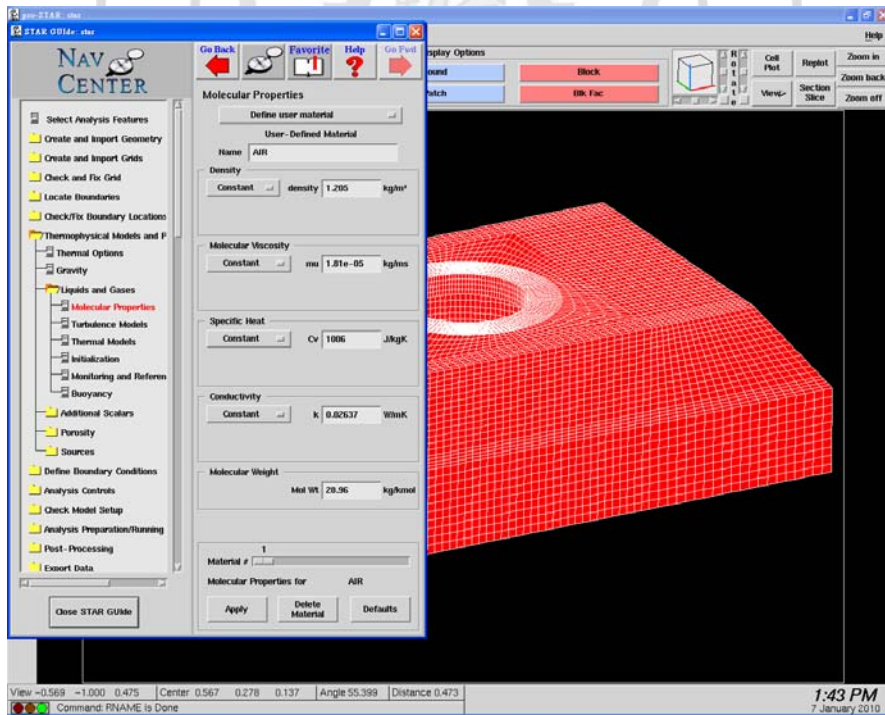


圖 2-36 為設定空氣條件

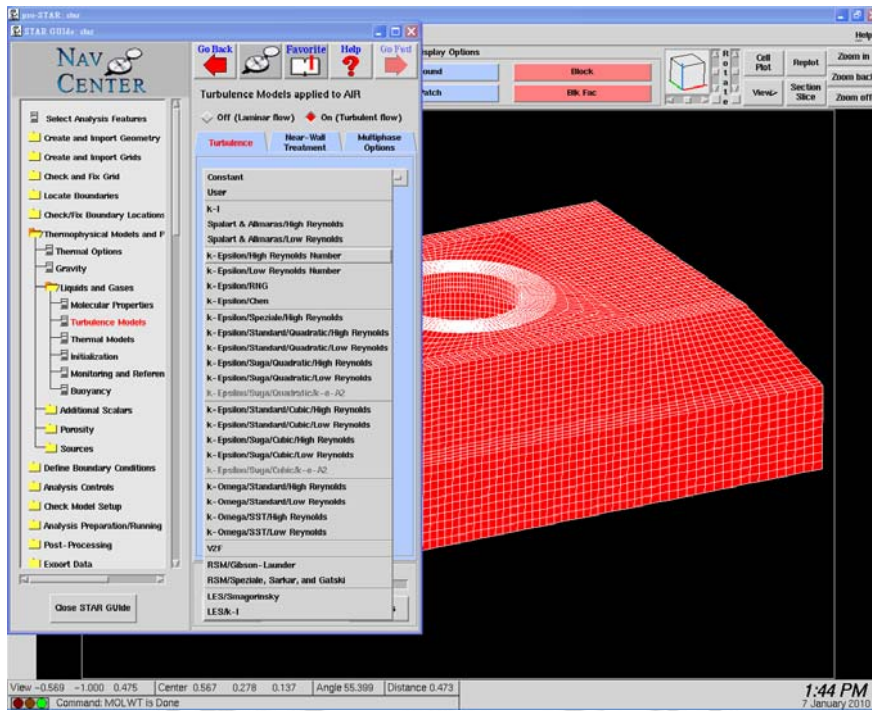


圖 2-37 為設定紊流模式

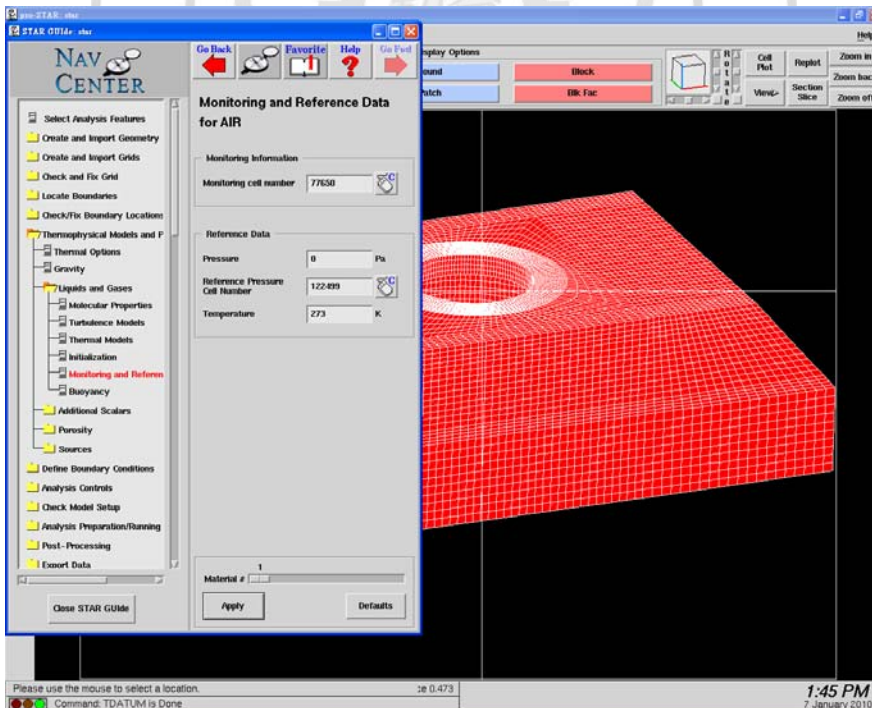


圖 2-38 為設定監測與參考點

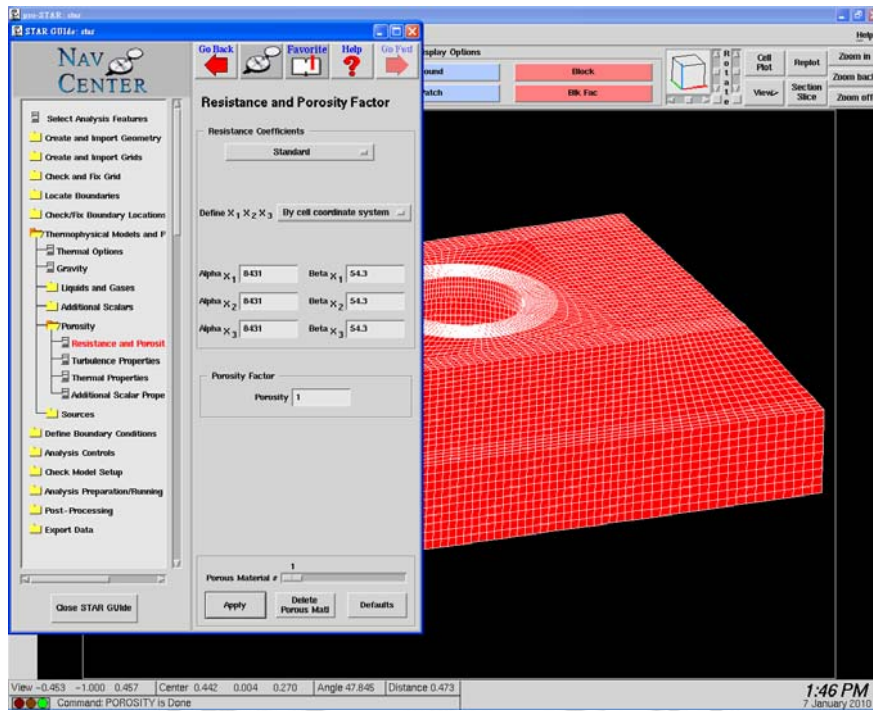


圖 2-39 為 A、B 參數值設定

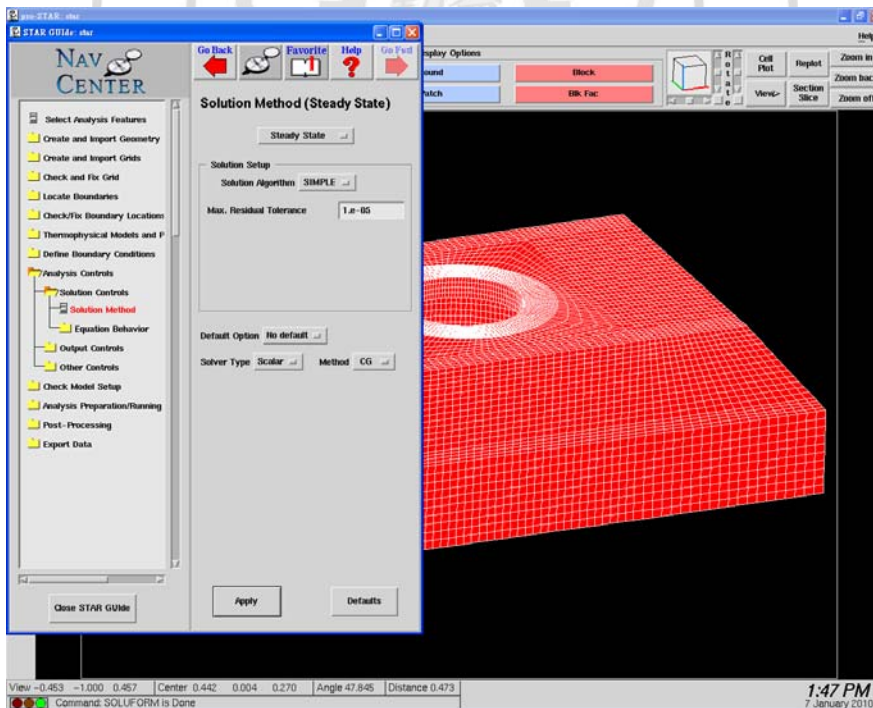


圖 2-40 為設定計算流場的方式，本研究使用 SIMPLE 做迭代計算

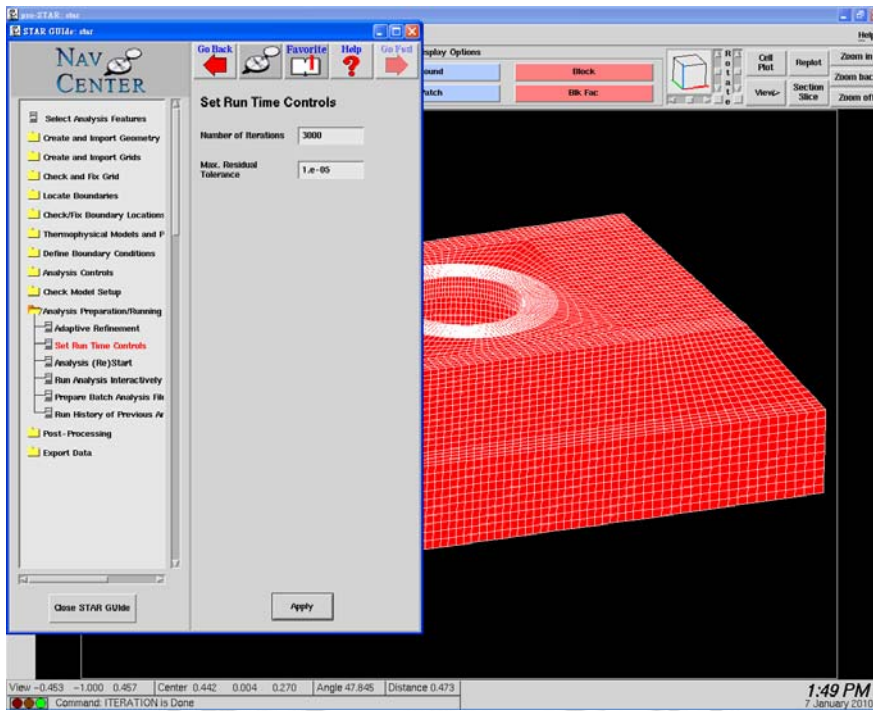


