

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

負壓空間之污染擴散研究

A Study for the Pollution Diffusivity of the Negative  
Pressure Isolation Rooms

研究生：侯凱倫

指導教授：傅武雄 博士

中華民國九十三年六月

負壓空間之污染擴散研究

A Study for the Pollution Diffusivity of the Negative Pressure

Isolation Rooms

研究生：侯凱倫

指導教授：傅武雄

Student : Kai-Lun Hou

Advisor : Wu-Shung Fu

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

# 負壓空間之污染擴散研究

研究生：侯凱倫

指導教授：傅武雄

國立交通大學機械工程學系

## 中文摘要

本文在數值計算上使用有限體積法及紊流  $k-\varepsilon$  模式計算負壓區間的流場計算與污染擴散研究現象。本文分別研究於穩態計算下的排風管有無含有過濾材的負壓區間流場結構，並且分析在不同通風條件下的情形。以及研究負壓區間以暫態的滑移開門作用下，其原本流場受到作用而改變的情形。

結果顯示在通風條件為房間全封閉之不通風情況下，負壓情形較好，但污染累積程度極為嚴重。而在換氣率較佳的情形下，雖然保持負壓情況較為不佳，但區間內污染情形較低。由此可知通風對於防止污染擴散有較大的影響。

而滑移門開門作用使得負壓區間整體負壓環境難以維持，無法持續地維持區間內與外界保持一定壓差的狀態。如需改善則可增設緩衝室以減低污染外洩。

# A Study for the Pollution Diffusivity of the Negative Pressure Isolation Rooms

Student : Kai-Lun Hou

Advisor : Wu-Shung Fu

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The research is primary to solve the flow field and pollution diffusivity of the negative pressure isolation rooms (NPIRs) by using finite volume method and standard  $k-\varepsilon$  turbulent model in numerical study. On the one hand this paper analyzes the steady state with or without filter belonging in wind tunnel in NPIRs and calculates these situations individually based on different ventilated boundary conditions. On the other hand, this paper analyzes the change of NPIRs flow field in each transient movement by sliding open door events.

The result shows the case in closed ventilation boundary conditions with the negative pressure situation is better than normal ventilation boundary conditions but it also reveals pollution concentration heavily. Under the condition of the more air change rate (ACH) the lower pollution concentration, although it's hard to keep the negative pressure situation. The result shows us that pollution diffusivity is mainly influenced by the ventilation conditions.

The transient study shows that negative pressure zone is hard to maintain while the door is opening. But it can be slow down by setting the baffle rooms.

## 誌謝

在歷經一年的時間裡，本文終於完成，在此得謝謝許多人的協助。首先感謝我的父母二十多年來的養育之恩與教養，使我長大成人完成學業，並順利地無憂無慮完成碩士學業。而歷經兩年的碩士生涯中，在此尤其感謝我的指導老師 傅教授武雄先生在研究上、生活上及課業上無微不至的照顧，以及在為人處事上的教誨，本人在此謹致上最高的敬意。

感謝口試委員林振德教授、黃奕孝博士、徐陳平總經理於百忙之中抽空審查本文，並給予在下助益良多的意見。並謝謝學長童寶鴻和同門的同學楊順吉、賴昱志、梁尚智、王孝錚以及學弟連信宏、黃東億等人的協助，在此一併致謝。

期望這一份論文能夠對社會以及國家能夠有所幫助。

最後，僅以本文獻給我的家人與師長和朋友。



# 目錄

中文摘要 .....	i
ABSTRACT .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
符號說明 .....	xi
第一章 緒論.....	1
第二章 物理模式.....	8
2.1 物理尺寸與分析模式 .....	8
2.2 葉片設計方程 .....	9
2.3 分析假設及統御方程式.....	16
2.4 邊界條件 .....	20
2.5 計算條件 .....	24
第三章 數值方法.....	26
3.1 數值離散分析與計算收斂條件 .....	26
3.2 網格建立與網格測試 .....	30
3.3 穩態 multi-frame 轉動及暫態滑移網格(sliding mesh) .....	30
第四章 結果與討論 .....	35
4.1 穩態計算風管含有濾網之負壓隔離區間結果.....	35
4.1.1 含有濾網之風管的完全密閉區間流場結構(型別 case a1) .....	36
4.1.2 含濾網之風管利用門縫換氣的流場結構(型別 case a2).....	42
4.1.3 含有濾網之風管利用門縫及洩漏口換氣的流場結構(型別 case a3、型別 case a4) .....	48
4.2 穩態計算風管不使用濾網之負壓隔離區間結果 .....	49
4.2.1 不含濾網之風管的完全密閉區間的流場結構(型別 case b1).....	49
4.2.2 不含濾網之風管利用門縫換氣的流場結構(型別 case b2) .....	57
4.2.3 風管不使用濾網之門縫及洩漏口換氣隔離區間的流場結構(型別 case b3、型別 case b4).....	58
4.3 穩態計算負壓隔離區間結果數值比較 .....	68
4.4 暫態計算負壓隔離區間開門過程結果 .....	77
第五章 結論與建議 .....	96
5.1 總結 .....	96
5.2 建議 .....	96



## 表目錄

表 2-1	多孔性材質相關係數表 .....	22
表 2-2	一般常用追蹤氣體暴露危險濃度 .....	22
表 2-3	SF <sub>6</sub> 之相關性質設定 .....	23
表 2-4	工作流體(空氣, Air) 相關性質表.....	23
表 2-5	本文研究之物理模式關係與邊界設定一覽表 .....	25





## 圖目錄

圖 1-1	設置壓力計位置圖[3] .....	3
圖 1-2	簡易放煙測試及風速(向)測試示意圖[3].....	3
圖 1-3	排氣進出口設計示意圖[3] .....	4
圖 1-4	循環式負壓房設計負壓示意圖[3].....	7
圖 2-1	負壓隔離區間的物理模型示意圖 .....	10
圖 2-2	負壓隔離區間的物理尺寸圖(單位:mm，比例 1:110) .....	11
圖 2-3	風扇機組物理尺寸圖(單位:mm，比例 1:15).....	12
圖 2-4	考慮開門作用之負壓隔離區間的物理模型示意圖 .....	13
圖 2-5	考慮開門作用之負壓隔離區間的物理尺寸圖(單位:mm，比例 1:110) ...	14
圖 2-6	圓轉換成翼形的轉換圖 .....	15
圖 3-1	相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖[18].....	28
圖 3-2	對流通量(上風法)示意圖[18].....	28
圖 3-3	數值計算流程圖 .....	29
圖 3-4	不規則網格幾何模型舉例示意圖[19] .....	32
圖 3-5	數值計算風扇周圍網格建立設計圖 .....	32
圖 3-6	網格測試比較圖(第一研究部分).....	33
圖 3-7	滑移網格進行方式說明示意圖[18].....	34
圖 4-1	計算流場顯示之各截面示意圖.....	37
圖 4-2	計算流場顯示於截面 a 時之細分部分示意圖 .....	37
圖 4-3	流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part I.....	38
圖 4-4	流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part II.....	38
圖 4-5	流場速度分佈圖，圖 4-4 局部區域放大圖(原紅色框選區域)，case a1，截面 a.....	39
圖 4-6	流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part III.....	39
圖 4-7	流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part IV .....	40
圖 4-8	流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part IV 最後出口部分 .....	40
圖 4-9	流場壓力分佈圖，case a1，截面 a，part I.....	41
圖 4-10	流場壓力分佈圖，case a1，截面 a，part II.....	41
圖 4-11	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a1，截面 a .....	41
圖 4-12	流場速度分佈圖，case a2，截面 a，part I.....	44
圖 4-13	流場速度分佈圖，case a2，截面 c.....	44
圖 4-14	流場速度分佈圖，case a2，截面 a，part II.....	45
圖 4-15	流場速度分佈圖，case a2，截面 a，part IV .....	45
圖 4-16	流場壓力分佈圖，case a2，截面 c.....	46

圖 4-17	流場壓力分佈圖，case a2，截面 a，part II.....	46
圖 4-18	流場壓力分佈圖，case a2，截面 a，part IV .....	46
圖 4-19	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a2，截面 a.....	47
圖 4-20	流場 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case a2.....	47
圖 4-21	流場速度分佈圖，case a3，截面 a，part I.....	50
圖 4-22	流場速度分佈圖，case a4，截面 a，part I.....	50
圖 4-23	流場速度分佈圖，case a3，截面 a，part II.....	51
圖 4-24	流場速度分佈圖，case a4，截面 a，part II.....	51
圖 4-25	流場壓力分佈圖，case a3，截面 a，part I.....	52
圖 4-26	流場速度分佈圖，case a3，截面 a，part II.....	52
圖 4-27	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a3，截面 a.....	53
圖 4-28	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a4，截面 a.....	53
圖 4-29	流場 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case a3.....	54
圖 4-30	流場 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case a4.....	54
圖 4-31	流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part I.....	55
圖 4-32	流場速度分佈圖，圖 4-31 右上側局部區域放大圖，case b1，截面 a，part I.....	55
圖 4-33	流場速度分佈圖，case b1，截面 b.....	56
圖 4-34	流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part II.....	56
圖 4-35	流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part III.....	59
圖 4-36	流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part IV .....	59
圖 4-37	流場壓力分佈圖，case b1，截面 a，part I.....	60
圖 4-38	流場壓力分佈圖，case b1，截面 b .....	60
圖 4-39	流場壓力分佈圖，case b1，截面 a，part II.....	60
圖 4-40	流場壓力分佈圖，case b1，截面 a，part IV .....	61
圖 4-41	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b1，截面 a.....	61
圖 4-42	流場速度分佈圖，case b2，截面 a，part I.....	62
圖 4-43	流場速度分佈圖，case b2，截面 c.....	62
圖 4-44	流場速度分佈圖，case b2，截面 a，part II.....	63
圖 4-45	流場速度分佈圖，case b2，截面 a，part III.....	63
圖 4-46	流場壓力分佈圖，case b2，截面 a，part I.....	64
圖 4-47	流場壓力分佈圖，case b2，截面 c.....	64
圖 4-48	流場壓力分佈圖，case b2，截面 a，part II.....	64
圖 4-49	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b2，截面 a.....	65
圖 4-50	流場 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case b2.....	65
圖 4-51	流場速度分佈圖，case b3，截面 a，part I.....	66
圖 4-52	流場速度分佈圖，case b4，截面 a，part I.....	66
圖 4-53	流場速度分佈圖，case b4，截面 c.....	66

圖 4-54	流場速度分佈圖，case b3，截面 a，part II.....	67
圖 4-55	流場速度分佈圖，case b4，截面 a，part II.....	67
圖 4-56	流場壓力分佈圖，case b3，截面 a，part I.....	70
圖 4-57	流場壓力分佈圖，case b4，截面 a，part I.....	70
圖 4-58	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b3，截面 a.....	71
圖 4-59	流場 SF <sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b4，截面 a.....	71
圖 4-60	流場 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case b3.....	72
圖 4-61	流場 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case b4.....	72
圖 4-62	區間內流出至外界的空氣體積流率圖.....	73
圖 4-63	負壓區間內每小時換氣率(ACH)圖.....	73
圖 4-64	壓力與距離關係圖相對於房內各點位置對照圖.....	74
圖 4-65	壓力與距離關係圖 (型別:case a1-a4).....	75
圖 4-66	壓力與距離關係圖 (型別:case b1-b4).....	75
圖 4-67	壓力與距離關係圖(型別:case a3 與 case b3 比較).....	78
圖 4-68	由床面污染源(SF <sub>6</sub> )擴散的質量流率統計圖(對數座標).....	78
圖 4-69	負壓區間內有害氣體濃度過大之網格數量百分比統計圖(對數座標).....	79
圖 4-70	負壓區間內有害氣體累積總質量統計圖(對數座標).....	79
圖 4-71	暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。 (甲)t=0sec (乙)t=0.1 sec.....	82
圖 4-71	(續 1) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。(丙)t=1 sec (丁)t=2 sec.....	83
圖 4-71	(續 2) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。(戊)t=3 sec (己)t=4 sec.....	84
圖 4-72	暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 c，房外走廊及 part I 部分。 (甲)t=0 sec (乙)t=0.1 sec.....	85
圖 4-72	(續 1) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 c，房外走廊及 part I 部分。(丙)t=1 sec (丁)t=2 sec.....	86
圖 4-72	(續 2) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 c，房外走廊及 part I 部分。(戊)t=3 sec (己)t=4 sec.....	87
圖 4-73	暫態開門過程壓力分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。(甲)t=0 sec (乙)t=0.1 sec(丙)t=1 sec.....	88
圖 4-73	(續 1) 暫態開門過程壓力分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部 分。(丁)t=2 sec (戊)t=3 sec(己)t=4 sec.....	89
圖 4-74	暫態開門過程 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case c，房外走廊及 part I 部分。(甲)t=0 sec (乙)t=0.1 sec.....	90
圖 4-74	(續 1) 暫態開門過程 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case c，房外走廊及 part I 部分。 (丙)t=1 sec (丁)t=2 sec.....	91
圖 4-74	(續 2) 暫態開門過程 SF <sub>6</sub> 等濃度面圖，case c，房外走廊及 part I 部分。	

	(戊)t=3 sec (己)t=4 sec.....	92
圖 4-75	暫態開門過程壓力與濃度變化圖擷取資料點位置示意圖 .....	94
圖 4-76	暫態開門過程房門內外壓力變化圖 .....	94
圖 4-77	暫態開門過程房門內外 SF <sub>6</sub> 濃度變化圖 .....	95



## 符號說明

$A_i$	單位網格擴散面之面積	[m <sup>2</sup> ]
$C_m$	物質混合的質量分率濃度	
$C'_m$	紊流質量分率濃度濃度變化量	
$C_\mu$ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 $C_{\varepsilon 3}$	紊流模式係數	
$D_m$	物質的濃度擴散係數	[m <sup>2</sup> /s]
$d_p$	多孔性介質平均粒徑	[m]
$F_{m,j}$	物質於 $x_j$ 方向的擴散通量	[kg/m <sup>2</sup> s]
$k$	紊流動能	
$k_i$	多孔性介質於 $x_i$ 軸流動方向的滲透度	[kg/m <sup>3</sup> s]
$L_p$	多孔性介質特徵長度	[m]
$m_m$	物質於單位容積中的質量	[kg]
$n$	與邊界面垂直方向的座標軸	
$p$	壓力	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_p$	多孔性介質中的壓力	[N/m <sup>2</sup> ]
$s_i$	動量來源(momentum source)	
$s_\phi$	來源係數	
$t$	時間	[sec]
$u_i$	流體在 $x_i$ 方向的絕對速度	[m/s]
$\tilde{u}_i$	流體與座標系統的相對速度	[m/s]
$u'$	速度變動量	[m/s]
$V$	體積	[m <sup>3</sup> ]
$x_i$	卡氏座標(i=1,2,3)	

### 希臘符號

$\alpha_i$ 、 $\beta_i$	多孔性壓降係數	
$\Gamma_\phi$	任一獨立物理量之擴散係數(計算速度場中的黏滯係數)	
$\varepsilon$	紊流耗散率	

$\varepsilon_p$	多孔性介質孔隙率	
$\zeta$	轉換平面座標系	
$\eta$	轉換平面座標系垂直軸	
$\theta$	角度	[rad]
$\mu$	黏滯係數	[kg/ms]
$\mu_t$	紊流黏滯係數	[kg/ms]
$v$	表面速度	[m/s]
$\xi$	轉換平面座標系水平軸	
$\rho$	物體密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	紊流模式係數	
$\tau_{ij}$	應力張量	
$\phi$	代表任一獨立物理量(如速度、溫度、濃度)	

### 上標說明

-	時均值
+	紊流無因次參數
<sup>n</sup>	新迭代之物理量選用
<sup>o</sup>	舊迭代之物理量選用



### 下標說明

<sub><i>i, j, k</i></sub>	張量使用序號(如 $i=1, j=2, k=3$ )
---------------------------	----------------------------

### 其他符號

$  $	絕對值、取向量純量值
$\nabla$	求取各方向的梯度量，如同 grad
$\sum$	加總表示

# 第一章 緒論

在一個封閉的室內環境裡，為了達到要求的工作環境，往往要求其室內的空氣品質 (IAQ, indoor air quality) 達到某一標準。而使用的方法可以藉由冷暖氣、抽換氣、增減濕度、冷凍處理．．．等等方法達成。例如某密閉工作環境會在製程之中無可避免地產生不利人體的有害物質(粉塵、液體、氣體)，在濃度累積至一定值時可能會對作業環境的人員造成危害，如鉛中毒、二氧化碳中毒、矽肺病等等，為了避免這樣的災害發生，對於工作環境內的通風系統之規劃是十分重要。以換氣來說，主要功能是引入外界新鮮空氣降低室內有害物質的濃度，並將有害物質排出至與人員不產生接觸的室外環境；以濃度混和的觀點來說，引進外界的新鮮空氣越多，室內的有害物質越能夠被稀釋。因此國內外作業場所對於通風量的要求大多訂有標準，如勞委會公布的勞工安全衛生法[1]、勞工安全衛生設施規則[1]、有機溶劑中毒預防規則[1]，皆有明文規定場所需裝設局部排氣裝置或整體換氣設備。因此如何將有害物質迅速地從指定場所內排除，則是目前工業衛生、醫療安全研究領域當中的重要一環。

以抽換氣的方式控制局部區域內的有害物濃度之外，抽換氣的場所也常設計成局部正壓或是負壓的環境，藉以控制局部區域內有害物的擴散。比如一般在工業界、食品業、醫院所使用的潔淨室，使用正壓房的設計。因為正壓的緣故，外界的污染物較不容易由室外環境擴散污染至潔淨室，以確保在此區域內要求的潔淨度。至於當一個空間有污染源的發生，尤其是具有危險性的核、生、化污染時，通常會使此一空間規劃成負壓區間，使得有害物侷限在此一區域，避免此區域的有害物質不致擴散至其他區域。而這樣的方式，可常見於核能電廠廠房、醫療院所負壓病房、指定區域吸煙室的設計。因此藉由正負壓區間的設立，可以使用較低的換氣量達到控制有害物質擴散的目的。

至於如何對於特定工作場所使用正壓或是負壓的控制，則可參考美國暖房冷凍通風暨空調工程師協會(ASHRAE)的手冊[2]，根據建議對於手術室、實驗室或加護病房應採用正壓，以祈避免受到外界污染源的影響。而如洗手間、暗房、毒物儲藏室則建議採用

負壓，讓場所內的污染不致擴散。

為此在 1990 年代，CDC(centers for disease control and prevention, 美國疾病管制局)頒佈了關於預防及治療肺結核病患的報告 [3]，其中除了介紹關於醫療方面的辨識病患、照顧病患等，更對於工程上的控制有所建議(換氣、濾材過濾、UVGI 燈、隔離病房的正確架設等等)。根據報告 [3]，患有開放性結核病的病患必須隔離，其中隔離室應為負壓之單人病房。除了嚴格管制人員進出和照顧程序之外，對於隔離室的空調也有所要求。其中房內與房外的壓力差於關房門時，需要維持在 0.001in-Aq(英吋水柱高)(約 0.25Pa，而目前新的 CDC 標準則為 5Pa)，而且應於門的內外設置壓力計，以便隨時監控。放置的方式如圖 1-1 所示，壓力計探針如分別設置在 P1 及 P2 點，則這兩者的壓力指示也許會不同。為了能真正指示壓差，壓力計探針需設置於靠近房門底下門縫交界處，如此才能正確顯示隔離室是否為負壓區間。如果空間許可，則需設立前室當作緩衝區，以利人員進出並防止正負壓區間的直接接觸。而簡易的測試方式如圖 1-2 所示，人員可由受測的區間門外縫隙放煙，如果區域能夠維持負壓區間，則流體由高壓流向低壓的原理之下，外面的空氣會將煙霧挾帶往隔離區間。反之，如果煙霧流向向外，則表示裡面區間壓力高於外部，恐有污染外洩之虞。而經由出口管路所排放出的廢氣需先經過高效率微粒過濾器(HEPA)過濾或適當方式處理(如化學處理或使用 UVGI 裝置)，使得有毒的病菌或氣體不至藉由排氣系統外洩。

為要避免病菌的持續累積於隔離區間，則需要靠有效的抽換氣解決，藉由外界新鮮空氣的引進來稀釋。而根據文獻 [3]所記載，整體換氣最好能夠每小時 6 次的換氣率 (ACH, air changes per hour, 指一小時內空氣流量為多少倍的區間容積)，如果系統設備容許的話應增加為 8 至 12 ACH。整體的換氣出入口的設計更是直接影響區間內的流動好壞，最好是避免短路型的氣流，避免在室內產生迴流區使得毒物不能順利排出而在區域內不斷循環，如圖 1-3 所示(B 圖天花板附近造成迴流)。

然而以一般負壓房的設計方式是使用最小供應流率差距(flow difference, 出口流量減去進口流量)在  $50 \text{ ft}^3/\text{min}$  或是排氣端流量大於進氣端流量 10%，而其他的流量差距則是藉由設在負壓室中的洩漏口(leakage, 可為開孔或是門縫)補足，使得區間達到負壓的



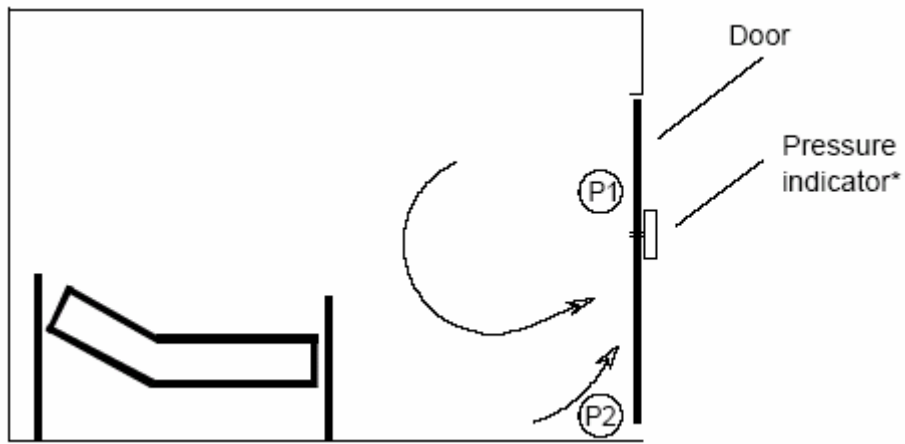


圖1-1 設置壓力計位置圖[3]

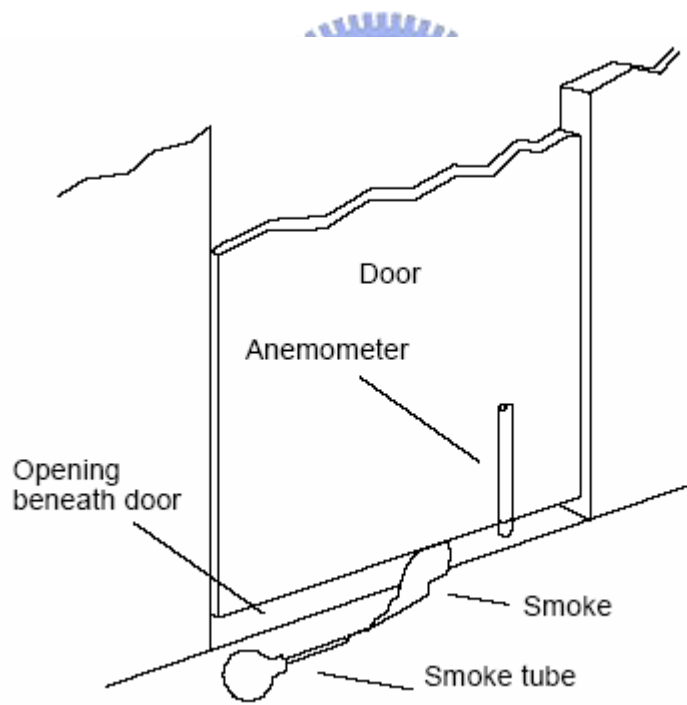


圖1-2 簡易放煙測試及風速(向)測試示意圖[3]

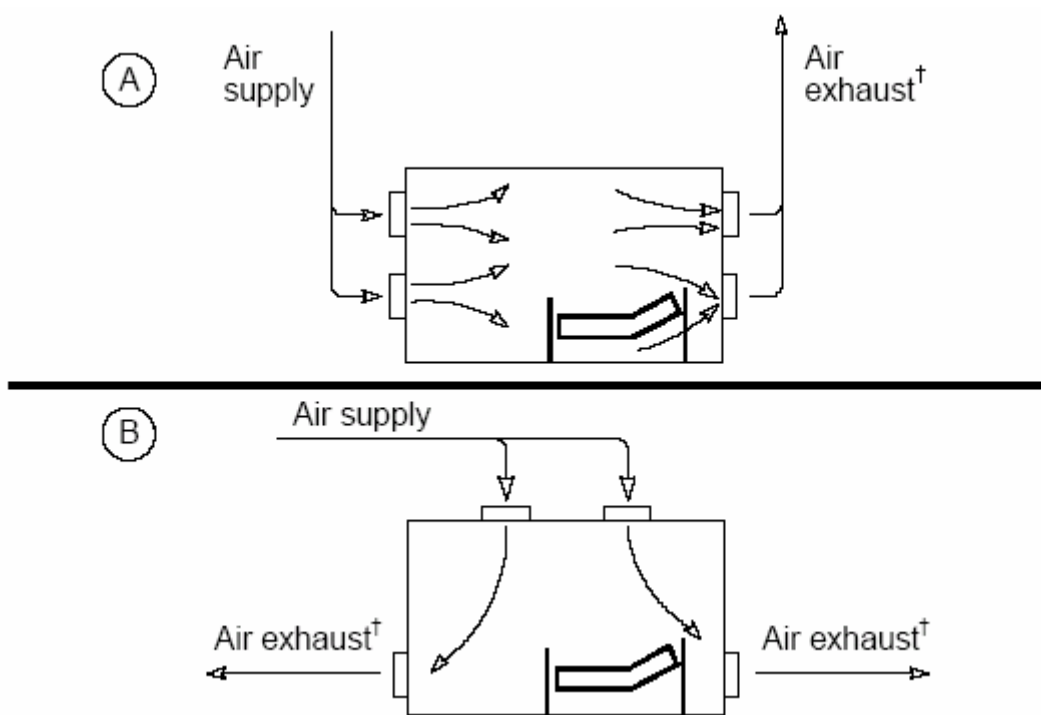


圖1-3 排氣進出口設計示意圖[3]

概念，如圖 1-4 所示。而有些負壓房設計不要求整體換氣，而可採用部分迴氣的方式節能，但其濾材的選用與維護是十分重要，否則迴氣的使用反而會有污染之虞[4]。

至於其他關於此方面研究，楊 [5]利用追蹤氣體技術的實驗方式，設計實驗室實體隔間，探討兩鄰近區域壓力差下，打開開口部時，污染物所造成的影響。其結果發現在相同壓力差下，開口面積越大則逸散效應越明顯；同開口面積下，壓力差越小則逸散效應越明顯。並於實驗中發現雖保持區間8Pa的壓力差(一般我國的負壓病房設計採用8Pa為標準)，但開門時低壓區污染物仍有可能逸散至高壓區。Hayden, et al. [6]使用實驗方式測試負壓病房在各種參數下，探討人員正在進出過程之中負壓房的空氣體積遷移量，結果發現改變開門的方式(拉門或搖擺門)、人員進或出、搖擺門開門速率、壓差的這些因素之下，均無明顯改變空氣體積遷移量的效應，唯一有關的參數則是進、排氣口流量的差值。且發現人員進出過程中仍會無可避免地造成某種程度上的空氣體積遷移，如為減低或消除此遷移量則需要調整至非常高的進排氣流量差，才能達到效果。不過文中並發現可由增設緩衝區或前室而減低污染。陳, et al. [7]探討複式均勻混合模式的建立方式，並以其結果探討傳統均勻模式的適用範圍，並建立最大有害物排除效能的置換通風氣流型態。林 [8] 對於呼吸道隔離病房的整體架設及各種設施的使用作全盤性的整理，並分析整體能源回收率及節能設備的研究，認為全換氣模式系統性能最為穩定，並於經濟效益上較全熱交換器式更有效率。Bowes, et al. [9] 使用實驗方式以預先混合均勻的SF<sub>6</sub>為追蹤氣體，以濃度半衰期定義混合因子，結果知實驗與假設中少有一致性，原因是新鮮空氣無法很有效的與室內有害氣體均勻混合，而產生層化現象。如增加流量可改善層化現象，使混合效率提高。葉[10]建立排氣櫃模型以實驗方式測試其性能，結果發現隨著拉門的下降，可以維持入口面速度不變，達到節能的目的，並探討設計檔板以減低迴流區的發生，使排氣櫃缺失改進。林 [11]以數值方法對密閉室內粉塵及有害氣體排除進行研究與分析，針對不同的進排氣口位置及不同粒徑大小粉塵做研究。其顯示粉塵在高流量及低流量的換氣時，無法完全有效排除。而有害氣體研究方面，如果氣體源發生於主流道上時，其污染較小，有助於排除；反之氣體源在迴流區時，則污染範圍較大，不利排除。Zhao, et al. [12]使用數值方法分析於不同通風型態的室內房間對於不同粒徑