圖 2-41 為設定迭代次數

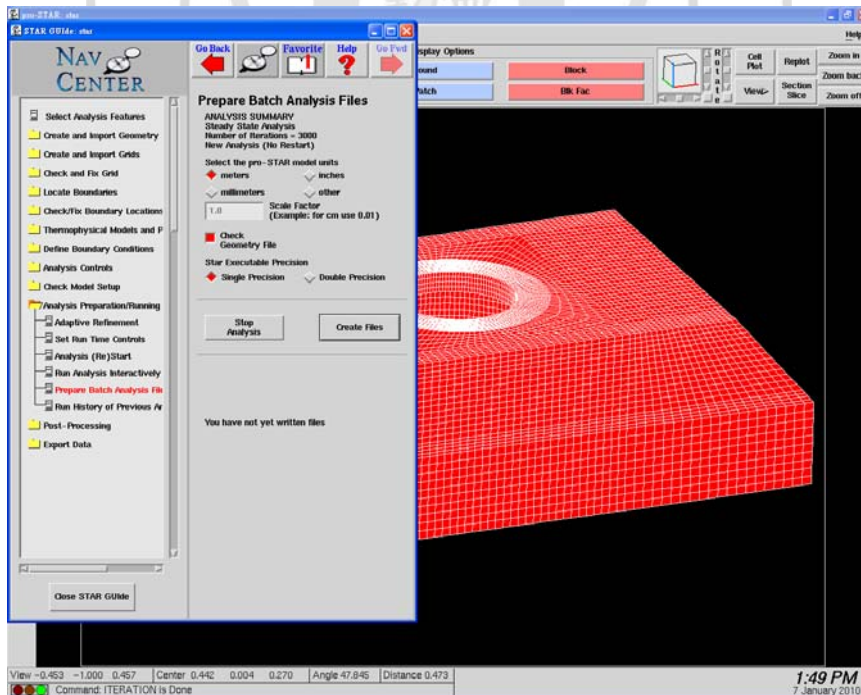


圖 2-42 為上述設定做儲存

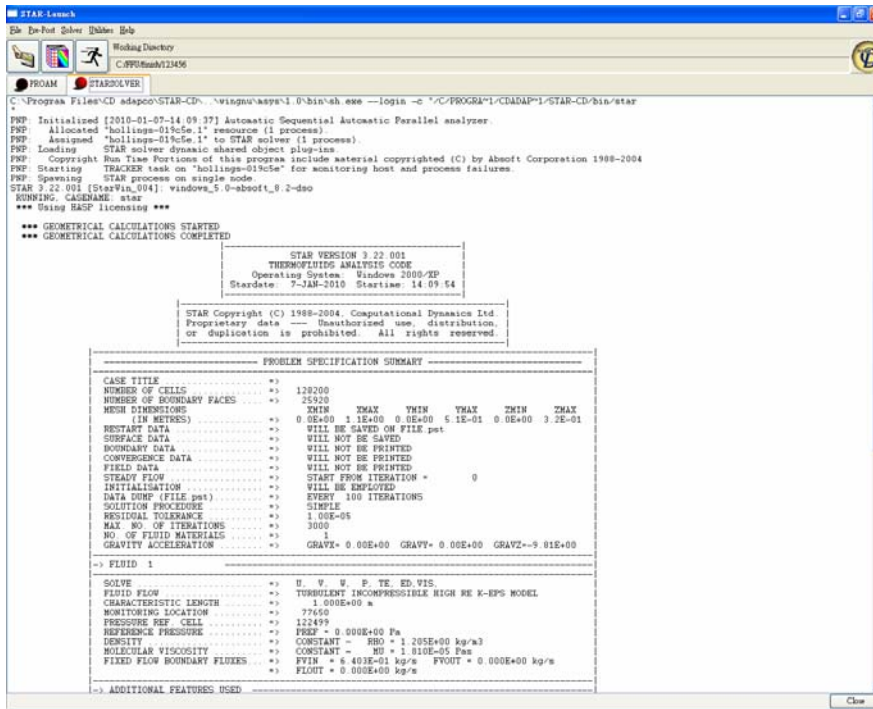


圖 2-43 開始流場計算

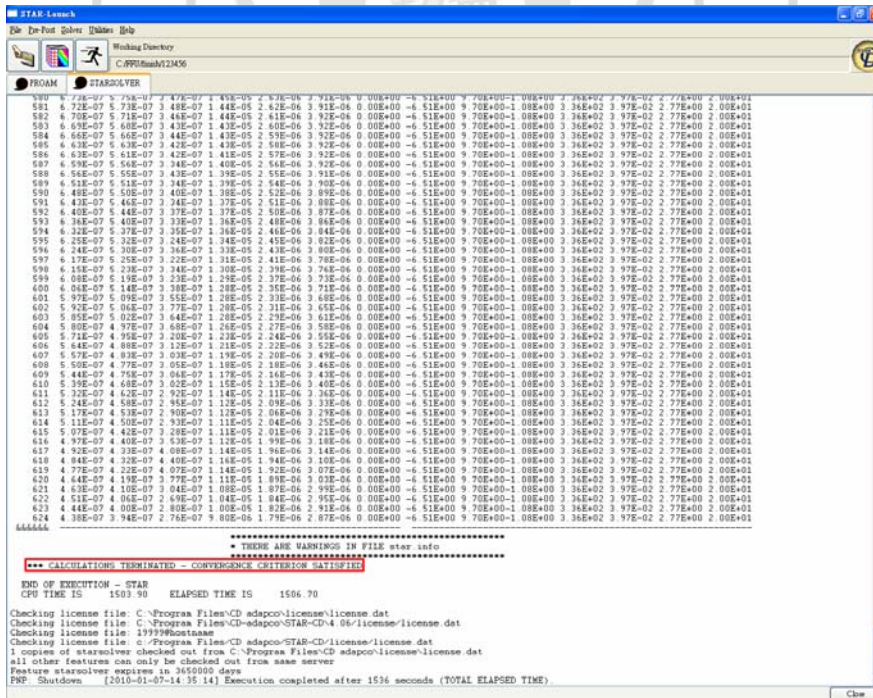


圖 2-44 紅框部份顯示為收斂狀態，表示完成計算

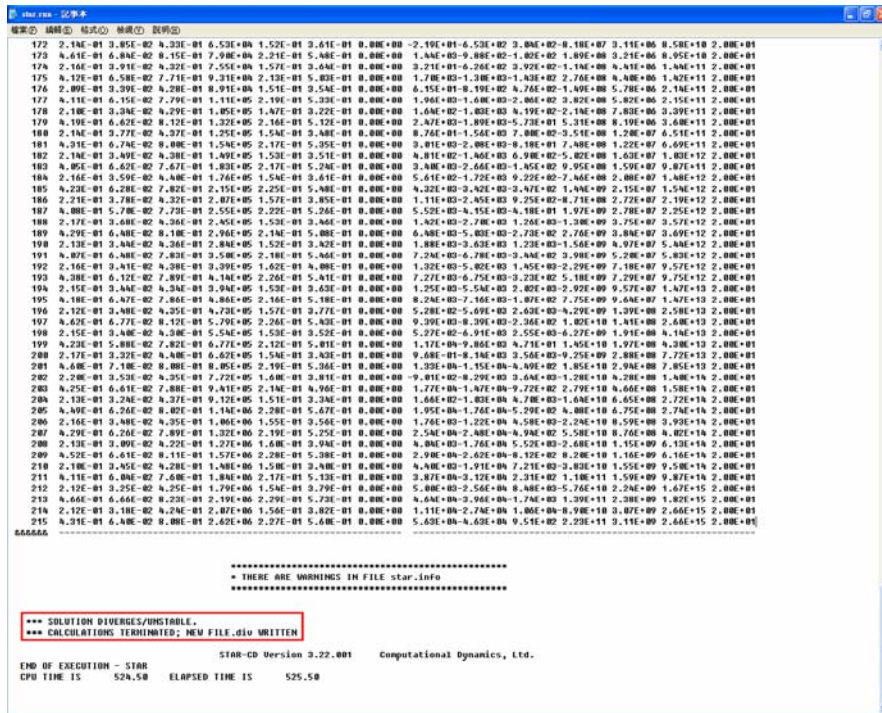


圖 2-45 紅框部份顯示為發散狀態，需重新設定各項數據再計算

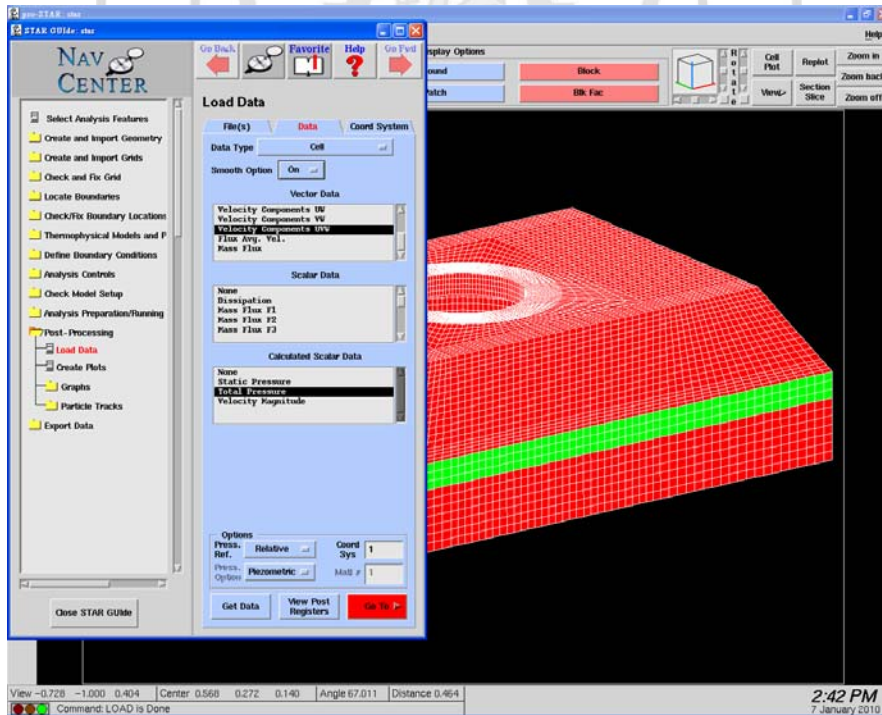


圖 2-46 選擇需要的選項顯示流場

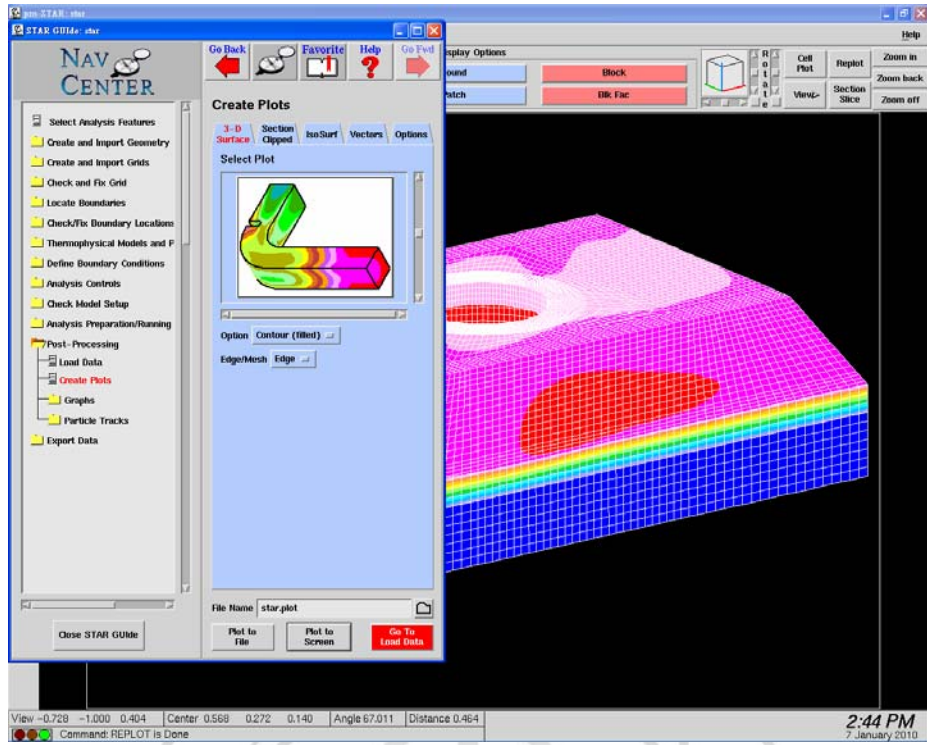