的煙霧濃度與沈積影響，結果顯示室內的通風型態對於煙霧濃度與沈積有主要的影響，而顆粒大小越大者越不容易排除。

根據上述一般關於此方面的研究多半是使用實驗方式進行，使用實際比例作為分析。或是使用進出流量平衡的方式模擬隔離區間的現象。而實際計算風機轉動抽氣成為負壓環境的計算則不多見。有鑑於此，本文使用數值計算方式配合風機轉動方式計算隔離區間的流場，進而分析污染擴散的研究。

過去有關計算隔離區間的方式是假設其為均勻流的入口條件，其出口條件設定為質量守恆的邊界，之後計算濃度場，以其結果判定是否到達某一定值而決定是否有污染的發生。但是計算上不是真實地建立風機產生動力源計算整體的流場，而實際工程上為了使空氣流動造成負壓環境，大部分使用鼓風機組或風扇來達成目的。在風機性能研究方面，一般採用流場速度三角形法並配合氣體動力學分析[13]。至於前人研究中，多半將葉片假設一旋轉角度，並給予入口均勻流的條件，但數值計算上，葉片並不是真正的做旋轉運動，因此往往無法看到風扇機組內部細微流場變化。然而風機產生的三維旋轉流場及中心軸產生的停滯區和均勻流場有所差異。因此葉[14]以數值方式配合軟體使用，計算風扇流場散熱與鰭片的關係，以修正動量方程式來源項(momentum source)達到風機轉動的目的，而數值結果與實驗結果符合。因此，本文藉由以上新的方式使流場動力源為風扇機組所產生，可模擬出較為真實的負壓隔離區間的模式。

本文將以數值計算的方式配合數值模擬軟體 STAR-CD 的計算，以  $k-\varepsilon$  紊流模式分析以及有限體積法(finite-volume)迭代，求解動量方程與與能量方程，建構一個隔離區域以風扇排風管道抽氣，用以了解區域內的整體流場的情形，並進而確認擺設位置、有害物質是否會累積在某處．．．等等的課題。

結果顯示當一個隔離區間設計完成之時，如為了僅滿足其負壓的環境，而忽略換氣的重要性時，倘若換氣不足，則污染會持續累積在區間內，造成損害人員健康影響。反之其區間設計雖負壓程度不大，卻能有效地抽換氣，則可以減低污染的效應，進而防止污染的擴散。

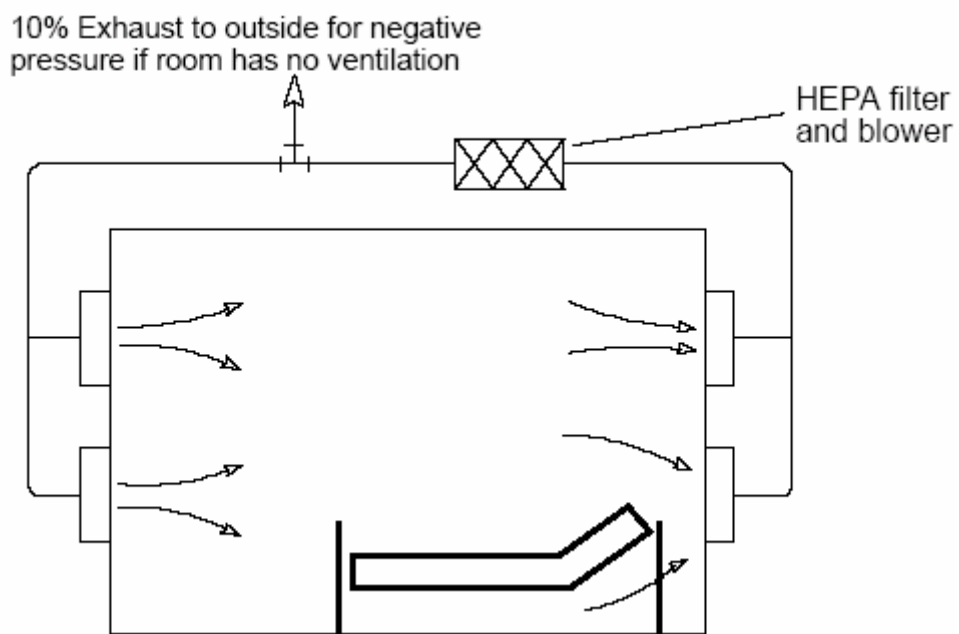


圖1-4 循環式負壓房設計負壓示意圖[3]

## 第二章 物理模式

### 2.1 物理尺寸與分析模式

風扇機組旋轉時空氣由室內被抽向風管，之後排出至大氣。由於葉片做等角速度旋轉運動，又因為葉片自身是不規則曲率之圓弧區面，以致空氣粒子不只是單純地沿某方向運動，更包括旋轉運動。因此本文於數值模擬時，需考慮此複雜的風扇流場。

本文研究之負壓隔離區間的物理模型示意圖如圖 2-1 所示，第一研究部份之隔離房內有一張病床，病床上躺著病人，其呼吸作用所呼出的氣體帶有病菌，視為污染源。病床旁邊擺設有置物櫃或置放的醫療器材，以一阻礙物視之。病床之正上後方設置一抽風口，使得室內氣體可由此口流出此區間。其銜接風管尺寸大小和風扇機組的外徑相同。相對於此抽風口之對面牆面設有一洩漏口(送風口)。而此洩漏口可依照不同情況設置不同的邊界條件，如可為封閉之情形(不開放)，或開啟之狀態，亦可銜接一送風管(強迫換氣)，送入新鮮外部空氣於隔離房中，送風管前可裝設過濾網，用以過濾有害氣體，病房中有一左右滑動開啟的房門。至於本文負壓隔離區間之實際模擬尺寸如圖 2-2 所示。此房之大小為內寬 5 公尺、內高 3.6 公尺、內深 6 公尺的房間，符合一般隔離區間縱深較大的設計原則。並同時簡化病床模型為一長方體(長 2.5 公尺、寬 1.2 公尺、高 70 公分)。房門設定為一滑移門，於區間外向病床方向視角觀察，房門可由右向左滑移開啟，為一高 2.5 公尺、寬 1.5 公尺的門。門的底下有一門縫，高度為 2 公分高，寬度和門的寬度同。而門縫及洩漏口中段部分均設有一多孔性海綿物質，藉以減緩及均勻流進之速度。

而局部之風扇機組如圖 2-3 所示，為一直徑 45 公分之五片葉片之風扇，風扇機組之深度為 25 公分。如圖 2-3 所示知，可於後視圖(Rear view)發現一支架，但為了簡化起見，於數值計算中忽略支架的存在。

然而一般的負壓區間除了應該考慮一般運行狀況下的流場外，尚應該考慮進出口開

啟時對於此區域內的影響。因此考慮一開門動作對於負壓區間的影響，但是為了簡化起見，不考慮人員進出的效應，僅以一個開門動作做為探討，此為第二研究部分。模型示意圖如圖 2-4 所示，模型本身在於原本第一部份模型上考慮開門的效應，因此需計算外面的走廊的空間部分。其中原有模型部分之所有尺寸同第一研究部份，而走廊之尺寸與其從屬關係可見如圖 2-5 所示，為高度 3.6 公尺與區間同高，寬度為 2 公尺，左右各 5 公尺範圍的部分。至於洩漏口、門縫分別連通房內與走廊，其中段部分同第一研究部份設有一多孔性海綿物質。

## 2.2 葉片設計方程

為了能夠真實地模擬風扇機組之流場，本文數值計算部分所使用的風扇葉片之截面形狀，其幾何仿造一般實驗用風扇截面形狀。而設計轉換的方程乃依據並遵守 Joukowski 翼形，其轉換原理如下所述。

如圖 2-6 所顯示， $\zeta$  平面上的圓 K，其中圓心 M 位於  $\eta$  軸上，而圓  $K_1$  其圓心為  $M_1$ ，圓  $K_1$  和圓 K 內切於 A 點，圓 K 與  $\xi$  軸交於 A、B 兩點，其中  $\overline{OM} = f$ ， $\overline{OA} = b$ ， $\overline{MM_1} = d$ ，所以圓上任意一點 P 可以用複變函數表示成為

$$\zeta = re^{i\theta}$$

代入 Joukowski 轉換式，可得

$$x = \frac{1}{2} \left( r + \frac{b^2}{r} \right) \cos \theta \quad (2.1)$$

$$y = \frac{1}{2} \left( r - \frac{b^2}{r} \right) \sin \theta \quad (2.2)$$

(2.1)式乘上  $\sin \theta$ ，而(2.2)式乘上  $\cos \theta$ ，分別平方之後兩式相減，得到

$$x^2 \sin^2 \theta - y^2 \cos^2 \theta = b^2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (2.3)$$

在三角形  $\Delta OMP$  內，由餘弦定理可得

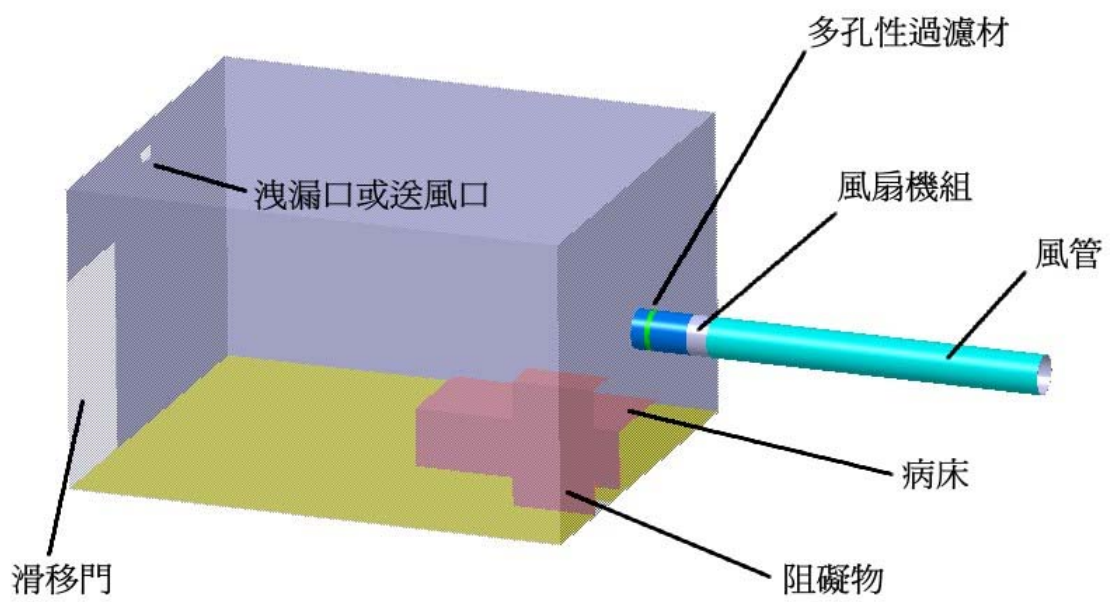


圖2-1 負壓隔離區間的物理模型示意圖



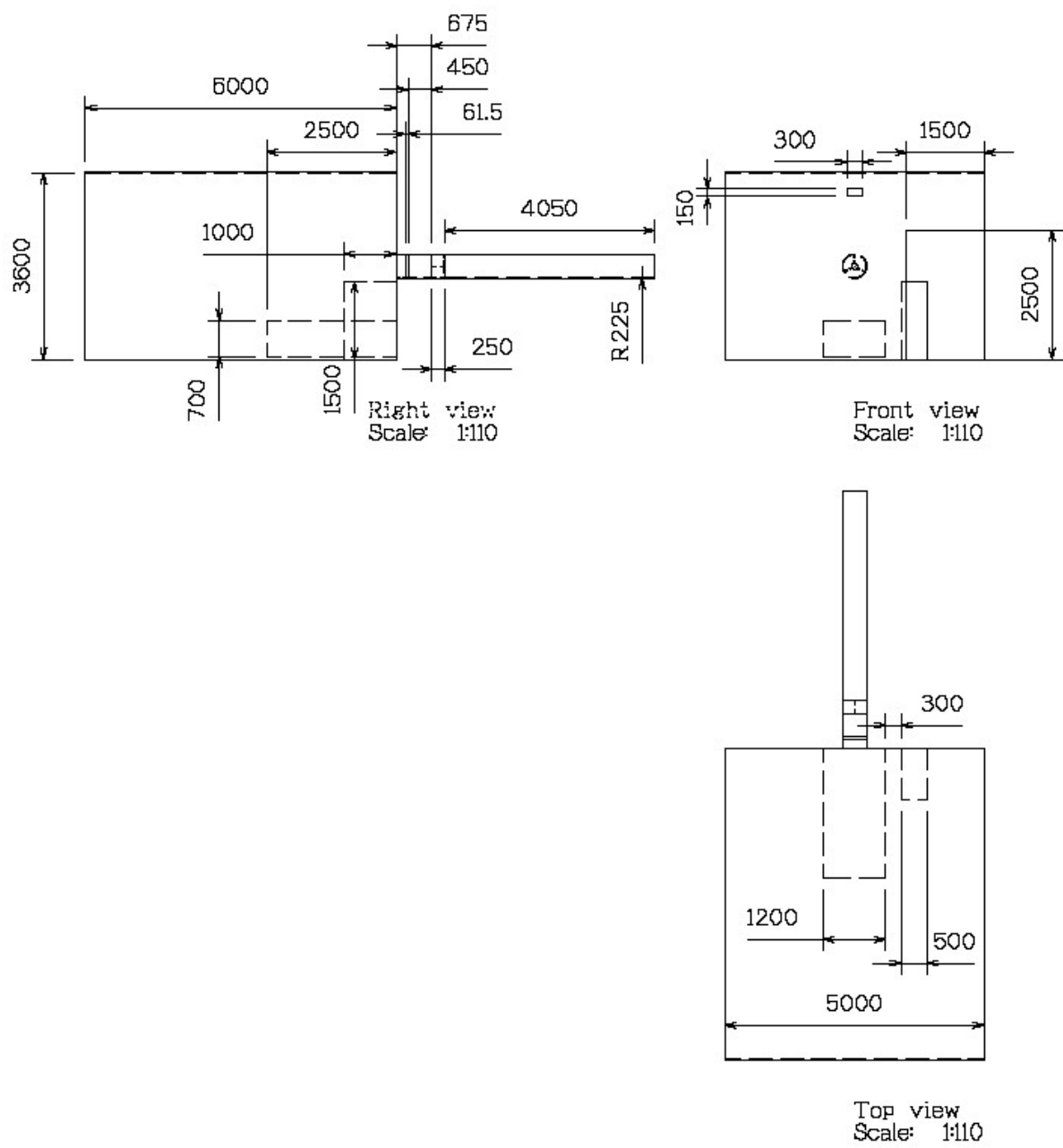


圖2-2 負壓隔離區間的物理尺寸圖(單位:mm，比例 1:110)

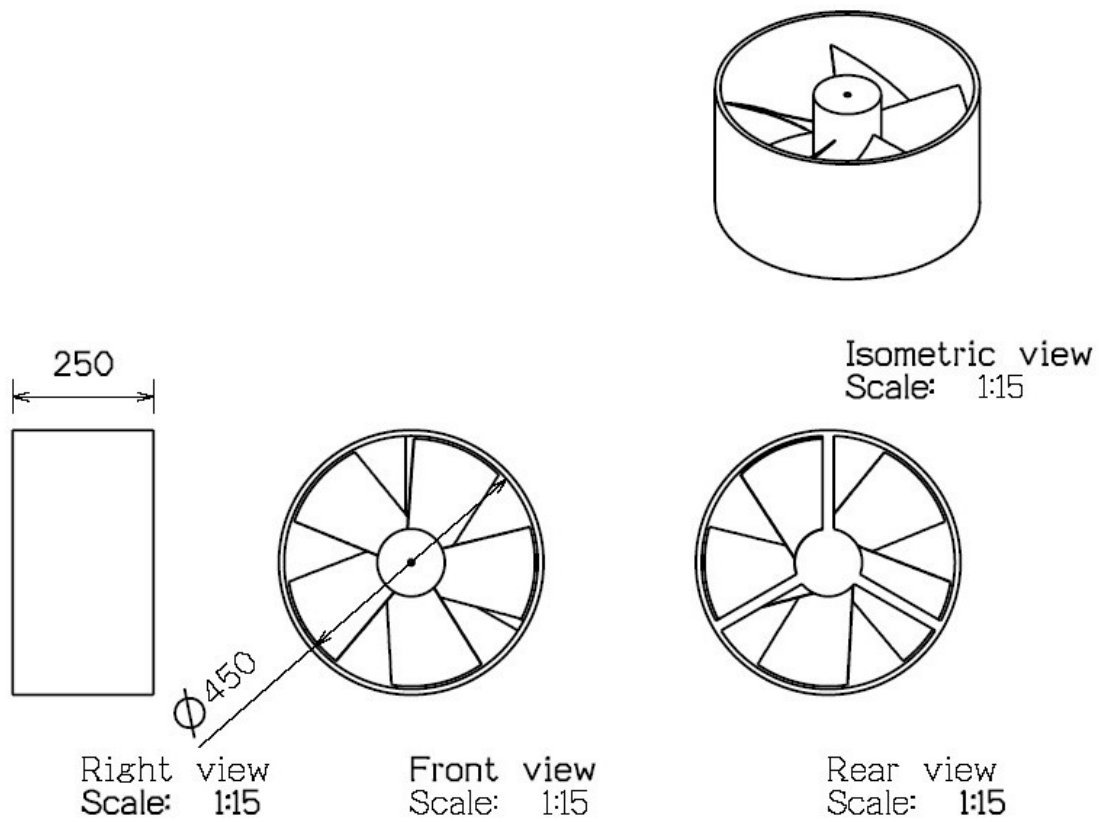


圖2-3 風扇機組物理尺寸圖(單位:mm，比例 1:15)

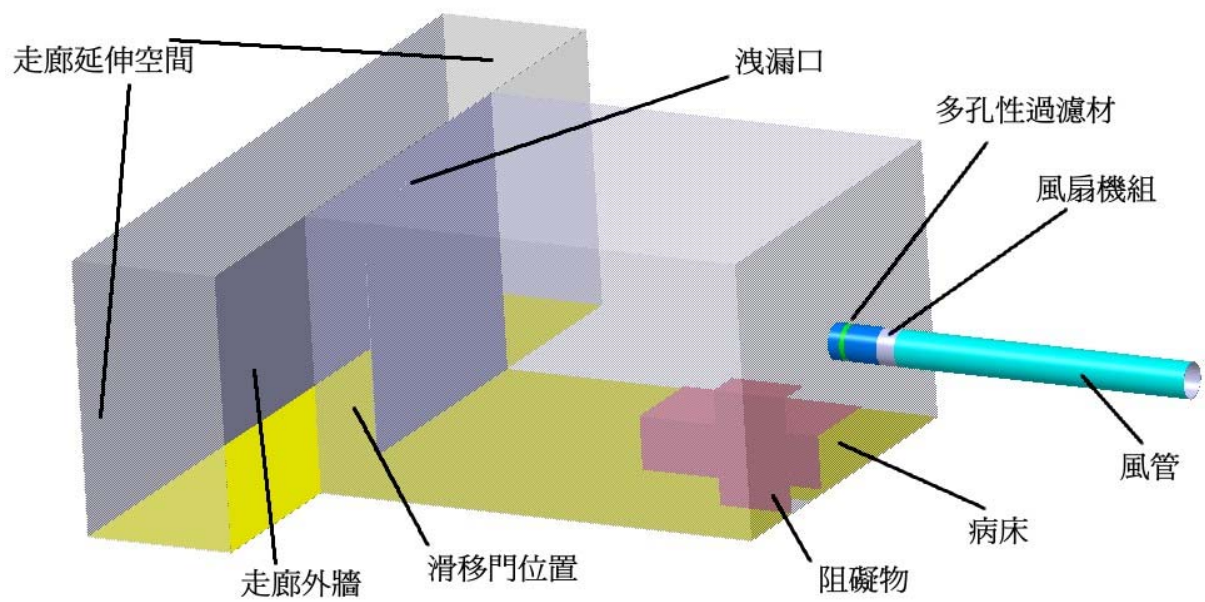


圖2-4 考慮開門作用之負壓隔離區間的物理模型示意圖

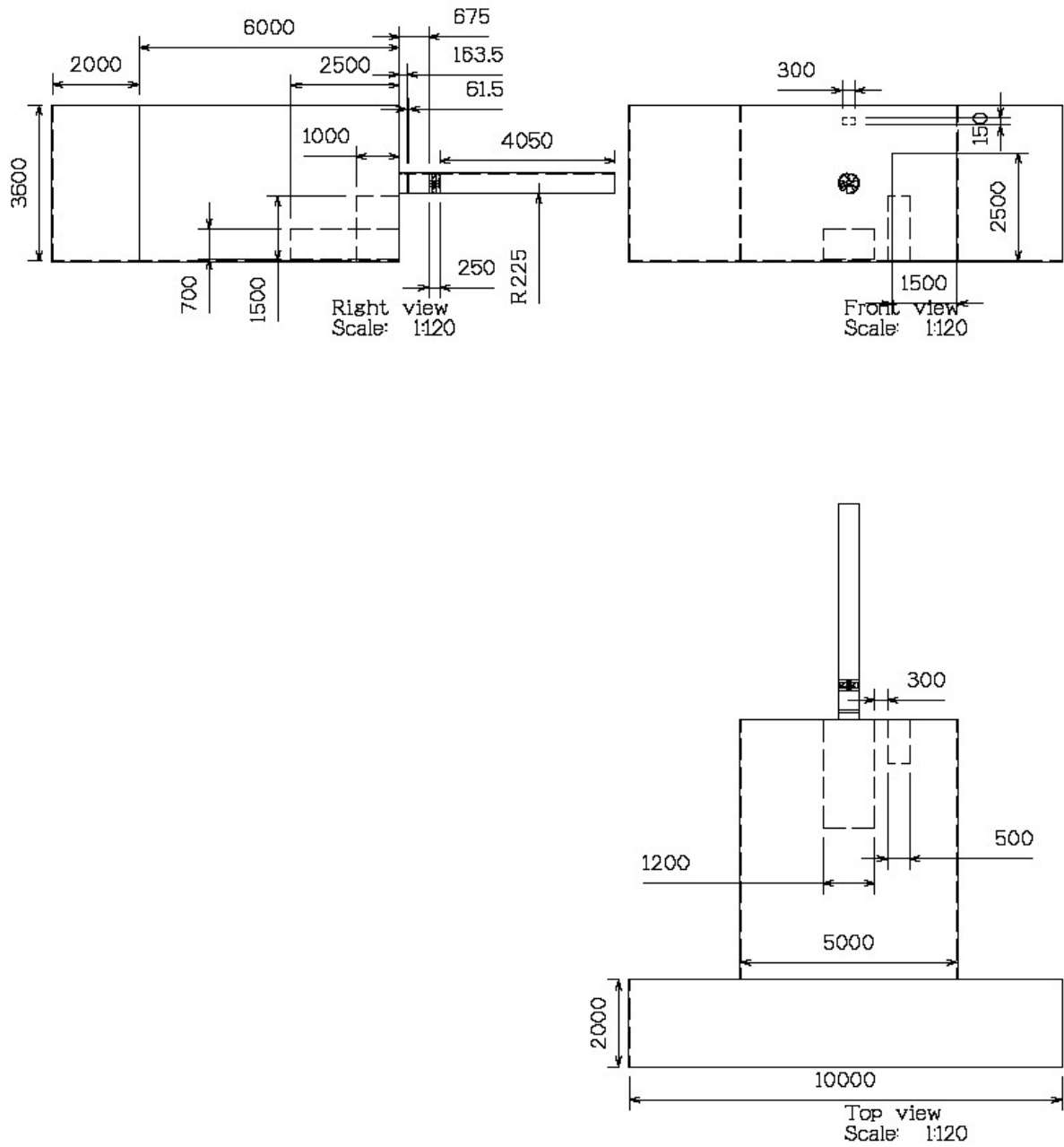


圖2-5 考慮開門作用之負壓隔離區間的物理尺寸圖(單位:mm，比例 1:110)

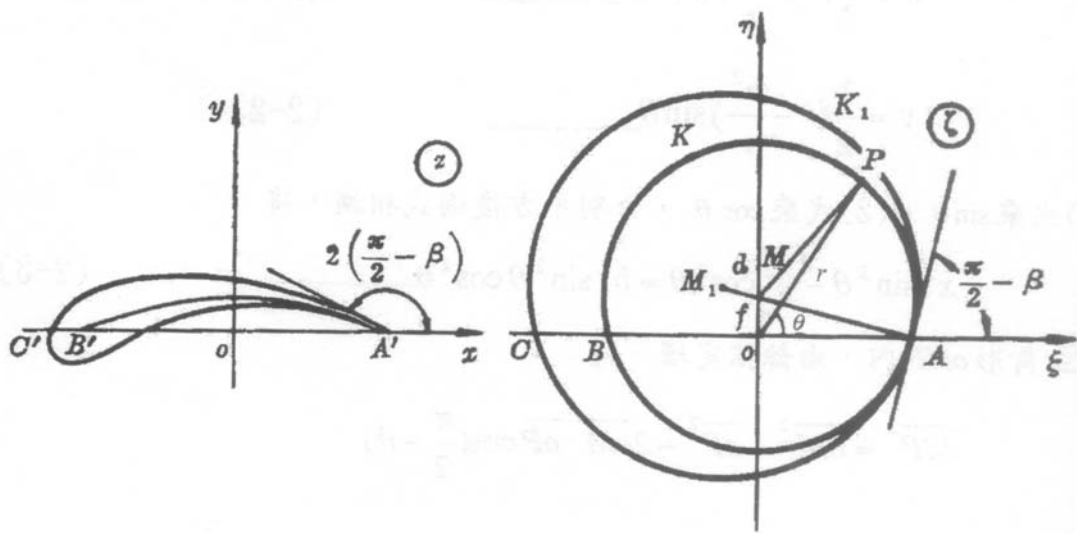


圖2-6 圓轉換成翼形的轉換圖

$$\overline{MP}^2 = \overline{OM}^2 + \overline{OP}^2 - 2\overline{OM} \cdot \overline{OP} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$\text{即 } f^2 + b^2 = f^2 + r^2 - 2fr \sin \theta \quad \rightarrow \quad 2f \sin \theta = r - \frac{b^2}{r} \quad (2.4)$$

將(2.4)式代入(2.2)式中可得

$$\sin^2 \theta = r - \frac{y}{r} \quad (2.5)$$

之後將(2.5)式代入至(2.3)中，經過整理之後可以得到 z 平面上對應的曲線方程

$$x^2 + \left[ y + \frac{1}{2} \left( \frac{b^2}{f} - f \right) \right]^2 = b^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{b^2}{f} - f \right)^2 \quad (2.6)$$

而此翼形的弦長、彎度及厚度分別和參數 b、f 及 d 有關。其餘更詳細過程或其他轉換可參見[15]



## 2.3 分析假設及統御方程式

本文選擇 K-ε 紊流模式模擬流場，為簡化數值分析，流場做以下假設。

1. 雖本文研究負壓區間，而空氣本身具有壓縮性，但在本物理模式下正負之壓差值不大，對於密度影響有限。因此假設流場為三維不可壓縮之流場及工作流體。
2. 工作流體為空氣，流體性質為牛頓流體(Newtonian fluid)，密度因不可壓縮性而成定值，黏滯係數(Viscosity)為等方向性。
3. 忽略重力效應影響。
4. 不考慮溫度變化，亦不考慮因黏滯性生成熱量問題；所有壁面均為絕熱、不可滑移(No slip)條件。
5. 不考慮葉片、流場迴流及擾流此三者所造成之振動現象；所有固體物質均為剛體。
6. 污染物為不活潑氣體，即不會在彼此之間發生反應，亦不和工作流體發生