圖 2-47 完成開啟流場圖

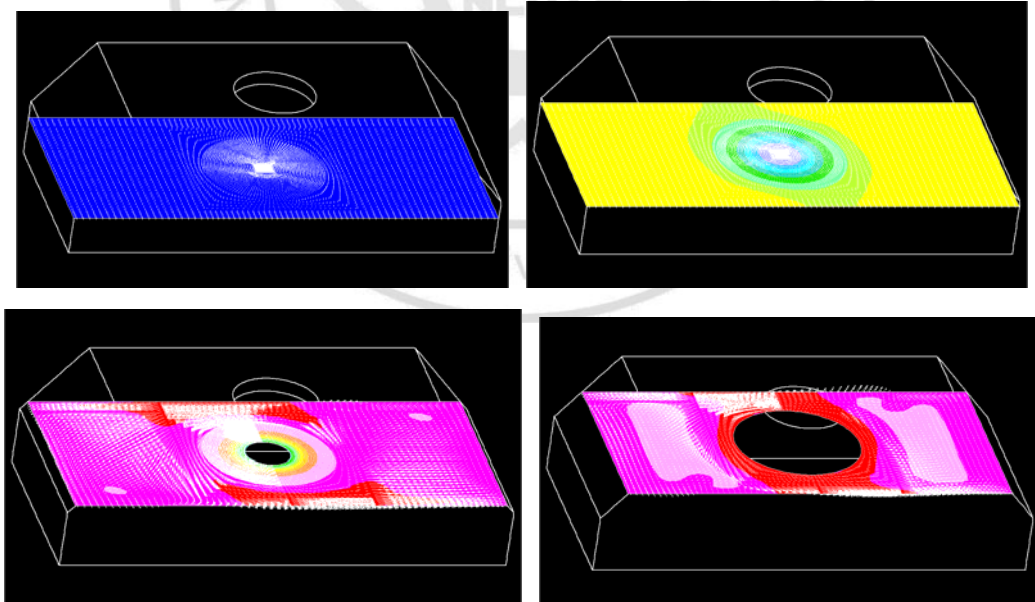


圖 2-48 各種高度之流場圖

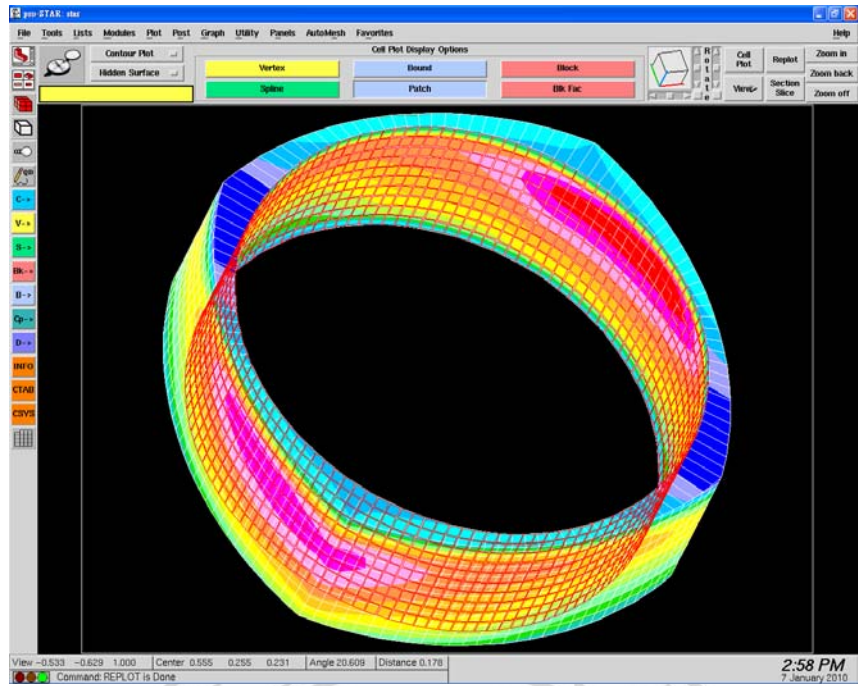


圖 2-49 入風口之流場圖；輸入指令，計算入風口的平均壓力

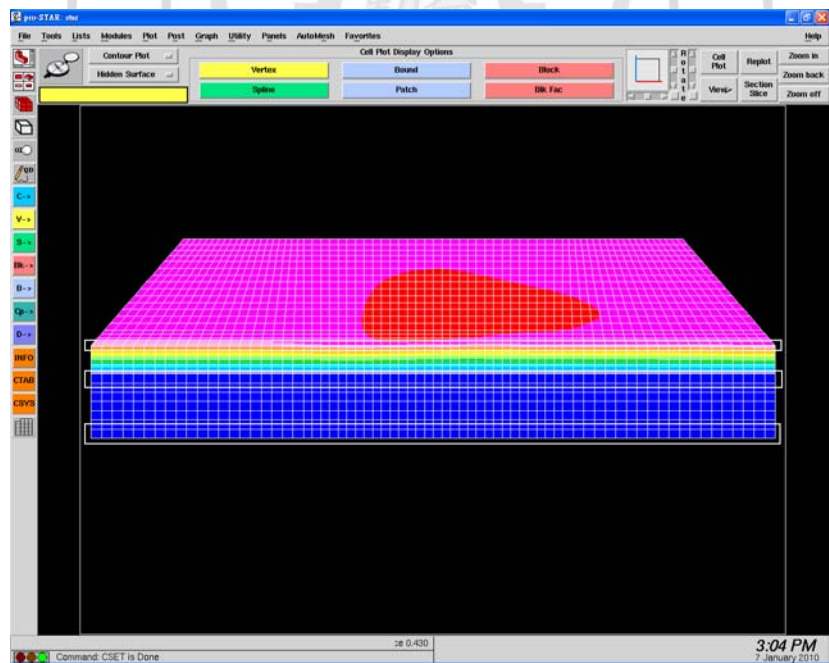


圖 2-50 框選各出風口位置；輸入指令，計算各出風口的平均壓力



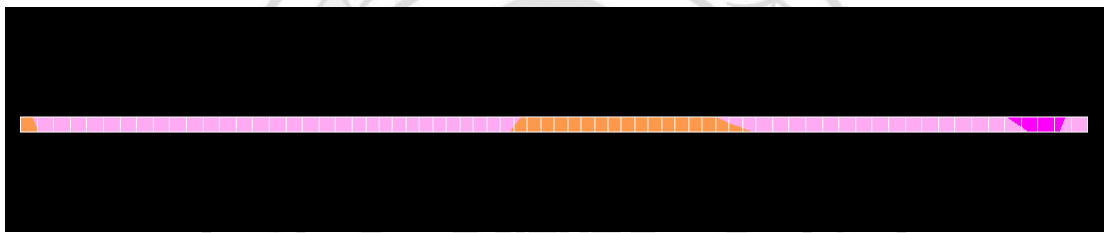
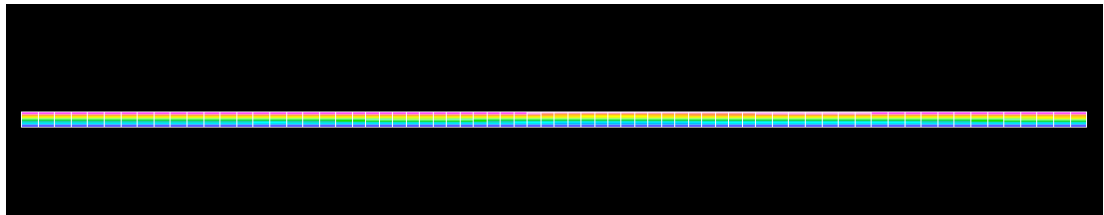
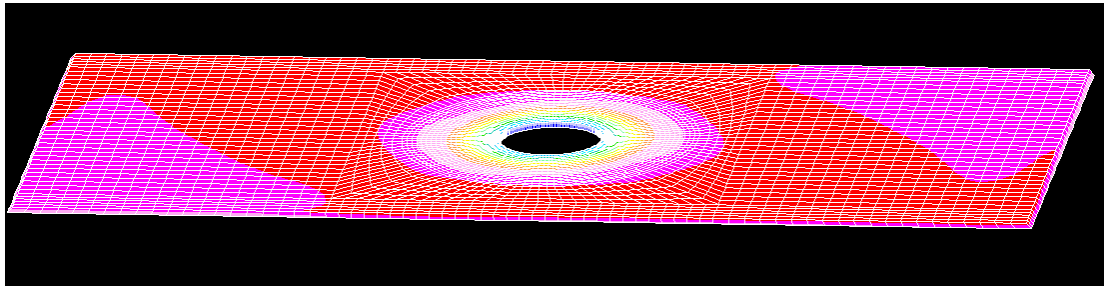


圖 2-51 為圖 2-50 所框選的各出風口流場圖

#### 2.2.4 設計新風機

從 STAR-CD 改變原機殼高度、葉輪的外徑大小及葉輪高度，找出參數的變化趨勢，以做為新風機的設計方向，新風機以離心風機設計軟體 CFDC 進行設計。

#### 2.2.5 委託工廠製作風機

以 AutoCAD 將 CFDC 設計好的葉輪畫出工程草圖，送去給風機廠畫完整工程圖，檢查沒問題後，發包製造、組立、試車。試車後需進行動平衡校驗。



## 2.2.6 新風機測試

與 FFU 原型機測試方式相同。



圖 2-52 原葉輪

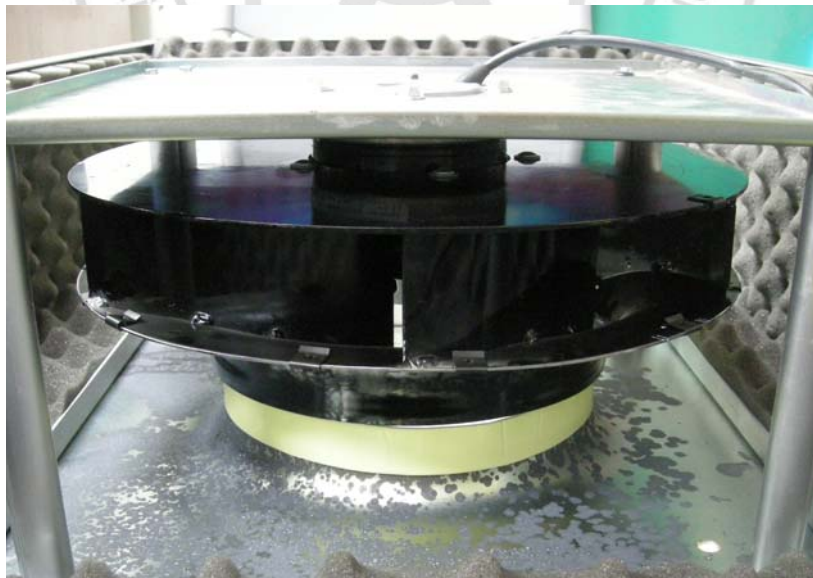


圖 2-53 新葉輪

## 2.2.7 縮減機殼高度

為研究 2'×4' FFU 機殼高度縮減對於其壓降、風量以及電效率的影響，特將 FFU 拆解，由於其結構係由鋁擠型、鋁板、鍍鋅鐵板以攻牙螺絲、拉釘及矽利康所組合而成，首先拆除了隔音棉、螺絲及拉釘，但由於所有的接縫及組合處都塗上矽利康黏劑作為氣密處理，所以分解過程並不容易，必須使用鐵鎚及一字起子撬開卻又不傷及外觀，首先將包含風扇和馬達之上蓋板與邊框分離，再把邊框 4 片側板分開，因其 4 片側板係呈口字鋁擠型，所以無法從單邊裁切以降低 FFU 高度，只能選擇將其每一片先以 NC 電腦油壓剪床裁切成 3 塊，把其中寬 30mm 的長條形鋁板移除，再將兩側 L 型鋁板拼接成一片側板。



圖 2-54 NC 電腦油壓剪床



圖 2-55 經裁切後之邊框側板

待 4 片側板均拼接完成後，再重新組合成 2'×4' FFU 邊框並以拉釘固定，拼接接縫處為避免高溫變形，採氬焊間隔點焊方式焊接，未焊接縫隙則以矽利康填補以防止空氣洩露。

將邊框組立完成後再把包含風扇和馬達之上蓋板、隔音棉及螺絲依序組裝、固定，完成縮減 FFU 原型機機殼高度的改裝。



圖 2-56 氬焊間隔點焊方式焊接



圖 2-57 重新組立後之 FFU 邊框

## 第三章 結果與討論

### 3-1 原型機測試

以下討論中的 4 種 Case 先在此說明，Case 1 是沒有入風口濾網也沒有 HEPA；Case 2 是有入風口濾網但沒有 HEPA；Case 3 是沒有入風口濾網但有 HEPA；Case 4 是有入風口濾網也有 HEPA，如表 3-1 所示。

表 3-1 4 種 Case 安裝出入濾網之狀況

	入風口濾網	出風口 HEPA
Case1	N/A	N/A
Case2	✓	N/A
Case3	N/A	✓
Case4	✓	✓

原風機在各轉速及 HEPA 與入風口濾網裝卸下的風量、電壓、電流值及功率，如表 3-2 所示。

表 3-2 原風機在各轉速及阻抗下的風量、電壓、電流值及功率

	轉速 (rpm)	風量 (CMM)	平均電流 (A)	電壓 (V)	功率 (W)
Case1	1640	33.68	0.761	220	167.42
	1642	33.97	0.754	220	165.77
	1639	33.80	0.761	220	167.42
	1640	34.17	0.755	220	166.10
平均值	1640.25	33.90	0.758	220	166.68
Case2		14.80	0.818	220	179.85
		14.45	0.814	220	178.97
		14.67	0.827	220	181.83
		14.53	0.821	220	180.62
平均值		14.61	0.820	220	180.32
Case3	1560	20.48	0.849	220	186.78
	1566	20.40	0.848	220	186.56
	1561	20.12	0.844	220	185.68
	1570	20.15	0.848	220	186.45
平均值	1564.25	20.29	0.847	220	186.37
Case4		12.02	0.836	220	183.81
		12.05	0.837	220	184.14
		12.22	0.836	220	183.92
		12.22	0.836	220	183.81
平均值		12.13	0.836	220	183.92

註：在有入風口濾網的情狀下會使入風口被遮蔽所以無法測得轉速



利用風洞系統在改變不同風量的情況下，測試 HEPA 及入風口濾網的阻抗。HEPA 之測量數據及曲線圖如表 3-3 及圖 3-1 所示。從 HEPA 的性能圖可看出阻抗曲線類似拋物線，但非真正的拋物線，顯示 HEPA 的阻力係數並非固定值，而是會隨流量而有小幅的改變。

表 3-3 HEPA 在不同風速下的壓力值

P (mmAq)	Q (cfm)	V (m/s)
0	0	0
23.60	308.60	1.12
61.40	622.54	2.27
122.20	939.26	3.42
211.56	1231.69	4.49

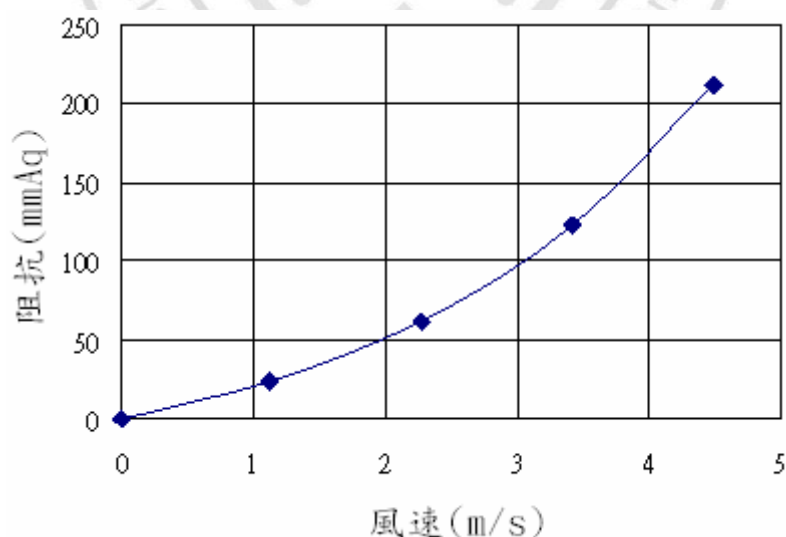


圖 3-1 HEPA 在不同風速下的壓力曲線圖

入風口濾網之測量數據及曲線圖如表 3-4 及圖 3-2 所示。入風口濾網的阻抗明顯小於 HEPA，但表 3-2 卻顯示 HEPA 造成的風阻小於入風口濾網，主要原因是 HEPA 出風口面積遠大於入風口面積，同樣的風量在 HEPA 出口處的平均風速遠低於入風口。

表 3-4 入風口濾網在不同速度下的壓力值

P (mmAq)	Q (cfm)	V (m/s)
0	0	0
2.9	308.6	1.12
8.3	625.92	2.28
16.2	947.18	3.45
25.5	1250.15	4.55
36.9	1553.18	5.66

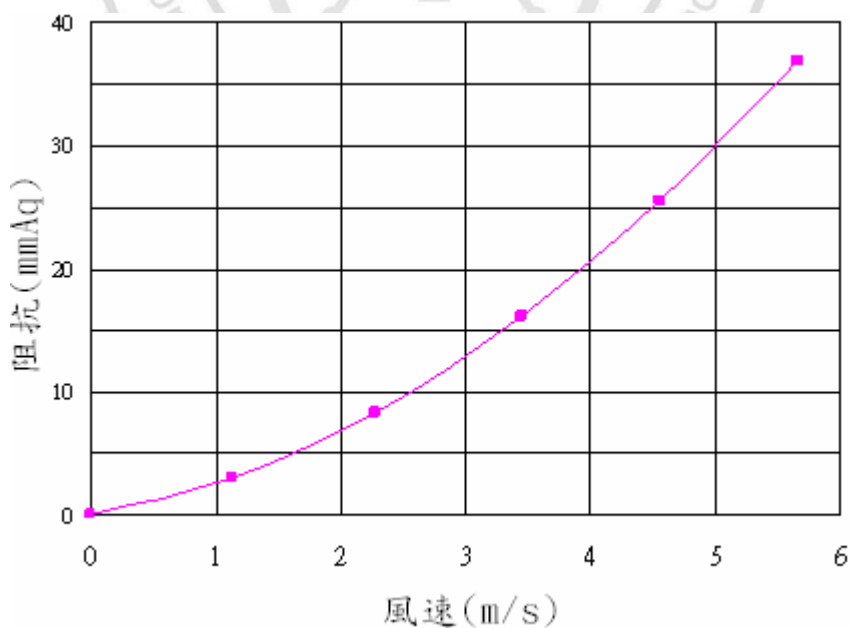


圖 3-2 入風口濾網在不同速度下的壓力曲線圖

原風機在 Case 1（沒有入風口濾網也沒有 HEPA）時風量可達 33CMM，但阻抗增加後，風量就快速下降。Case 4（有入風口濾網也有 HEPA）時風量只剩 12CMM，較 Case 1 大幅減少了 65%左右。

這個量測結果顯示原風機雖然能提供 33CMM 的風量，但置入 FFU 後只能輸出 1/3 的風量，使葉輪在低效率區域操作，不符合高效率原則。既然葉輪在 FFU 系統中不可能送出 33CMM 那麼大的風量，新風輪應將設計點風量降低。



在不同切線速度下各種外殼高度的壓降變化情形如表 3-5 及圖 3-3 所示。新葉輪的設計點流量減少意味著葉輪出風口寬度減小，整個葉輪軸向長度也會一起減小，如此 FFU 機殼高度也可以減小。

表 3-5 不同切線速度下各種外殼高度的壓降

P (mmAq)	H=0.092mm	H=0.069mm	H=0.046mm	H=0.023mm
V=12	58.617	59.303	59.268	
V=10	44.677	44.805	44.889	
V=8	33.338	33.091	32.851	32.556
V=6	23.023	22.763	22.886	22.417