反應。

7. 假設多孔性介質之孔洞為圓形孔洞，其材料不會因流場流動發生變形
8. 多孔性介質不會和所通過的流體產生化學反應，亦不吸附污染物
9. 多孔性介質的滲透性為等方向性

統御方程式則有以下方程式，分別為連續方程式、動量方程式、紊流動能方程式、紊流能量消耗方程式、濃度擴散方程式。以下分別列出：

#### 連續方程式

$$\rho \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.7)$$

#### 動量方程式

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2.8)$$

$$\text{式(2.8)中之 } \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \quad (2.9)$$

$$\text{式(2.9)中之 } s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.10)$$

式(2.7)及式(2.8)，其中：

$t$ 為時間， $x_j$ 為卡氏座標( $j=1,2,3$ )<sup>a</sup>， $u_i$ 為流體在 $x_i$ 方向的絕對速度， $\tilde{u}_j$ 為流體和座標系統的相對速度， $p$ 為全壓值， $\rho$ 為工作流體之密度， $s_i$ 為動量來源(momentum source)。

#### 紊流動能方程式

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \tilde{u}_j k - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \mu_t P - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.11)$$

<sup>a</sup> 舉例說明： $\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$

式(2.11)其中:

$$P \equiv 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

$\sigma_k$  為經驗值。

紊流能量消耗方程式

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\rho \tilde{u}_j \varepsilon) - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[ \mu_t P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + c_{\varepsilon 3} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.13)$$

其中式(2.11)及式(2.13)之相關經驗值如下所示:

$c_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$
0.09	1	1.22	1.44	1.92	-0.33

濃度擴散方程式

$$\rho \frac{\partial C_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j C_m - F_{m,j}) = 0 \quad (2.14)$$

其中式(2.14):

$C_m = \frac{m_m}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$  代表某物質於混合成分的質量分率

$$F_{m,j} = \rho D_m \frac{\partial C_m}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' C_m'} \quad (2.15)$$

以及遵守  $\sum_m C_m = 1$ ，而  $C_m'$  代表紊流濃度變化量(concentration fluctuation)

多孔性介質內部方程式

$$\rho \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.16)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j u_i - \tau_{ij}) = \left( -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial p_p}{\partial x_i} \right) + s_i \quad (2.17)$$

$$\text{式(2.17)中的 } \tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \quad (2.18)$$



$$\text{式(2.18)中的 } s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式(2.16)及式(2.17)中：

$t$ 為時間， $x_i$ 為卡氏座標( $j=1,2,3$ )， $u_i$ 為流體在 $x_i$ 方向的絕對速度， $\tilde{u}_j$ 為流體和座標系統的相對速度， $p$ 為全壓值， $\rho$ 為工作流體之密度， $s_i$ 為動量來源(momentum source)。

在多孔性介質區域內，因多孔性介質具有阻礙性的緣故，假設局部壓力與阻力達成平衡，則可得到下式，即所謂達西定律(Darcy law)。

其中式(2.17)中：

$$-k_i u_i = \frac{\partial p_p}{\partial x_i} \quad (2.19)$$

式(2.19)其中

$\frac{\partial p_p}{\partial x_i}$  為流體流動方向的壓力梯度

$k_i$  為於流動方向的滲透度(permeability)

但於流體速度較大時，在多孔性介質內孔隙間流體混合所造成的慣性阻力與摩擦引發的表面阻力具有同等地位，因此需考慮慣性項的影響，故達西定律中的  $k$  需修改為：

$$k_i = \alpha_i |\bar{v}| + \beta_i$$

$|\bar{v}|$  為表面速度值， $\alpha$ 、 $\beta$  為經驗式，且  $\alpha$  與慣性有關， $\beta$  則與黏性有關。而此兩者則為孔隙率、黏滯性、密度、顆粒粒徑大小.. 等等的函數。但一般較為常採用的則為 Ergun[16]所提出的方程式。

$$\frac{dp}{L_p} = \frac{150\mu_f(1-\varepsilon)^2 u}{\varepsilon^3 d_p^2} - \frac{1.75\rho_f(1-\varepsilon)u^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.20)$$

式(2.20)其中

$$d_p = 4 \times 10^{-4} \text{ 為多孔性介質之平均粒徑 [m]}$$

$L_p$  為門縫或洩漏口之深度 [m]

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} = \frac{\text{空隙體積}}{\text{總介質體積}} \quad \text{為孔隙率}$$

而本文所研究的多孔性材質的係數如表 2-1 所示

## 2.4 邊界條件

本文流場主要是由風扇葉片的旋轉產生壓力差，而將內部流體排出及部分由門縫外之流體吸入，經由風扇吹出。因此本文於數值計算中，在門縫及風管出口處外，建立一個開放空間，並將此空間設為大氣壓力作為壓力邊界條件。此外各固體邊界則因不可滑移假設條件而設定速度為零。風扇葉片及旋轉軸設定為固定轉速。如洩漏口遇上送風條件計算時，則設定為一入口流條件。以下敘述主要五個邊界條件，分別是入口與出口壓力條件、給定值之入口流條件、固體邊界、葉片與旋轉軸、濃度發生源。

### 1. 入口與出口壓力邊界：

本文中入口與出口之壓力邊界條件為在管道出口與門縫(如為第二研究則為走廊延伸空間面，如圖 2-4 所示)，建立一開放空間，設定壓力為大氣壓力(以此當為基準值=0 [Pa])。

$$p=0, \quad \frac{\partial k}{\partial n}=0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial n}=0$$

### 2. 給定值之入口流條件(ex.洩漏口送風)：

$u$  或  $v$  或  $w$  在設定邊界處，因座標軸方向而給一定值。

$$u=2.5 \text{ m/s}, \quad v=w=0$$

### 3. 固體邊界：

一般而言固體邊界適用於無法移動的邊界設定，如天花板、牆面、地板、阻礙物的接觸面，均可以使用此設定。

$$u=0, \quad v=0, \quad w=0 \quad [\text{m/s}]$$

$k$  與  $\varepsilon$  則採用 near-wall model 處理

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & , y^+ \leq y_m^+ \\ \frac{1}{k} \ln(Ey^+) & , y^+ \geq y_m^+ \end{cases} \quad (2.21)$$

其中式(2.21):

$$u^+ = \frac{u - u_m}{u_t}$$

$u$  : 流體切線速度

$u_w$  : 壁面速度

$$u_t = \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$\tau_w$  : 壁面剪應力

$$y^+ = \frac{\rho c^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}} y}{\mu}$$

$k$  : 為經驗係數, 0.42

$E$  : 為經驗係數, 9.0

而  $y_m^+$  滿足右列方程式

$$y_m^+ - \frac{1}{k} \ln(Ey_m^+) = 0 \quad (2.22)$$

#### 4. 葉片與旋轉軸 :

$$\omega = 900 \text{ rpm}$$

風機的選用依照葉片尺寸與估算排風量, 則應選用三級馬達, 亦指角速度為

900rpm, 其角速度方向遵守右手定則方向,  $k$  與  $\varepsilon$  則同以上 3., 採用 near-wall model 處理

#### 5. 濃度發生源 :

$$C_{SF_6} \Big|_{wall} = 1$$

假設人員為面向滑移門、面朝天花板方向而產生有害氣體。為了簡化污染範圍, 設定前三分之一的病床面(僅正面床面, 不含床沿及底面), 為固定濃度發生源。

一般氣體暴露濃度整理為表 2-2。而本文選用  $SF_6$  為有害氣體, 其各項性質整理如表 2-3 所示。本數值計算的工作流體為空氣, 而其性質性質如表 2-4 所示。

表2-1 多孔性材質相關係數表

使用類別	係數	對應值
門縫、洩漏口的海綿材質	$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$	112.025
	$\beta_i, \beta_j, \beta_k$	7.2116
	$\varepsilon_p$	0.98
多孔性過濾材	$\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k$	1287.65
	$\beta_i, \beta_j, \beta_k$	621.692
	$\varepsilon_p$	0.85

表2-2 一般常用追蹤氣體暴露危險濃度

氣體種類	危險濃度 (體積濃度)	分子量
CO <sub>2</sub>	5000ppm	44
N <sub>2</sub> O	25ppm	44
SF <sub>6</sub>	1000ppm	146.057

表2-3 SF<sub>6</sub> 之相關性質設定<sup>b</sup>

係數	對應值	單位
分子量(molecular weight)	146.057	Kg/kmol
密度(Density)	6.0414	Kg/m <sup>3</sup>
比熱(Specific heat)	663.87	J/kgK
分子黏滯係數(Molecular Viscosity)	1.543*10 <sup>-5</sup>	Kg/ms
熱傳導率(conductivity)	0.012806	W/mK
生成熱(Heat of Formation)	-8.356*10 <sup>6</sup>	J/kg
生成溫度(Temp of Formation)	298.15	K
相對於空氣之擴散係數(Diffusivity)	3.004*10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup> /s
Schmidt number	0.9	

表2-4 工作流體(空氣, Air) 相關性質表

係數	對應值	單位
密度(Density)	1.205	Kg/m <sup>3</sup>
分子黏滯係數(Molecular Viscosity)	1.81*10 <sup>-5</sup>	Kg/ms

<sup>b</sup> 因不考慮溫度效應，所以有些係數並未實際使用

## 2.5 計算條件

本文主要研究分為兩部分。第一為利用數值計算，研究強制排氣過程中整個空間內的流場現象，並了解迴流及毒物累積情形。以及第二為研究負壓空間於流場穩定後，在一個暫態開關門過程中，整體流場因開關門的動作而造成流場改變的情形。以下考慮此兩個部分。

而為了適切的模擬起見，第一研究之中在風扇機組前端之風管中(靠近房側部分)分別分析有無多孔性過濾材對於負壓區間的影響，以及分析對於不同邊界條件設定於洩漏口及門縫影響下所得到的情形。至於第一研究之中，房門均為關閉的狀態，因此在計算中可以不考慮門對於流場影響，僅考慮門縫、洩漏口之關係。

而第二研究部分為一暫態過程，計算條件部分則需先計算穩定狀態情形，在此計算情形下滑移門保持關閉狀態，室內僅由洩漏口及門縫供應外氣，如此計算至穩態結果收斂。隨後以此流場結果，計算一個 4 秒的滑移門由關閉至完全開啟過程中的流場及濃度場結果，用以了解此一暫態過程中負壓區間和緩衝室的流場暨濃度場之間關係。

為了更能配合計算邊界設立條件與 2.1 節所述之物理模式建立，整理表格如表 2-5 所示。

表2-5 本文研究之物理模式關係與邊界設定一覽表

研究部分	型別	過濾材 有無	滑移門狀態	邊界設定				說明流場現象 章節	數值比較 章節
				管道出口	門縫	洩漏口	床面		
第一研究部分	Case a1	Yes	關閉	壓力邊界	關閉	關閉	濃度發生源	4.1.1	4.3
	Case a2	Yes	關閉	壓力邊界	壓力邊界	關閉	濃度發生源	4.1.2	4.3
	Case a3	Yes	關閉	壓力邊界	壓力邊界	壓力邊界	濃度發生源	4.1.3	4.3
	Case a4	Yes	關閉	壓力邊界	壓力邊界	入口流	濃度發生源	4.1.3	4.3
	Case b1	No	關閉	壓力邊界	關閉	關閉	濃度發生源	4.2.1	4.3
	Case b2	No	關閉	壓力邊界	壓力邊界	關閉	濃度發生源	4.2.2	4.3
	Case b3	No	關閉	壓力邊界	壓力邊界	壓力邊界	濃度發生源	4.2.3	4.3
	Case b4	No	關閉	壓力邊界	壓力邊界	入口流	濃度發生源	4.2.3	4.3
第二研究部分	Case c	Yes	滑移開啟 <sup>c</sup>	壓力邊界	與走廊網格連接	與走廊網格連接	濃度發生源	4.4	4.4

<sup>c</sup> 滑移開啟過程是由 4 秒內房門關閉到完全開放的過程

## 第三章 數值方法

### 3.1 數值離散分析與計算收斂條件

本文中利用數值方法，求解風扇機械排氣的流場以及研究負壓區間的濃度場暨流場問題。此數值方法乃是應用流體力學輔助軟體 STAR-CD v3.10 計算。而其利用有限體積法(finite volume)迭代解 Navier-Stokes equations、以及其餘相關的方程式(詳見 2.3 節)。

統御方程式乃利用 SIMPLE 法[17]解三維流場統御方程式。各物理量變數定義於每個控制容積的中央，離散方程式則是將統御方程式對每一個控制容積做積分而求得。

統御方程式可以表示成下列通式：

$$\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_r \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) = s_\phi \quad (3.1)$$

其中  $\bar{u}_r = \bar{u} - \bar{u}_c$ ，也就是相對於座標軸速度。 $\Gamma_\phi$  為擴散係數，如計算速度場可

為黏滯係數， $s_\phi$  為 source

之後將式(3.1)改寫：

$$\frac{d}{dt} \int_v \rho \phi dV + \int_s (\rho \bar{u}_r \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) \cdot d\bar{S} = \int_v s_\phi dV \quad (3.2)$$

而之後進一步改寫成下面式子並對照相鄰網格之離散面如圖 3-1 所示

$$\frac{d}{dt} \int_{v_p} \rho \phi dV + \sum_j \int_{s_j} (\rho \bar{u}_r \phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) \cdot d\bar{S} = \int_v s_\phi dV \quad (3.3)$$

Term1                      Term2                      Term3

其中上面的 Term1、Term2、Term3 各自代表式(3.3)中的等號左邊第一項、第二項及等號右邊第一項，以下分別簡稱為  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$

$$T_1 \approx \frac{(\rho \phi V)_p^n - (\rho \phi V)_p^o}{\Delta t} \quad (3.4)$$



其中(3.4)的下標  $p$  為  $p$  點。上標  $n$  代表新值(new)， $o$  代表舊值(old)。

式(3.3)中的  $T_2$  可分作對流項及擴散項(convection & diffusion term)

$$T_2 = \sum_j (\rho \bar{u}_r \phi \cdot \bar{S}) - \sum_j (\Gamma_\phi \bar{\nabla} \phi \cdot \bar{S}) = \sum_j C_j - \sum_j D_j \quad (3.5)$$