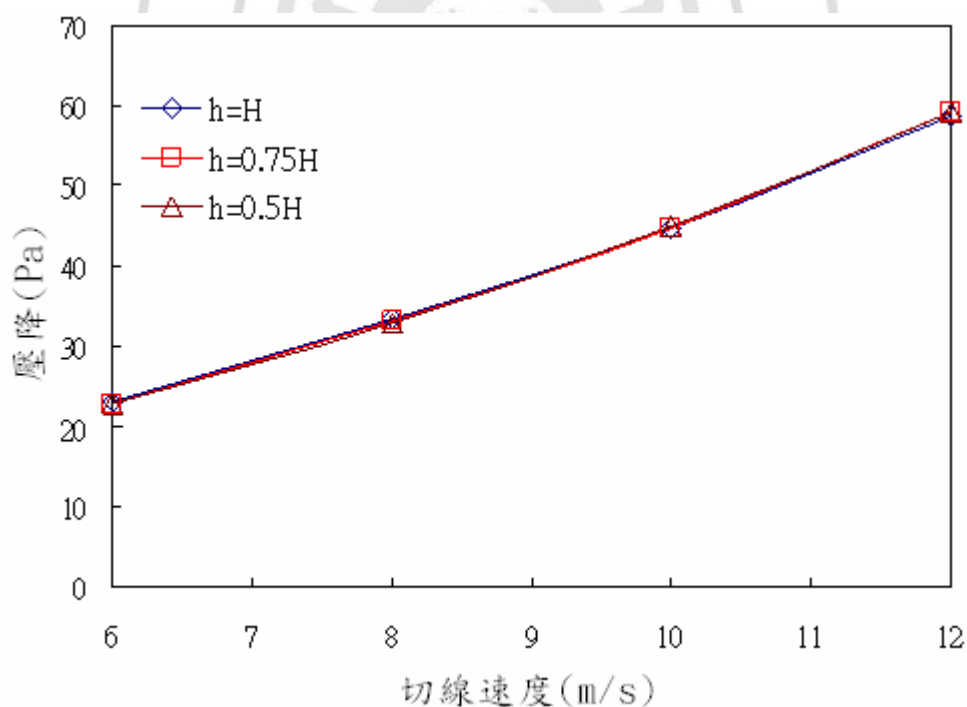


圖 3-3 不同切線速度下各種外殼高度的壓降曲線圖

從圖 3-3 中可發覺 FFU 機殼高度的影響非常小，如此一來，若葉輪的高度減小性能可以提升，FFU 機殼高度減少不會影響性能，可使 FFU 更薄更輕，無論成本或安裝上的考量都是優點。圖 3-3 另外顯示風量固定下，風扇出風口切線速度越大，壓損越大，因此新葉輪的直徑要大些，出風口切線速度應該要較小些。

在不同風扇外徑下，各種切線速度的壓降如表 3-6 及圖 3-4 所示，減小葉輪出口切線速度可降低機殼內的壓損。但葉輪出風口切線速度與風壓有關，不能隨意減少，風壓與出風口之swirl ( $U_2C_{u2}$ ) 呈正比，若要減小切線速度，必需增加葉輪外徑才能得到同樣的風壓。

圖 3-4 即固定出風口之 swirl 來比較葉輪直徑對 FFU 壓降的影響，結果顯示較大的葉輪可以有較低的壓損。 $\phi 306\text{mm}$  與  $\phi 334\text{mm}$  的壓損有 5%左右的差異，因此新葉輪設計時應採用較大的葉輪直徑及較小的葉片出口角。

表 3-6 在不同風扇外徑下，各種切線速度的壓降

P (mmAq)	V=12	V=10	V=8	V=6
d=306mm	60.613	48.741	35.7555	24.4665
d=320mm	61.595	47.3917	34.6726	23.8771
d=334mm	60.192	46.1686	33.8334	23.3008

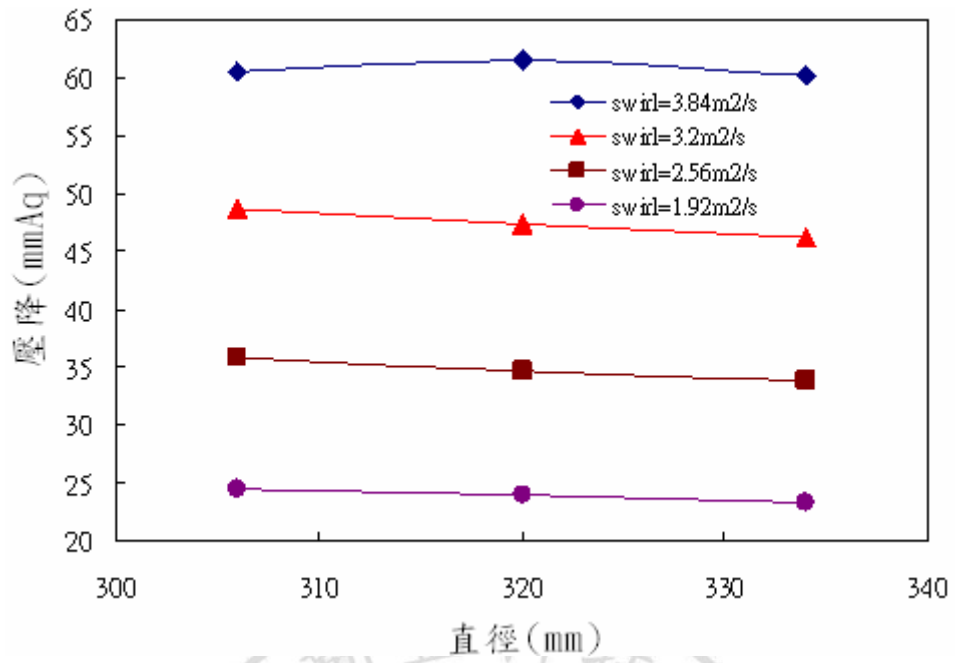


圖 3-4 不同風扇外徑下各種切線速度的壓差曲線圖



### 3-2 新葉輪的設計

新葉輪的設計以上述分析結果為設計原則，透過CFDC軟體進行初步及細部設計。CFDC為工研院機械所發展的離心風機設計軟體，該軟體假設空氣從進入風機到離開風機的過程中，密度保持固定，亦即不可壓縮。一般在 1000mmAq以下，不可壓縮的假設是合理的，因此CFDC只適用在進出口靜壓差 1000mmAq以下的風機。

圖 3-5 為 CFDC 的主功能畫面，由此開始進行設計，由圖 3-5 可知 CFDC 有性能預估及外形建立兩項功能，性能預估就是初步設計，幾何建立就是細部設計。

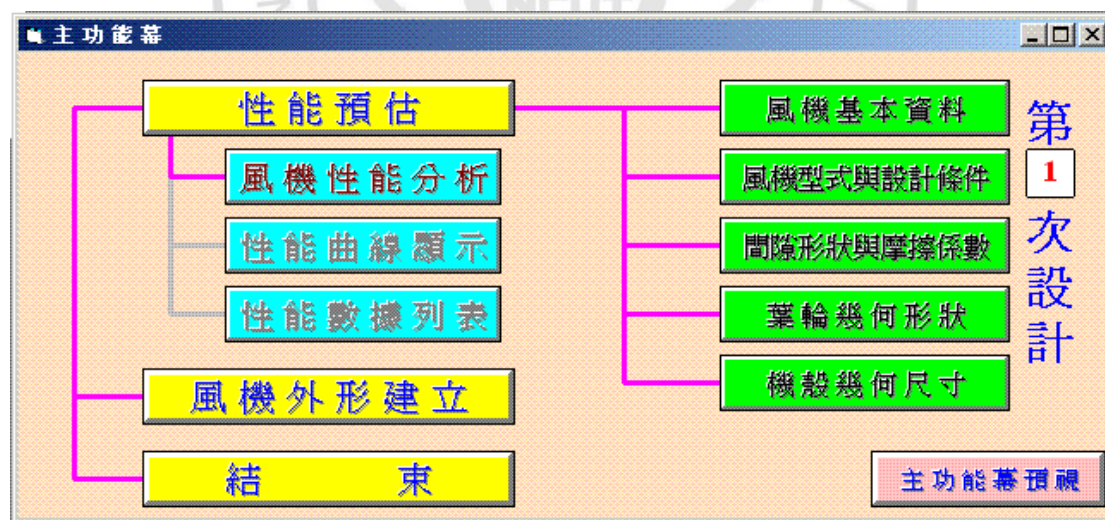


圖 3-5 CFDC 主功能幕

圖 3-6 為 CFDC 之風機操作條件設定。在此功能幕中需輸入風機轉速、設計點風量、入口全壓、設計點靜壓、操作溫度等，軟體會計算出黏度、密度及比轉速。黏度及密度在計算時必需用到，比轉速給設計者參考，離心風機的比轉速最好在 100 以上，比轉速超過 700 以上建議使用斜流式或多翼式，比轉速 1000 以上應使用雙吸式。

Parameter	Value	Unit
風機型式	<input checked="" type="radio"/> 離心式風機 <input type="radio"/> 斜流式風機	
葉輪外形	<input checked="" type="radio"/> 2D <input type="radio"/> 3D	
葉輪上蓋	<input checked="" type="radio"/> 封閉式 <input type="radio"/> 開放式	
轉速	1600	rpm
風量	15	cmm
靜壓	26	mmAq
入口全壓	10330	mmAq
操作溫度	25	°C
黏度	1.843E-05	m <sup>2</sup> /s
密度	1.1728	kg/cm <sup>3</sup>
比速度	72 (558)	

Buttons: 基本資料, 間隙形狀, 主功能幕

圖 3-6 CFDC 之風機操作條件設定



本研究的風量 15CMM，風壓 26mmAq，轉速 1600rpm，比轉速 (Specific speed) 為 558，適用一般離心式風機。比轉速 (Ns) 的定義如下。

$$Ns=N \times Q^{0.5} / (p/\rho)^{0.75} \quad (1)$$

上式中N為轉速，單位rpm；Q為風量，單位CMM；p為全壓，單位為mmAq， $\rho$ 密度，單位為 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

原 FFU 之風量為 12.13CMM，風壓由入口濾網及 HEPA 的風阻測試值與 CFD 的壓損計算值的總合估算之，約為 20 mmAq，本研究希望將風量提高到 15CMM，相對靜風壓約需 26 mmAq。預期新葉輪的效率會提高，馬達扭矩會較小，馬達轉速也會相對應提高，預估 1600rpm。

圖 3-7 為間隙形狀之選擇及摩擦係數之設定。間隙形狀必需選擇重疊式才能有高效率。摩擦係數不知如何輸入時，輸入「0」，軟體會自行計算，若給的不是 0，軟體會依所輸入的數值來計算。

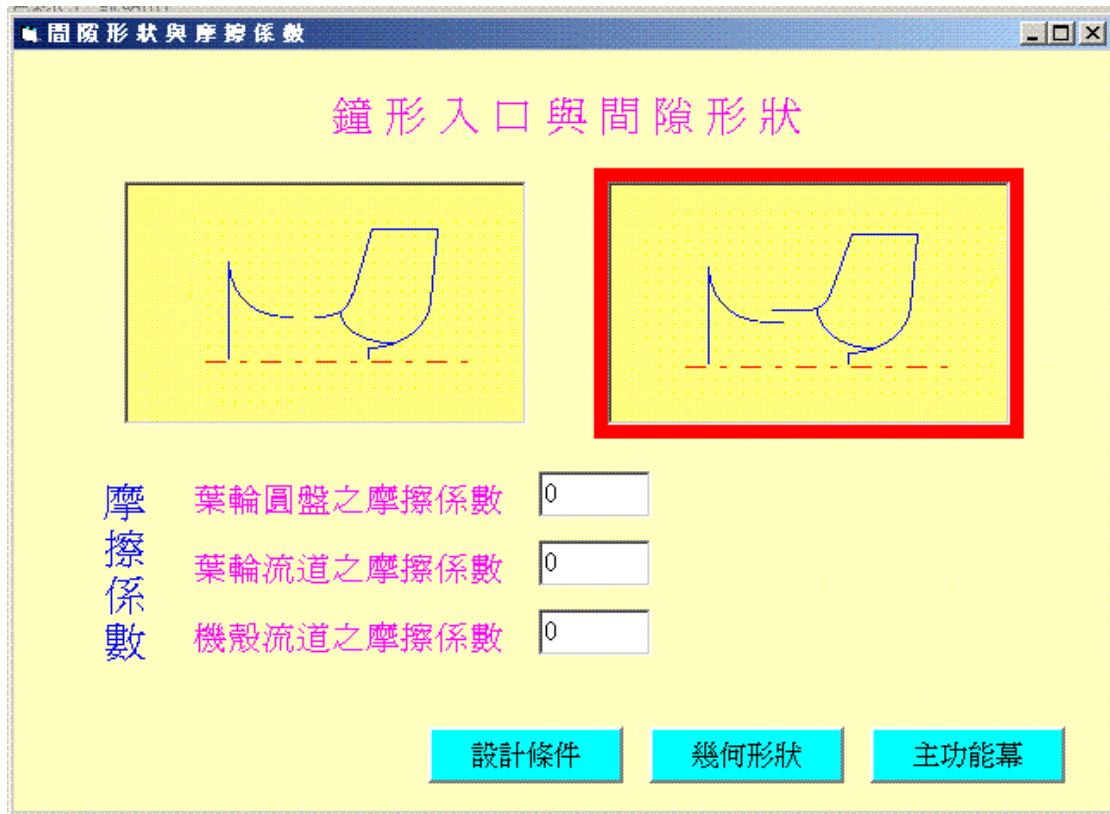


圖 3-7 間隙形狀之選擇及摩擦係數之設定

圖 3-8 為葉輪子午面特徵幾何的輸入。圖 3-4 顯示葉輪越大、葉輪出口切線流速越小，FFU 機殼內的壓損越小。因此由圖 3-4 中選最大的葉輪外徑 334mm，半徑 167mm，設計新葉輪。除了選擇較大的葉輪外徑外，使用較少的葉片數及較小的葉片出口角以得到較小的葉輪出口切線速度。一般葉輪的葉片數約在 10 片附近，葉片出口角在 35~45 度，本研究新葉輪葉片數為 6，葉片出口角為 26 度。由於流量僅為 15 CMM，因此出風口寬度設計為 50mm。

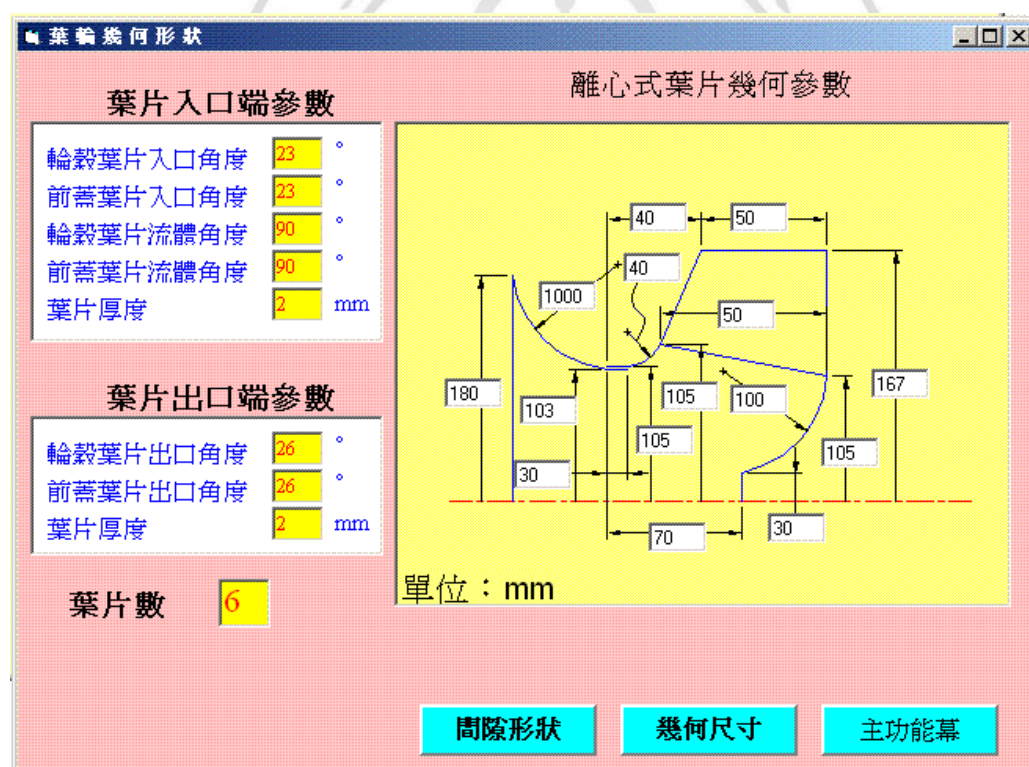


圖 3-8 葉輪子午面特徵幾何的輸入

性能計算結果如圖 3-9 所示，在 15CMM、26.6mmAq 下的消耗功率 89W，原 FFU 的消耗功率為 183W，馬達效率以 55%計算，風扇耗功 100.5W，新風機消耗功率明顯較低。



圖 3-9 性能計算之結果

圖 3-10 為新設計風機之性能圖，由圖中可觀察風機在非工況點的性能，若是實際操作點與設計點有差異，可得知風機之操作情況。

圖 3-10 之前是風機之初步設計，主要是預估風機之性能，圖 3-11 開始是細部設計，主要是建立葉片的完整幾何。細部設計的基本數據來自初步設計，如此設計才有一貫性。葉輪是一個三維的幾何，CFDC 是以兩個二維平面構成三維幾何，分別為 r-z 面（即俗稱的子午面）

及  $r-\theta$  面。點選圖 3-11 中的「葉輪外形建立」後，讀入初步設計的數據，建立子午面幾何，如圖 3-12 所示。

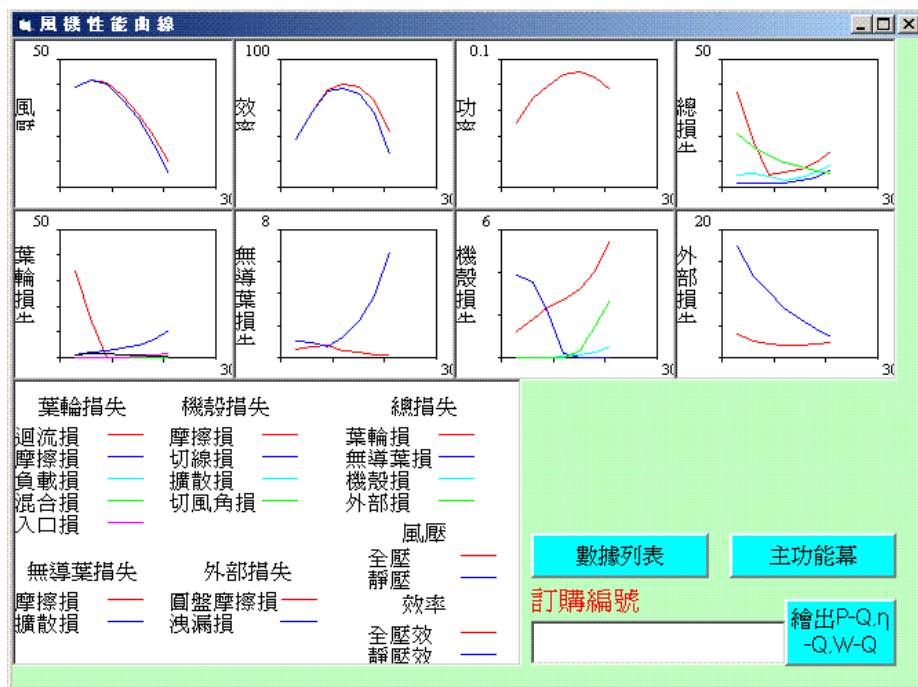


圖 3-10 新設計風機之性能圖

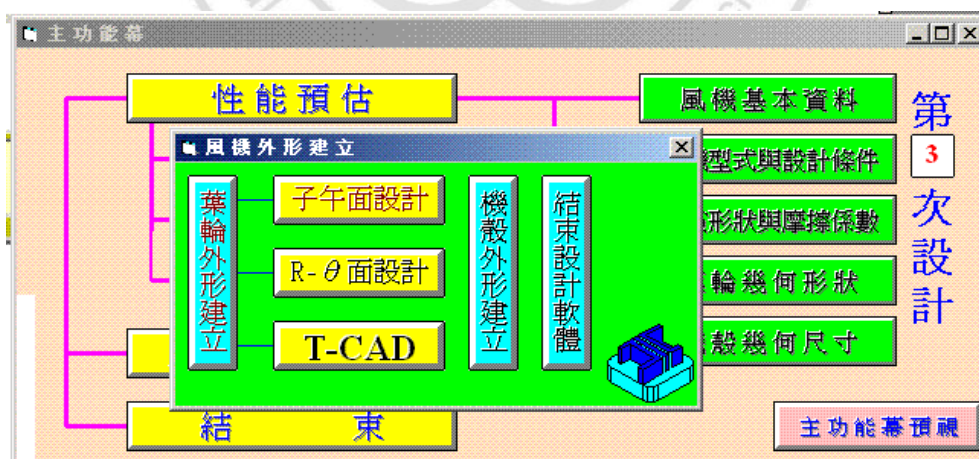


圖 3-11 細部設計功能幕

圖 3-12 中葉片沒有與前蓋接觸到的部份最後以 CAD 連接。按確認鍵後，進行  $r-\theta$  面幾何建立，葉片形狀以對數螺旋線建立，繪製出的葉片形狀如圖 3-13 左邊所示，右邊為葉片角度分佈，顯示角度分佈為線性。真正的對數螺旋線應是等角度分佈，但葉輪進出口角不一定都相同。若以圓弧建  $r-\theta$  面幾何，葉片的角度會偏大，造成葉片間流道截面積過大，容易發生流動分離。

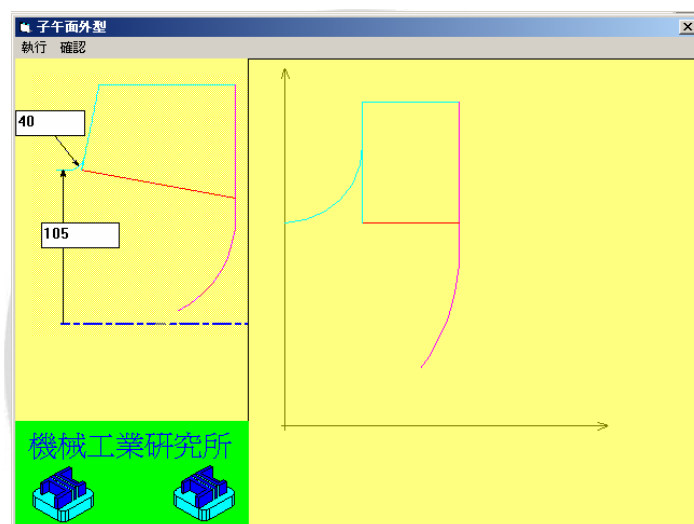


圖 3-12 子午面外形設計

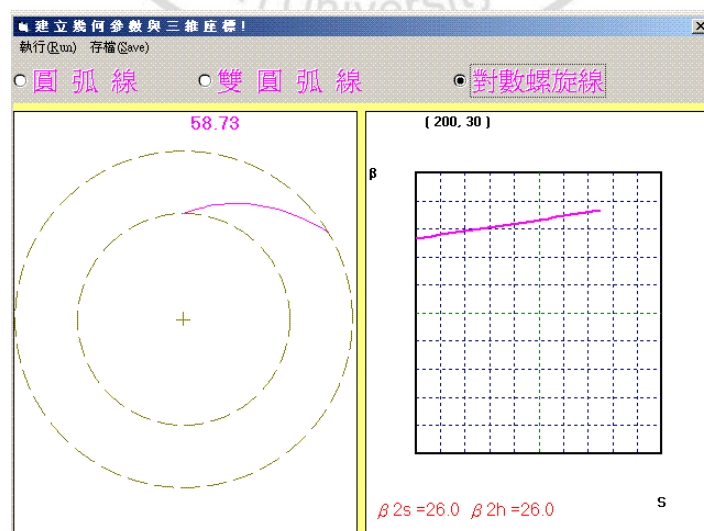


圖 3-13  $r-\theta$  面外形設計

加上葉片厚度後計算葉片間之流道截面積變化情形，如圖 3-14 所示，若變化順暢且沒有過大的面積比，即可結束設計。完成後的工程草圖如圖 3-15 (a) 所示，立體葉輪圖形如圖 3-15 (b) 所示。