其中對流項  $C_j$  的計算處理採用上風法(Upwind Scheme)，如圖 3-2 所示

$$C_j = F_j \cdot \begin{cases} \phi_p & , F_j \geq 0 \\ \phi_{N+} & , F_j \leq 0 \end{cases} \quad \text{其中 } F_j = (\rho \bar{u}_r \cdot \bar{S})_j \quad (3.6)$$

而擴散項  $D_j$  可展開為下列式子

$$D_j = \Gamma_\phi \left\{ f_j^l (\phi_N - \phi_p) + [\bar{\nabla} \phi \cdot \bar{S} - f_j^l \bar{\nabla} \phi \cdot \bar{d}_{PN}]_j \right\} \quad (3.7)$$

式(3.3)中的  $T_3$  可寫成下列式子

$$T_3 = s_1 - s_2 \phi_p \quad (3.8)$$

而之後將(3.4)~(3.8)的各式相關代入(3.3)，可得到下列整理。

$$\frac{(\rho V)^n - (\rho V)^o}{\Delta t} + \sum F_j = 0$$

更進一步的可以表示成

$$A_p \phi_p^n = \sum_m A_m \phi_m^n + s_1 + B_p \phi_p^o \quad (3.9)$$

$$A_m \text{ 可以是擴散或是對流項的影響， } B_p = \frac{(\rho V)^o}{\Delta t}$$

至於計算之收斂條件則為以每一次迭代計算後之所有控制容積內的殘值改變率小於給定的收斂值作為收斂條件。

$$C_\phi^k = \sum \left( |B_p^n \phi_p^n| - |B_p^o \phi_p^o| \right) < \text{收斂值} \quad (3.10)$$

而本文給定的收斂值為千分之一。

如遇上解暫態流場(第二研究部分)，則式(3.10)則改為每一個 time step 迭代至小於收斂值。

計算流程如圖 3-3 所示。

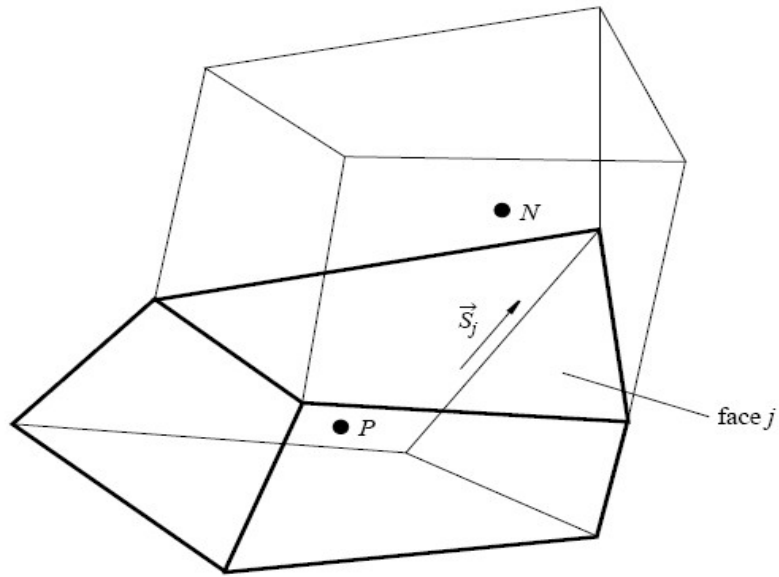


圖3-1 相鄰網格中心點及離散面相關位置示意圖[18]

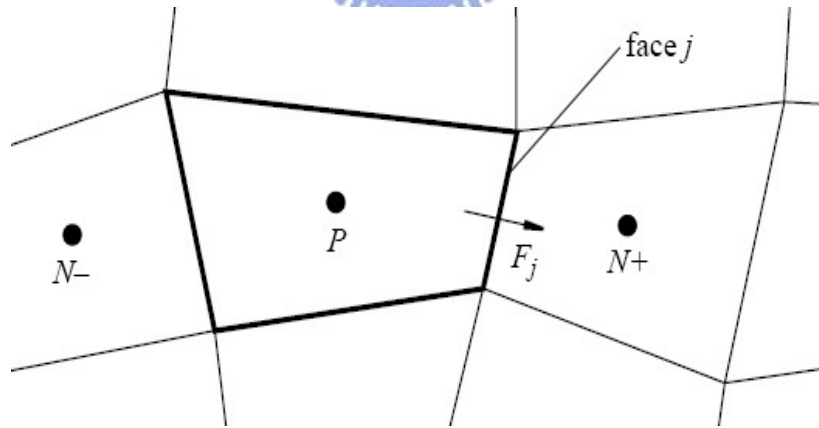


圖3-2 對流通量(上風法)示意圖[18]

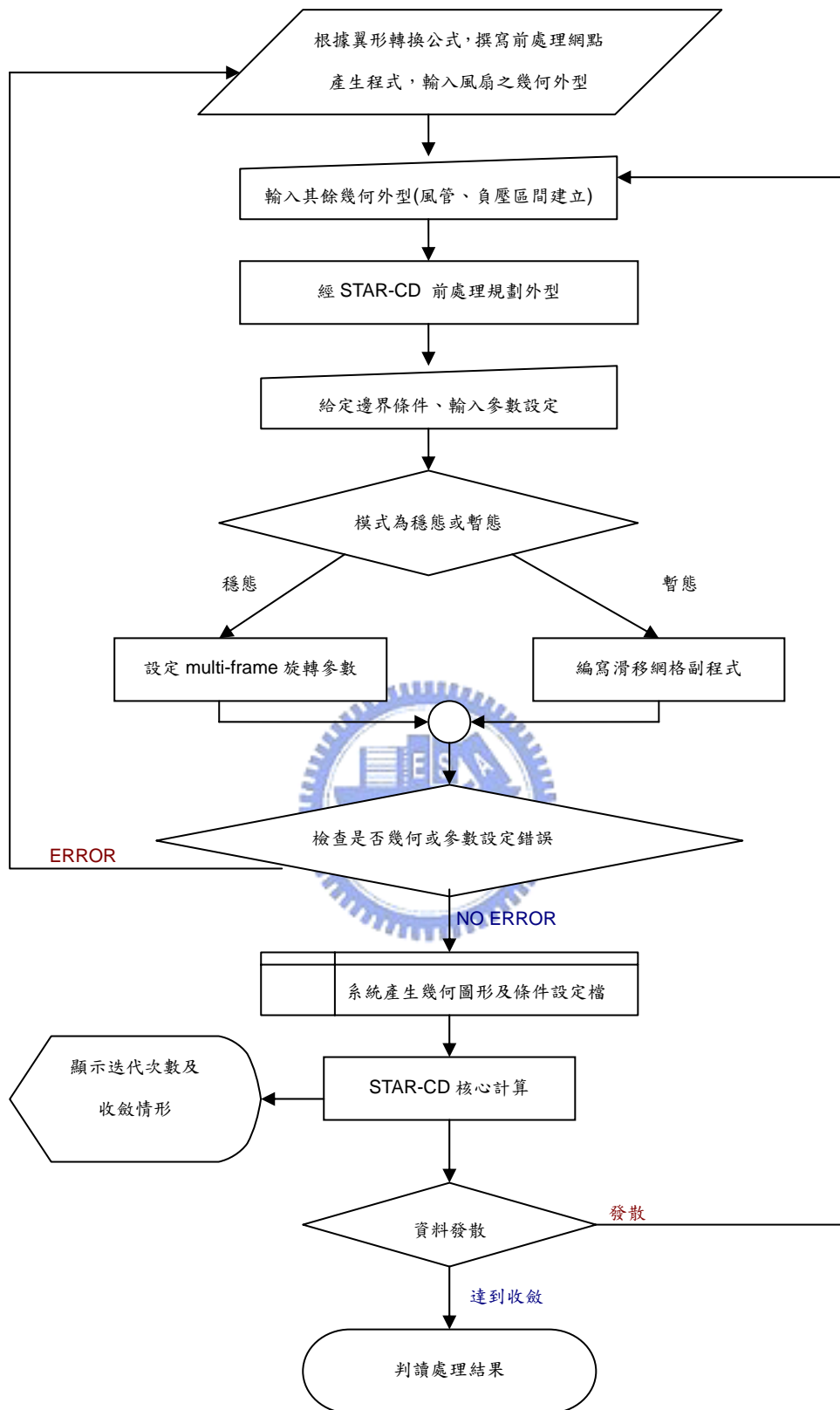


圖3-3 數值計算流程圖

### 3.2 網格建立與網格測試

本文於求解流場的過程中，以數值方法求解問題時，因離散方程式後必緊接著建立流場計算網格，以其設定邊界作為計算的迭代。而網格品質的好壞卻可直接影響未來於電腦計算速度之快慢及流場收斂的趨向及穩定性。更甚者其流場結果之正確性與否也和網格建立有極大的影響。

吾人依照實際物理模型設計尺寸建立離散網格及配合 STAR-CD 之提供的網格容量限制及形狀。而 STAR-CD 可用的網格形狀及建立方式則相當有彈性，可採用的方式如 Multi-block、Unstructured、body-fitted，及引入其他 CAD 軟體建構模型。以及建立不規則網格形狀如三角形、四面體、六面體而相互接合，如圖 3-4 所示。而本文所採用的方式大多為 Multi-block 建構。

至於本文數值計算於風扇機組流場部分，因為風扇葉片之附近區域的幾何形狀較為複雜，非單一區塊所能建構，因此採用非規則線段之雲線(spline)建立複合區塊。如此才能滿足平滑、正交性佳的計算環境條件。圖 3-5 則為數值計算於風扇周圍網格建立圖。此外，為觀察研究於各流體流入口之流場現象及靠近床沿的風管入口部分之毒物濃度累積情形，特於此各處採用較為密集的網格，以增加觀察流場的準確性。經過計算不同網格數目的網格測試，結果如圖 3-6 所示。取樣位置是於離抽氣機組排氣口側 2.01 公尺處網格，取半徑為橫座標繪圖。結果可知當網格數於 442571 格時，速度分佈無明顯變化，因此採取此網格數。至於第二研究部分，僅網格增加前面走廊部分，其餘大部分網格密度和第一研究網格建立相同，因此延續採用之，其網格數為 673395 格。

### 3.3 穩態 multi-frame 轉動及暫態滑移網格(sliding mesh)

本文於計算葉片穩態旋轉部分時，使用 STAR-CD 軟體對於穩態旋轉物件所提供的功能，名為” Rotating Reference Frames ”。此功能可以用來計算模型沿著特定軸心以固定角速度旋轉的問題，如渦輪機、風扇葉片等。此功能為修正式(2.8)中的  $s_i$ ，自動

計算各來源項的動量源。其旋轉角速度符合右手定則並維持一等角速度旋轉。

至於第二部分研究為暫態研究，滑移門需要沿特定軸(在此為 負  $x$  軸)做等速度移動。至於處理方式則使用滑移網格進行。如圖 3-7 所示。

由圖 3-7 可知，靠近交界面上的網點(vertex number)分別為 1-6 點及 11-16 點。而較在網格中心的編號則為上下交界面定義的上下交界面編號(boundary number)，其分別為 1-5 及 6-10。在滑移過程中，則以  $\Delta t$  時間乘上對應的角速度或移動速度(視移動為等角速度移動或是平移移動)，則此值為位移距離。首先移動下面從屬網格並之後改變各網點位置連接關係，之後再移動交界面位置，再之後再次移動下面從屬網格以恢復原本因移動而扭曲的網格，並更新上下邊界的連接關係，如原本(1)部分 1 和 6 之邊界相接，之後至(4)則改為 2 和 6 相接臨。網點亦是如此。而在每一步進時均計算整個區域內流場關係，以達到暫態轉動的效果。

而需注意的是，此暫態滑移網格計算方式於每一次時間步進時， $\Delta t$  不可過大，否則位移距離會過大(不可超過一個網格距離)，否則造成網格修正的困難度及扭曲過於嚴重，使得流場發散而無法收斂。



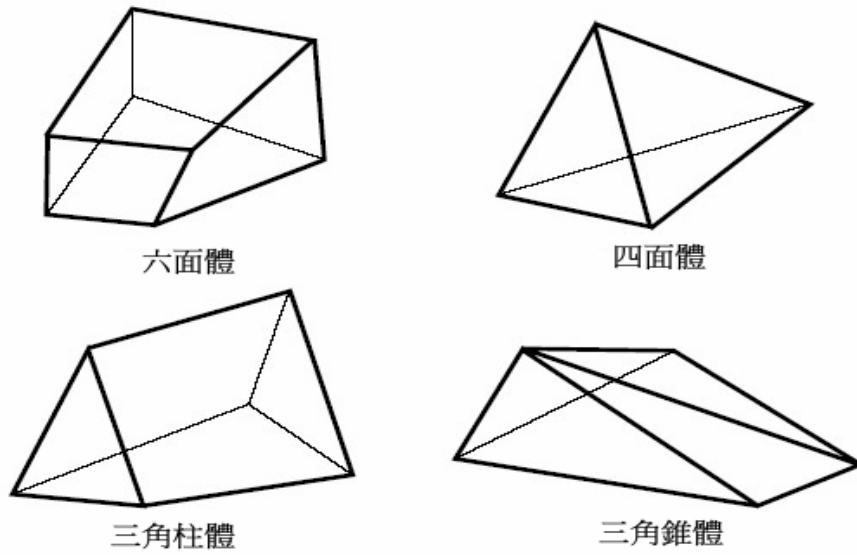


圖3-4 不規則網格幾何模型舉例示意圖[19]