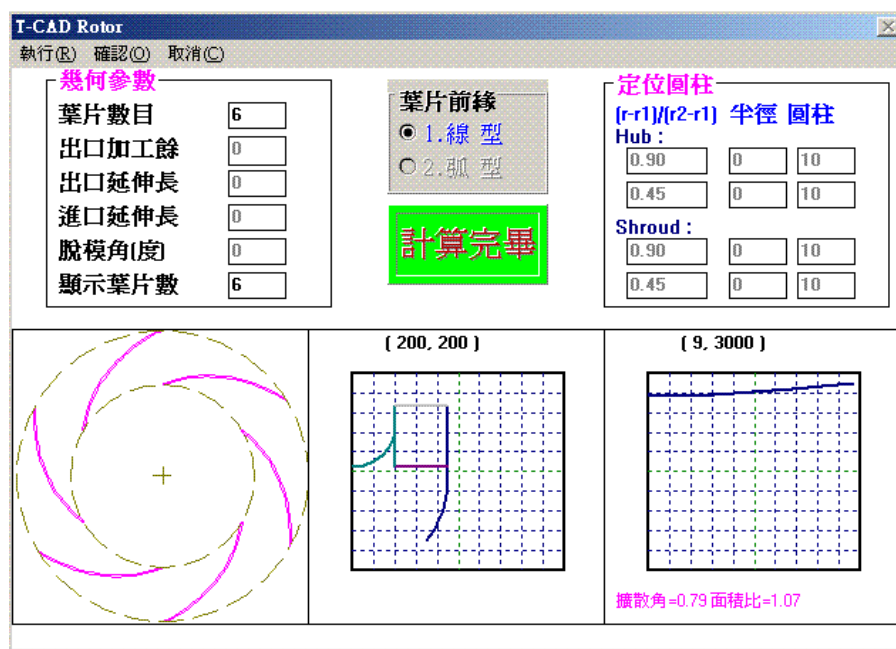
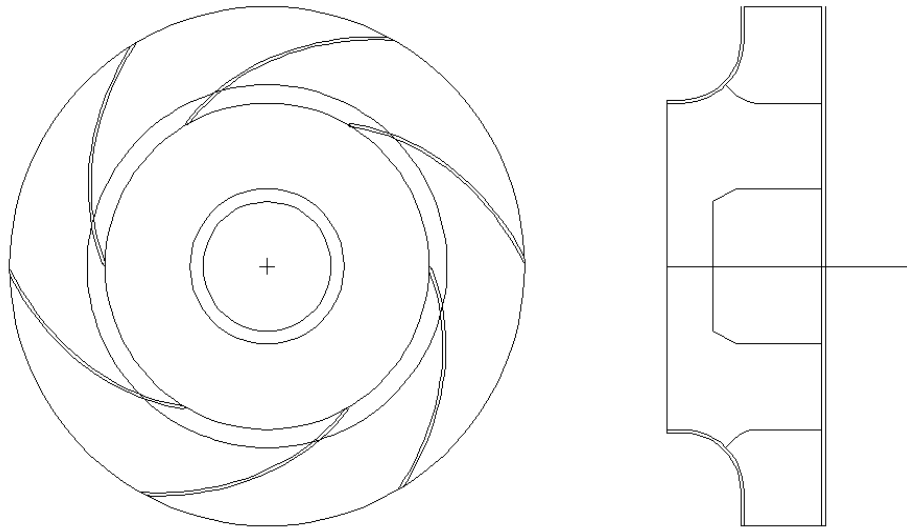
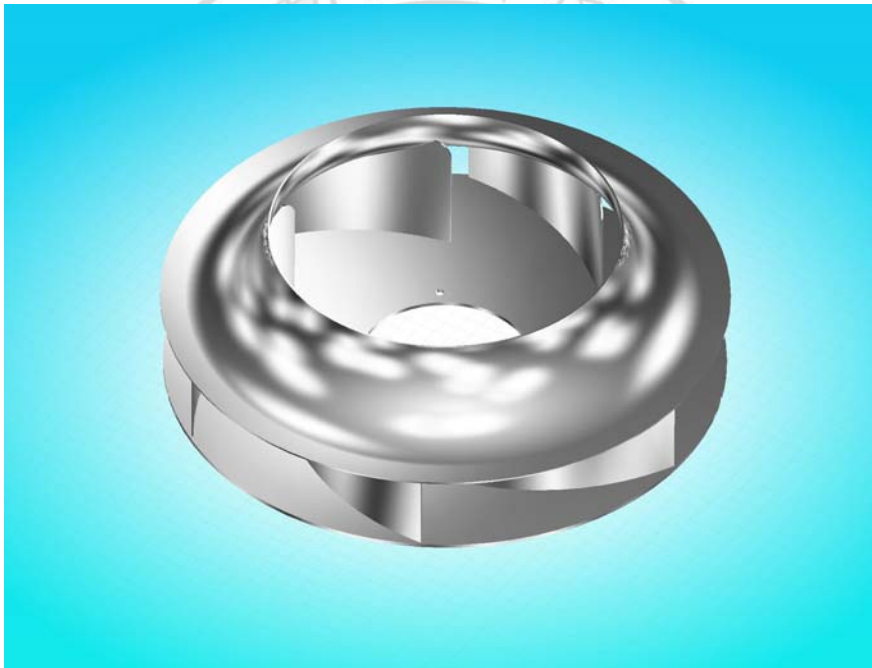


圖 3-14 將葉片加上厚度且計算流道截面積變化



(a) 新葉輪的草圖



(b) 新葉輪立體圖

圖 3-15 新葉輪設計圖



新葉輪出口寬度為 50mm，明顯小於原葉輪的 100mm，葉輪外徑 334mm 略大於原葉輪的 320mm，葉片數為 6，葉片出口角度為 26 度，屬於強後傾葉輪，前面 CFD 的分析結果顯示使用外徑較大的強後傾葉輪可以得到較小的機殼內流動阻抗。新葉輪的設計風量為 15CMM，轉速為 1600rpm，風壓為 26mmAq，此靜壓約為入口濾網、HEPA 及機殼中流阻的總和。新葉輪製造完成後，為了得到最佳的性能，本研究進行幾種改良及性能測試。



### 3-3 改良及性能測試

進行如表 3-7 所示 4 種改良加上改良前的 FFU 之性能量測，其結果如圖 3-16 及圖 3-17。

表 3-7 4 種改良狀況內容說明

	改良狀況
改良 0	更換風扇，由於葉輪高度大減，導致鐘形入口與葉輪間有很大的間隙，以雙面膠棉簡易的減小間隙。
改良 1	減小 FFU 機殼高度，同時使鐘形入口與風扇前蓋重疊，此時才與 CFDC 的設定情況相符合
改良 2	將徑向間隙進一步減小
改良 3	在改良 1 的情況下拆除吸音棉測試

圖 3-16 顯示[改良 0]換新風機後之 FFU 在 Case 1 的風量明顯低於原 FFU，但加上 HEPA 後（Case3）可發覺原 FFU 的風量下降的很快，但[改良 0]的 FFU 風量下降較少，致使兩者的風量相當。

當阻抗進一步加大時，[改良 0]的 FFU 在 Case 2 及 Case 4 的風量反大於原 FFU。原 FFU 葉輪的出風口寬度兩倍於新葉輪，在沒有阻抗或阻抗很小時風量較大是在預期之中，但實驗的結果顯示其承受阻抗的能力較新葉輪弱，加上 HEPA 或入口濾網後風量就明顯的下降。

初步的量測顯示新葉輪有不錯的功效，但葉輪與鐘形入口之間很

大的間隙不能只是簡易密封，這會造成很大的洩漏。要將間隙有效的減小，最好的方法就是將 FFU 機殼高度減小，讓葉輪與鐘形入口有適當的重疊，一來可大幅減小間隙，二來入口流場較不會受到干擾，將機殼高度減小後為[改良 1]。

圖 3-16 同時顯示[改良 1]在 Case 1 的風量與[改良 0]相當，都大幅低於原 FFU。然而阻抗加上後，[改良 1]之 FFU 在 Case 3 的風量已經等於或略微大於原 FFU，在 Case 2 時，[改良 1]之 FFU 的風量就明顯高於[改良 0]及原 FFU，顯示降低機殼高度減小間隙及洩漏量的成效相當顯著，降低機殼高度同時減小間隙及機殼空間，主要是那一種因素使風量提升，無法從實驗中知曉，應是間隙為主要效應，從圖 3-3 的模擬結果，減少空間對性能影響不大，實驗結果判斷減小空間應不會對風量造成負面的影響。在 Case 4 時，入口濾網及 HEPA 都加上後，[改良 1]之 FFU 的風量也是明顯高於[改良 0]及原 FFU，與原 FFU 比較起來，[改良 1]之 FFU 提升了 24%的風量。

[改良 2]的 FFU 是將[改良 1]葉輪與鐘形入口的徑向間隙以雙面膠棉進一步縮小，圖 3-16 顯示風量較[改良 1]僅微幅提升。照理說減小間隙應對風量提升有作用，但測試過程中發覺因葉輪磨擦到雙面膠棉，由於鐘形入口及葉輪都是鈹金件製造，真圓度不是很好，加上葉輪與鐘形入口的對心不是很好，造成兩只者間的間隙不均勻，加貼雙

面膠棉後會互相摩擦，雙面膠棉是軟質且有彈性，雖不會造成損壞，但摩擦增加了馬達阻力導致轉速略為下降，影響了風量及風壓，所以抵消了間隙減小所應提升的風量。

圖 3-16 顯示當機殼高度減小，風量並沒有因此降低，反而在 Case 2、Case 3 及 Case 4 時的風量還大於[改良 0]，證明機殼高度減小不僅可縮減 FFU 體積、減輕重量，增加無塵室天花板上方保養維修空間，對於風量沒有負面的影響。[改良 3]為拆除 FFU 內部所貼附吸音棉，結果顯示風量並沒有因此而提高，原先認為吸音棉會增加流動阻力，可能對性能有負面影響，然而測試的結果發現並沒有達到預期磨擦損失減少而使得風量增加的效果。

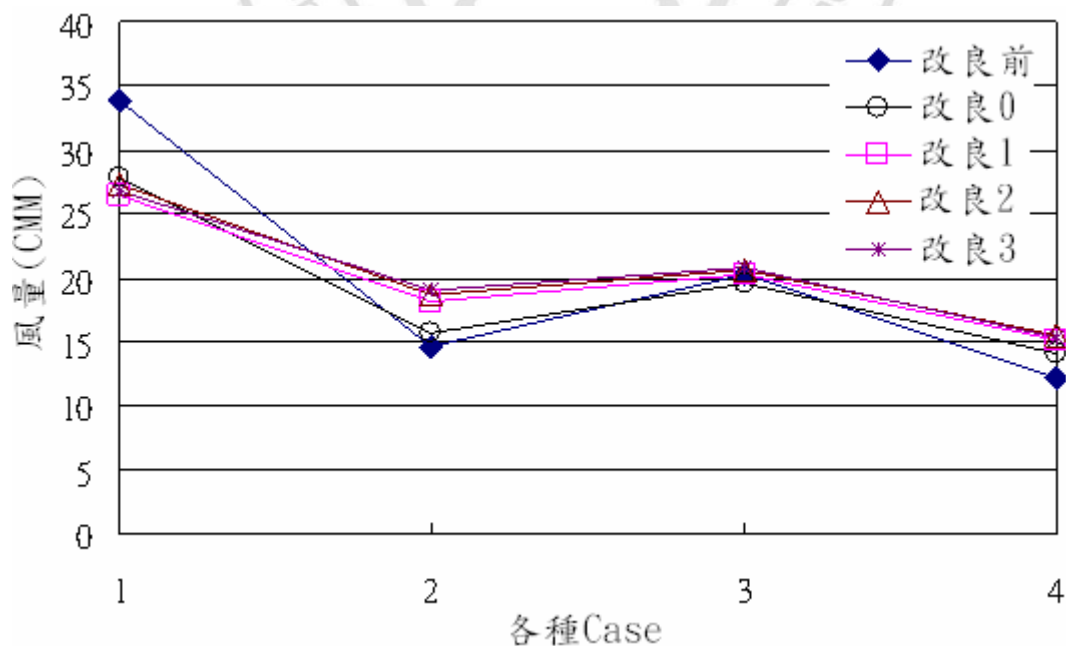


圖 3-16 FFU 改良前後在各種 CASE 下之風量比較

圖 3-17 為 FFU 改良前後在各種 Case 下之能源效率比較，顯示性能是 W/CMM，這個值代表產生 1 CMM 的風量所要消耗的功率，因此越小表示能源效率越高。另外，除 Case 1 與原 FFU 相當外，其他的 Case 中[改良 0]之 FFU 都優於原 FFU，且阻抗越大，[改良 0]之 FFU 的性能及節能效果都越佳。

Case 4 為 FFU 實際使用狀況，在原機殼裝上新葉輪後性能提升約 13.6%。[改良 1]之 FFU 在減小機殼高度後性能又較[改良 0]之 FFU 有大幅提升，且阻抗越大，W/CMM 數值降低的越多，與原 FFU 比較更提升了 30%以上的性能。圖 3-16 顯示[改良 1]之 FFU 之風量較原 FFU 在 Case 4 時增加了 24%，顯示在風量增加的同時耗電量還減少。

單位風量耗能 (W/CMM) 是 FFU 業界常用的性能數值，但其物理意義恰與效率相反，效率是越高越好，W/CMM 則是越低越好。在強調能源效率的現今，似乎以 CMM/W 較符合效率的精神；效率是得到的成果比上付出的代價，CMM 是得到的風量 (成果)，W 是付出的功率 (代價)。

以此計算，原 FFU 之 CMM/W 為 0.0658，[改良 0]之 FFU 為 0.0762，[改良 1] 之 FFU 為 0.0952，效率上，[改良 0]之 FFU 在效率上較原 FFU 提升了 15.8%，[改良 1]之 FFU 則較原 FFU 提升了 44.7%。  
[改良 2]之 FFU 較原 FFU 在 W/CMM 上降低了 32.56%，在效率

(CMM/W) 提升了 48.6%，有近 50% 的提升效果。

在拆除了吸音棉後，[改良 3] 之 FFU 性能反而下降，除了風量略為下降外，電流也略為增加。可能是拆掉吸音棉後，空間加大，機殼中流動分離造成的漩渦也增大，導致機殼內風阻增加，壓力上升，電流增大。這部份還需進一步瞭解才能確定。

以上的分析顯示出口寬度大的葉輪不僅不能提升風量，反而造成風量減小電能增加的後果，因此裝置一個適當的、經過仔細設計過的葉輪是改善 FFU 性能的第一要務。放置一個較扁的葉輪於 FFU 中，勢必要降低 FFU 的高度，本研究實驗證明機殼高度減小不僅可縮減 FFU 體積、減輕重量，增加無塵室天花板上方保養維修空間，對於節能可能還有提升的效果。

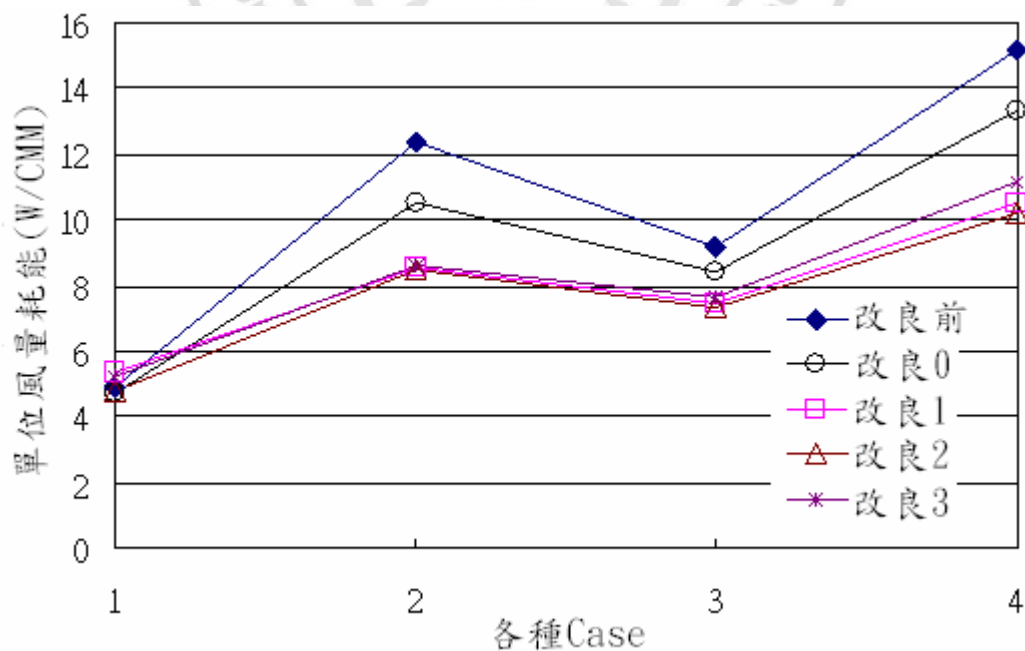


圖 3-17 FFU 改良前後在各種 CASE 下之能源效率比

## 第四章 結論與建議

本研究研究目的在改良現有 FFU 的性能，經理論分析與實際量測後，有以下幾個結論與建議。

1. FFU 的葉輪採用強後傾設計會使機殼內壓損會較小。
2. 將 FFU 機殼高度減小，對機殼內的壓損幾乎沒有影響。
3. 現有 FFU 置換新的葉輪後，單位風量耗能 (W/CMM) 較原葉輪降低約 13%。
4. 現有 FFU 經置換新葉輪、拆解加工縮減機殼厚度、減小徑向間隙後，W/CMM 較原葉輪耗能約降低 33.6%，效率 (CMM/W) 更提升了 48.6%。節能效果非常顯著。
5. 經實際改裝一型常見的 2'×4' FFU，將其機殼高度縮減 30mm，證明不僅可縮減 FFU 體積、減輕重量，增加無塵室天花板上方保養維修空間，對於風量及節能效果都有明顯提升。
6. CFD 模式的網格分佈仍不夠完善，建議可進一步改善。
7. 4'×4' FFU 的性能應不同於 2'×4' FFU，建議可繼續研究。

## 參考文獻

- [1] 伍玉平，2002，潔淨成形污染控制之氣流組織分析與研究，國立中山大學，碩士論文。
- [2] 蕭富文、胡石政、蔡炳煌，2003，“半導體廠潔淨室空調系統之節能探討”，能源節約技術報導，第51期，頁23-30。
- [3] 李文錦，1997，“半導體廠房潔淨室的節能空調設計之探討”，中國冷凍空調雜誌，頁61-69，12月。
- [4] 胡石政、蔡尤溪“行院國家科學委員會於89年完成高科技產業耗電研究(針對台灣地區半導體廠耗電研究)”，民89。
- [5] 曹芳海、鄭名山、陳來富、周雅文、李延青，2001，“無塵室氣流過濾與循環節能探討”，能源節約技術報導，41期，頁4-14。
- [6] 李延青、鄭名山、李隆正，2003，“4'×4' FFU開發-平行圓盤無流線導葉片擴散器之分析研究”，第二十屆機械工程研討會論文集，國立台灣大學，12月5-6日。
- [7] 陳俊傑、鄭名山、李延青、吳稚逸，2003，“以流場速度差劃分無塵室工作區之可行性與系統節能分析”，第二十七屆全國力學會議，台北，12月12-13日。



- [8] 李延青、鄭名山、陳來富、李隆正，2003，“4'×4' FFU 開發-3D 流線導葉片擴散器之應用”，第二十屆機械工程研討會論文集，國立台灣大學，12月5-6日。
- [9] S. C. Hu and Y. K. Chuah, Power Consumption of semiconductor fabs in Taiwan, *Energy*, 28(2003) p.895-907.
- [10] Hu, Shih-Cheng; Chuah, Yew Khoh; Huang, Shen-Chiang Source: *ASHRAE Transactions*, v 108 PART 1, p 1014-1022, 2002.
- [11] Wu, Met Q. Source: ESTECH 2003: 49th Annual Technical Meeting and Exposition of the Institute of Environmental Science and Technology. Proceedings Constamination Control Design, Test, and Evaluation Product Reliability, p 77-81, 2003, ESTECH 2003: 49th Annual Technical Meeting and Exposition of the Institute of Environmental Science and Technology.
- [12] Xu, Tengfang; Jeng, Ming-Shan Source: *Journal of the IEST*, v 47, p 116-120, 2004.
- [13] Xu, Tengfang; Lan, Chao-Ho; Jeng, Ming-Shan Source: *Building and Environment*, v 42, n 6, p 2299-2304, June 2007.

## 作者簡介

姓 名：陳弘毅

出生年月日：民國 56 年 11 月 3 日

學 歷：國立勤益科技大學冷凍空調與能源研究所

私立崑山科技大學電機工程系

私立崑山工業專科學校電機工程科

現 職：行政院勞工委員會職業訓練局台南職業訓練中心助理訓練師

經 歷：生記空調電機、威群冷凍空調股份有限公司工程師

第 33 屆全國技能競賽南區初賽冷凍空調職類裁判

第 33 屆、34 屆全國技能競賽冷凍空調職類裁判

第 38 屆、39 屆國際技能競賽冷凍空調職類國手指導老師

資 格：室內配線技術士技能檢定術科監評委員

工業配線技術士技能檢定術科監評委員

冷凍空調裝修技術士技能檢定學、術科命題委員

證 照：冷凍空調裝修甲級、乙級技術士

室內配線乙級技術士

自來水管配管丙級技術士

甲種電匠、自來水管承裝技工

通訊處：台南縣新營市同濟街 181 之 3 號

電 話：(06) 6378098

電子信箱：chenhy@tnvtc.gov.tw