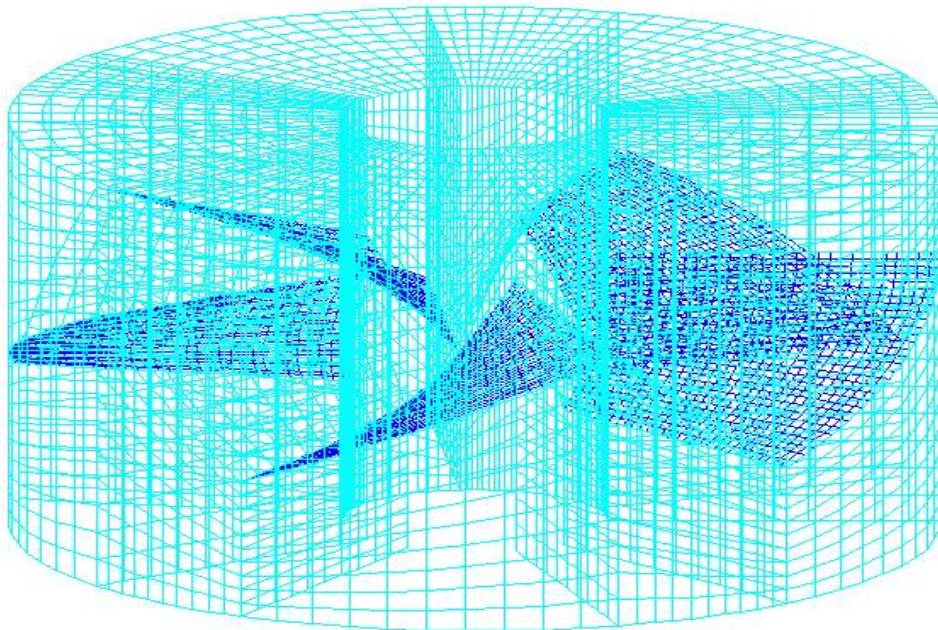


圖3-5 數值計算風扇周圍網格建立設計圖

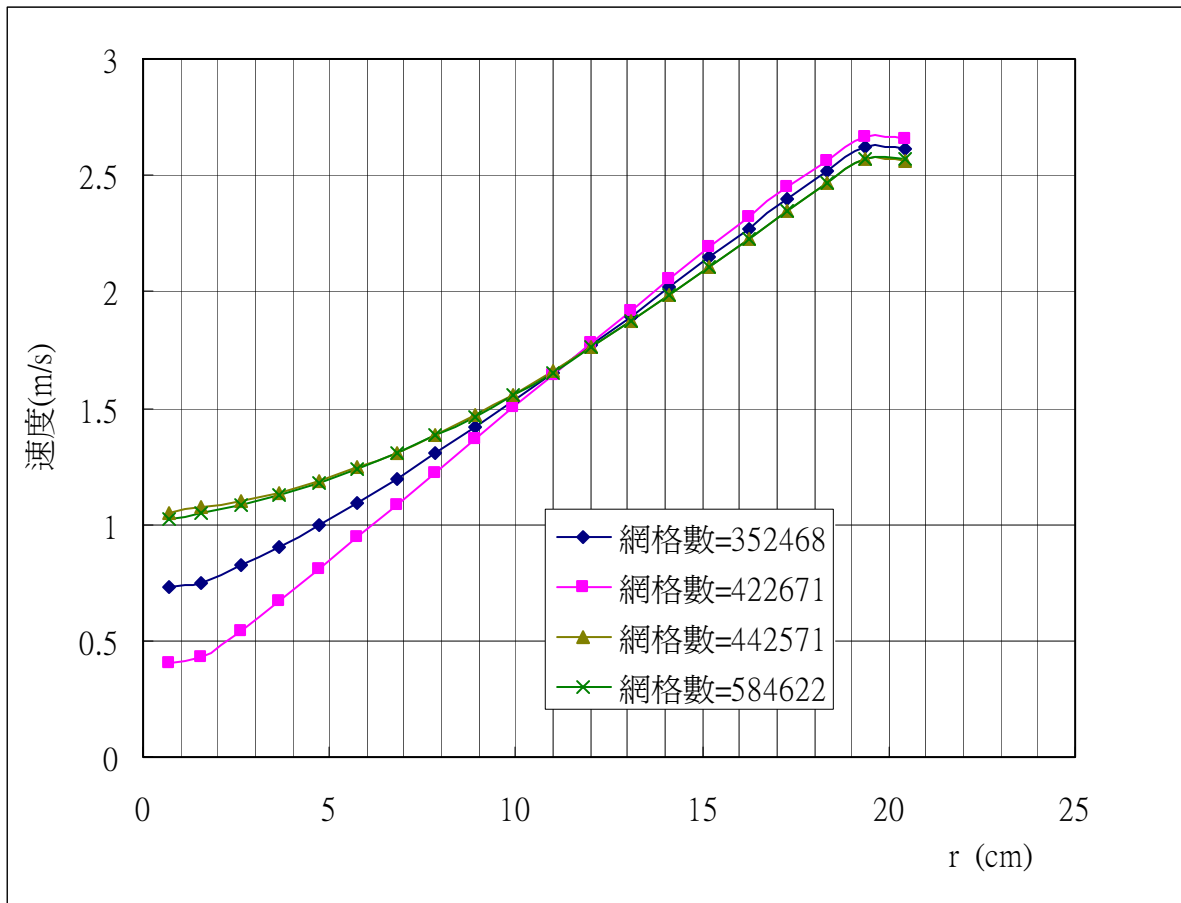


圖3-6 網格測試比較圖(第一研究部分)

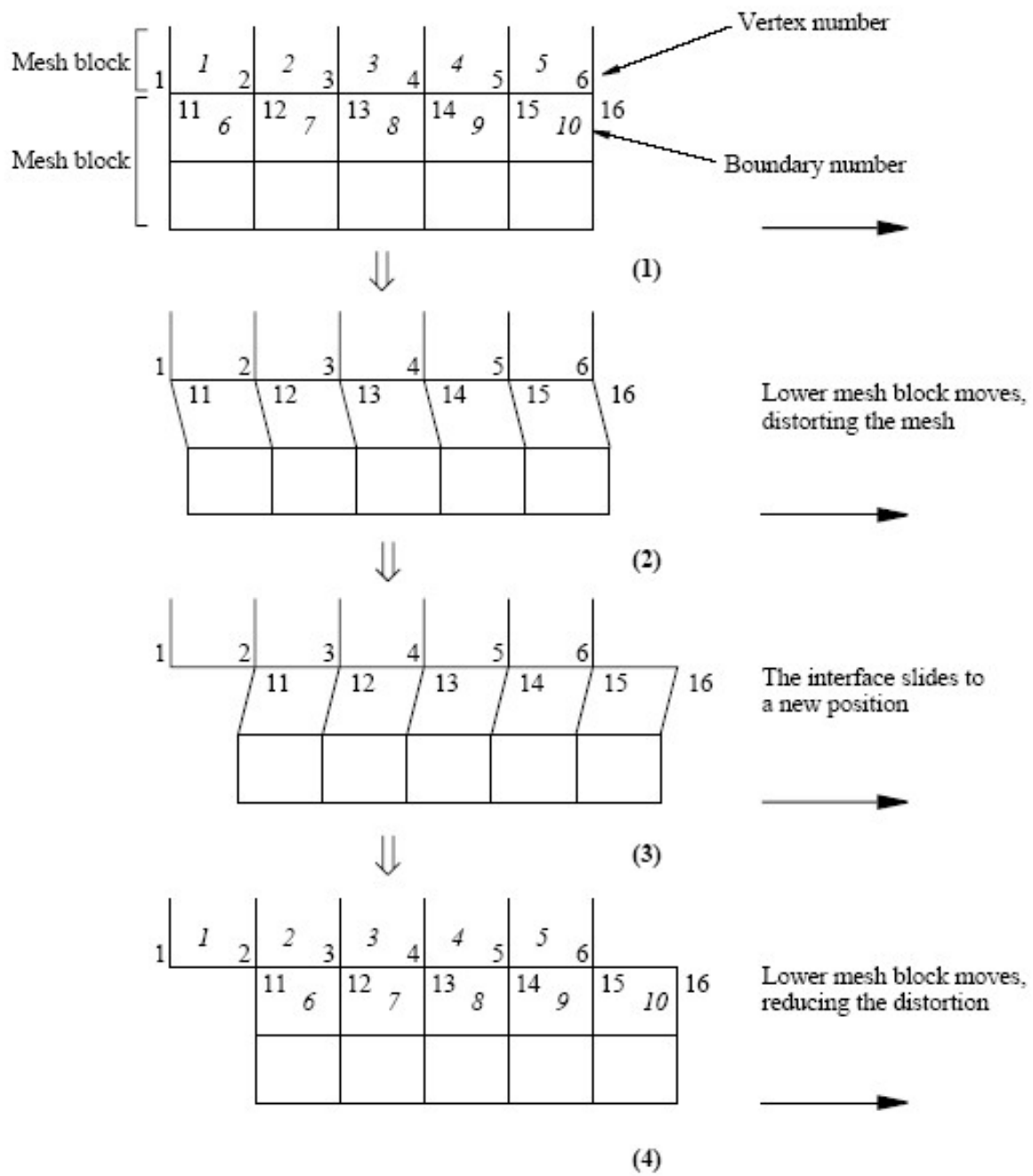


圖3-7 滑移網格進行方式說明示意圖[18]



## 第四章 結果與討論

本文所模擬的風機與其他的物理尺寸均按照 2.1 節所述之尺寸建立而成。然而本文所設計之風扇翼形乃是使用轉換公式而來，非一般工業界或坊間風扇之手繪開模製造的翼形。因此計算葉片幾何結果上在某些細微部分仍有不同。但大體而言外型十分近似抽氣用軸流式風機。

本文計算設計如 2.5 節所述，並依照表 2-5 設定各邊界條件。而又由於所計算出的結果是屬於三維流場，因此在顯示結果部分時，亦以三維方式呈現。只是礙於三維流場於 2D 的圖表上呈現其結果，是一件十分困難的事，雖能表現出表面的數值或向量，但其內部抑或背面之顯示卻是無法表現。因此欲顯現此區域的流場需要做截面切割的動作。本文因此選定三個較具代表性的截面，如圖 4-1 所示。而由圖可知，本文呈現結果截面部分，可分成截面 a 為穿過抽氣機的中心截面(面方向垂直床面)，而截面 b、截面 c 為平行截面 a 之上下各 1.25 公尺處(即各自位於房寬 1/4 處)。而以截面 a 來說，又因為其所橫跨的距離通過整個風管與房內，因此距離很大，如要顯示細微的部分流場則無法辦到。為方便顯示流場起見特別將截面 a 再細分為 I、II、III、IV 這四部分，如圖 4-2 所示，分別由外牆算起距離為 0~6 m、5.8~7 m、6.7~8.95 m、8.95~11 m，而選定的距離分別在物理意義上分別代表著區間範圍(房內)、房內接口與風機部分、風機與風管中段、風管後段與排風出口，因此分以上部分顯示結果。而後面小節所顯示的圖片均是以此方式顯示。而為了便於稱呼不同的邊界條件設定所呈現的結果類別，則以表 2-5 的型別稱呼之。

### 4.1 穩態計算風管含有濾網之負壓隔離區間結果

本節討論為第一研究部份前四個型別的結果，設定條件是穩態的抽氣過程。由於在邊界設定上的不同，因此出現不同的結果。因此為了詳細討論差異，則分述完全封閉的

區間(case a1)、門縫換氣區間(case a2)於兩小節討論。至於型別(case a3,a4)則因為結果有共通性而合併論述，以便比較相同與相異之處。

#### 4.1.1 含有濾網之風管的完全密閉區間流場結構(型別 case a1)

此小節為顯示室內完全封閉的情形，僅開啟遠處的風管出口之壓力邊界的情形。為了方便敘述起見，本小節(4.1.1 節)所敘述的結果均為型別 case a1，如無特別說明，本小節不再贅述。圖 4-3 為截面 a 之 part I 部分的速度圖，也就是房內中心截剖面的流場情形。由圖可知整體房內的流速緩慢近似停滯。靠近風管的房側有流體沿著風管迴流至房內，亦有流體流向風管(本圖現象較不明顯)，顯示房內達成穩態平衡的流場會在風管前端與房內靠近風管側部分造成迴流現象。

圖 4-4 為截面 a 之 part II 部分的速度圖，而為了說明特徵因此標註風機與濾網位置，而紅色框選處為放大顯示於圖 4-5 的部分。可知圖 4-4 於風機處可發現截剖上方部分葉片及截剖下方為葉片與葉片的空隙部分，藉此可觀察不同的現象。風機上方葉片背面的流體(遠離房內端)因受到葉片推擠而沿風管管壁流出，而其下方則因無葉片作用而流體因壓差作用下，由外流回至濾網前。在這樣的流場之下，流體則在風機與濾網中間部分的位置流進與流出，並且可由圖於前後風機中心處發現流體因為中間轉軸阻擋而產生停滯的現象。而圖 4-5 為圖 4-4 部分放大圖，可知迴流範圍更是擴及濾網部分，由風管兩側部分的流體透過濾網流進房內，而風管中心的流體則穿透過濾網流出房外。

圖 4-6、圖 4-7 為風機後方的風管部分，截剖面上方的流體由風機葉片推出後沿管壁流出並延續到管末。而風管中央部分的空氣則因風機作用力較小而受壓差作用影響，導致流向相反而流回風機。在如此作用的影響下，房內的污染無法真正有效的排除。而是持續在風管內迴流。圖 4-8 為最外側靠近出口邊界的網格速度圖(即為圖 4-7 最右側部分)，顯示在邊界附近亦有流進流出的現象，至於詳細的流率統計請參照 4.3 節。

至於區間內的壓力分佈圖如圖 4-9 所示，為截面 a 之 part I 部分的壓力圖。此截面部分顯示區間內的壓力為負壓情形，大約是-69Pa 左右(以外界大氣壓力基準值為 0 Pa)，整體雖然仍有差距，可是均差異在 1 Pa 之內。截面 b、c 亦同截面 a 的壓力分佈

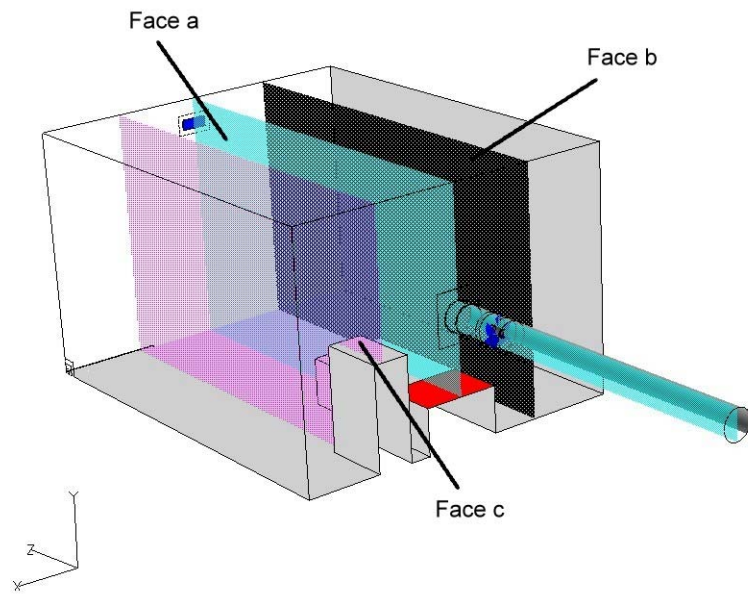


圖4-1 計算流場顯示之各截面示意圖

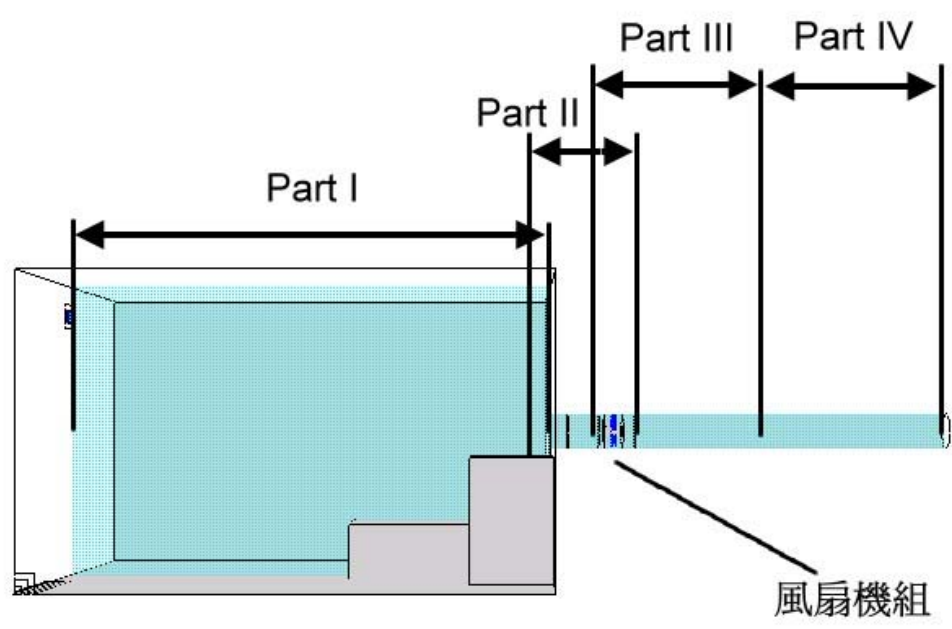


圖4-2 計算流場顯示於截面 a 時之細分部分示意圖

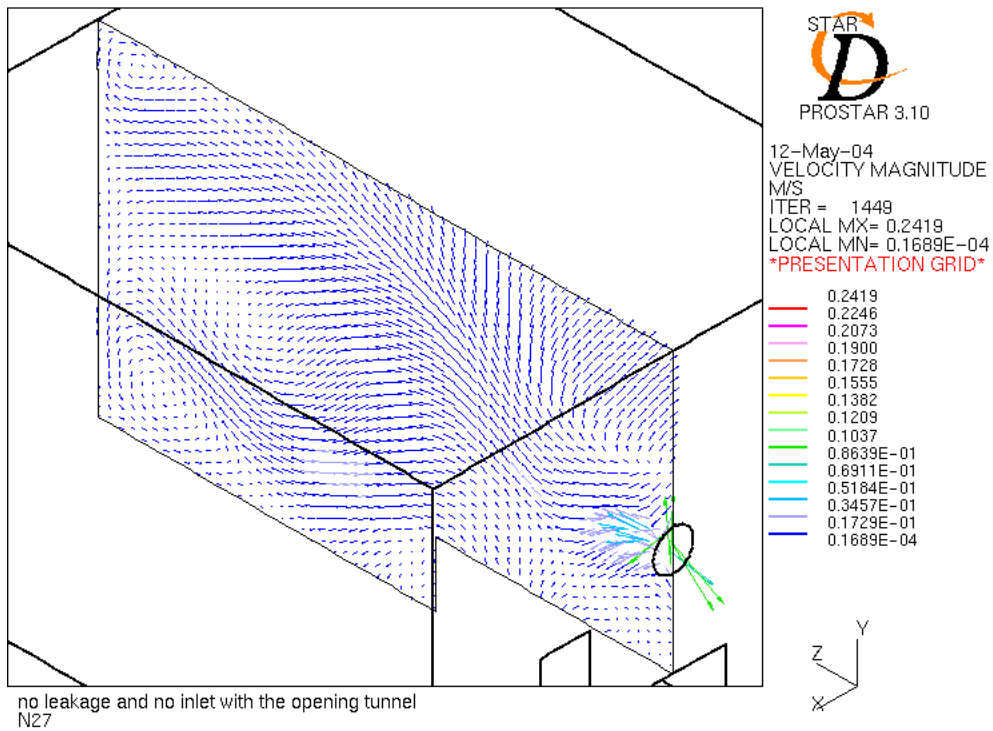


圖4-3 流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part I

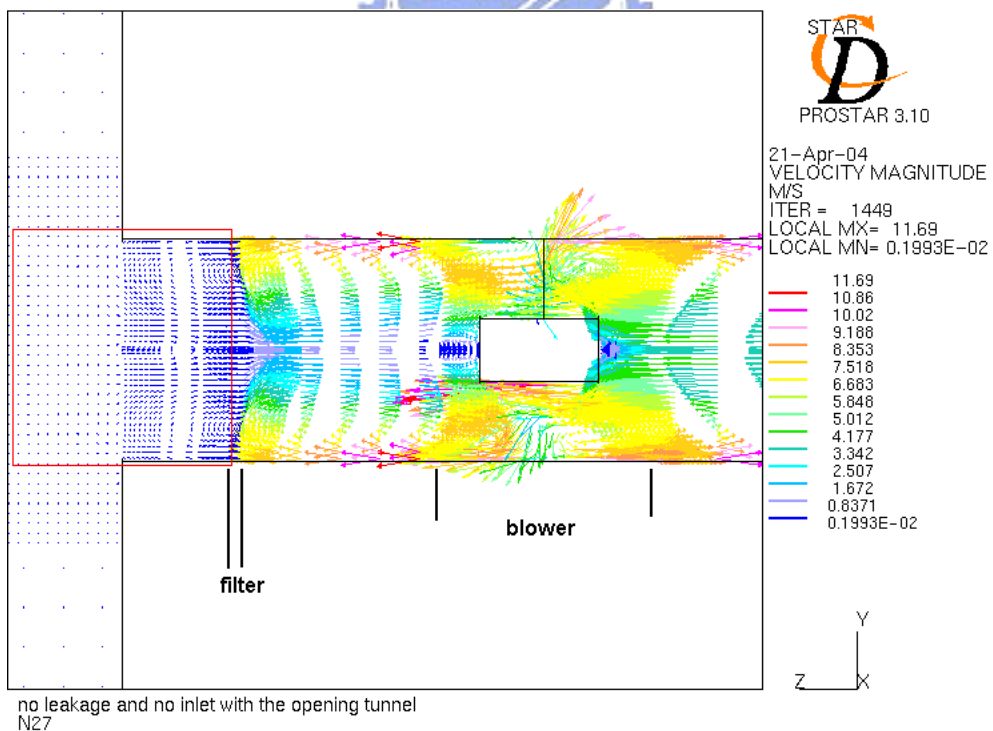


圖4-4 流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part II

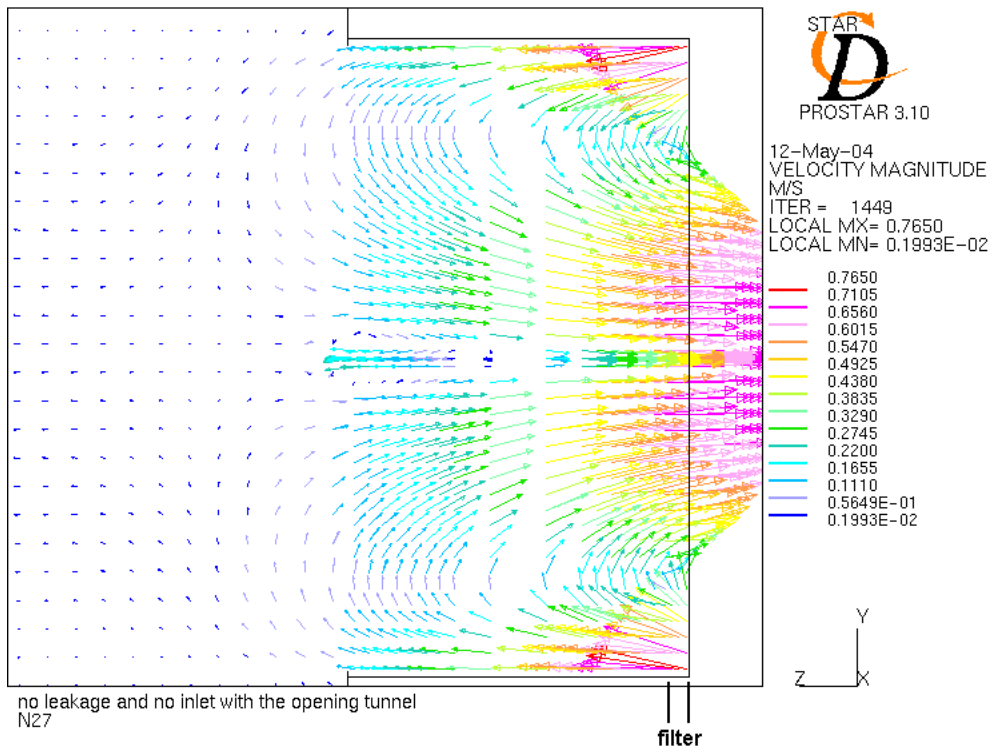


圖4-5 流場速度分佈圖，圖 4-4 局部區域放大圖(原紅色框選區域)，case a1，截面 a

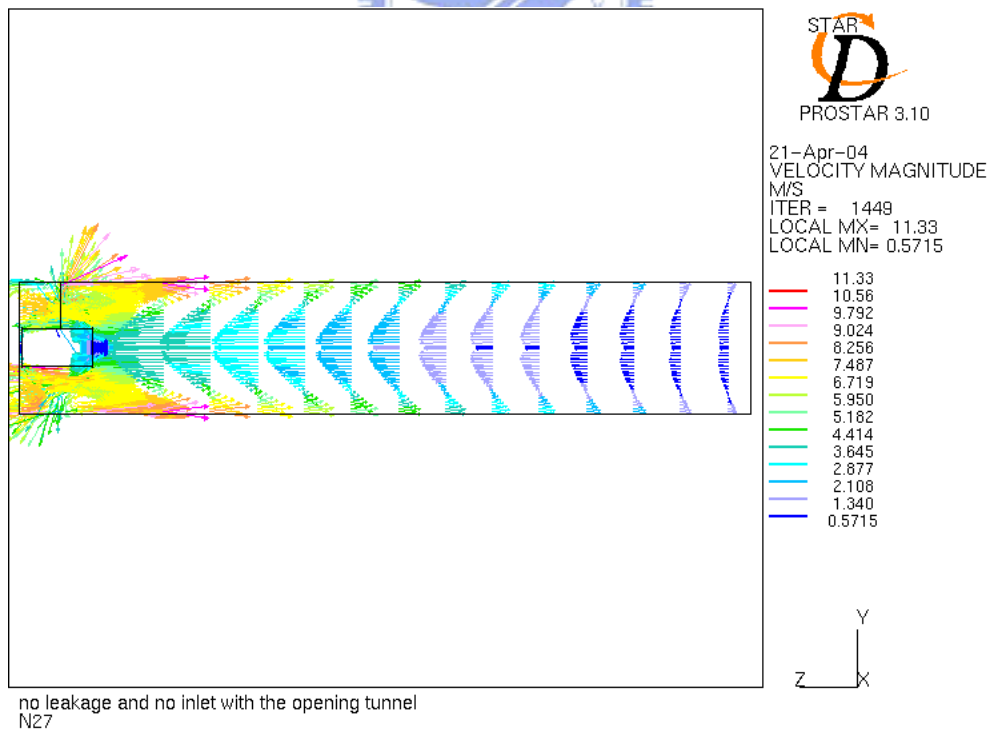


圖4-6 流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part III

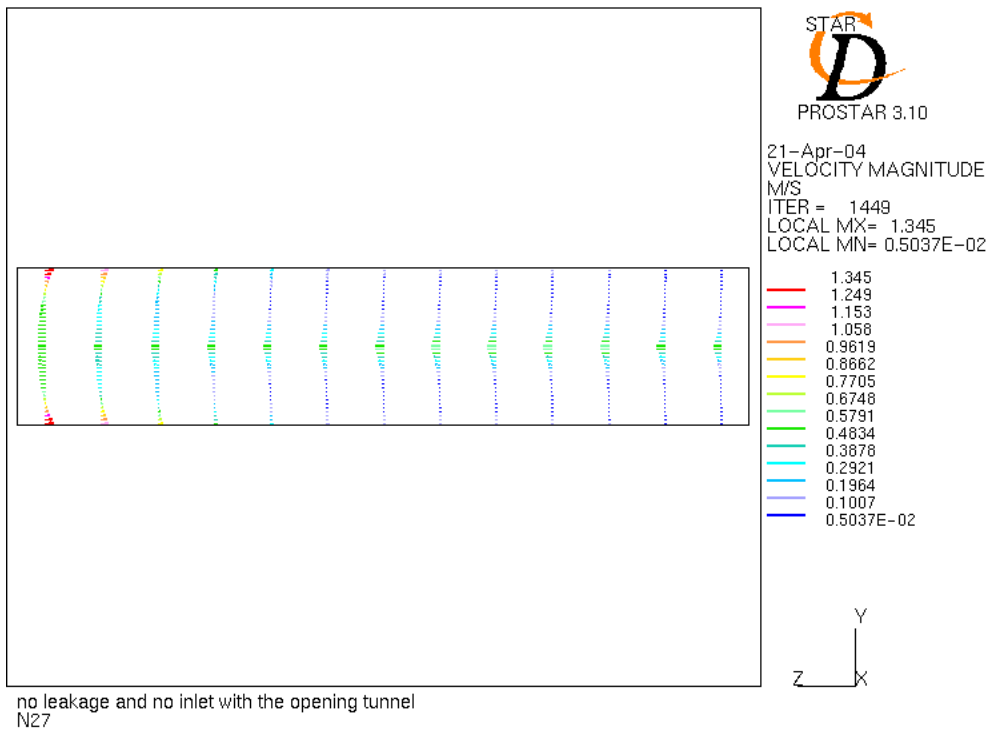


圖4-7 流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part IV

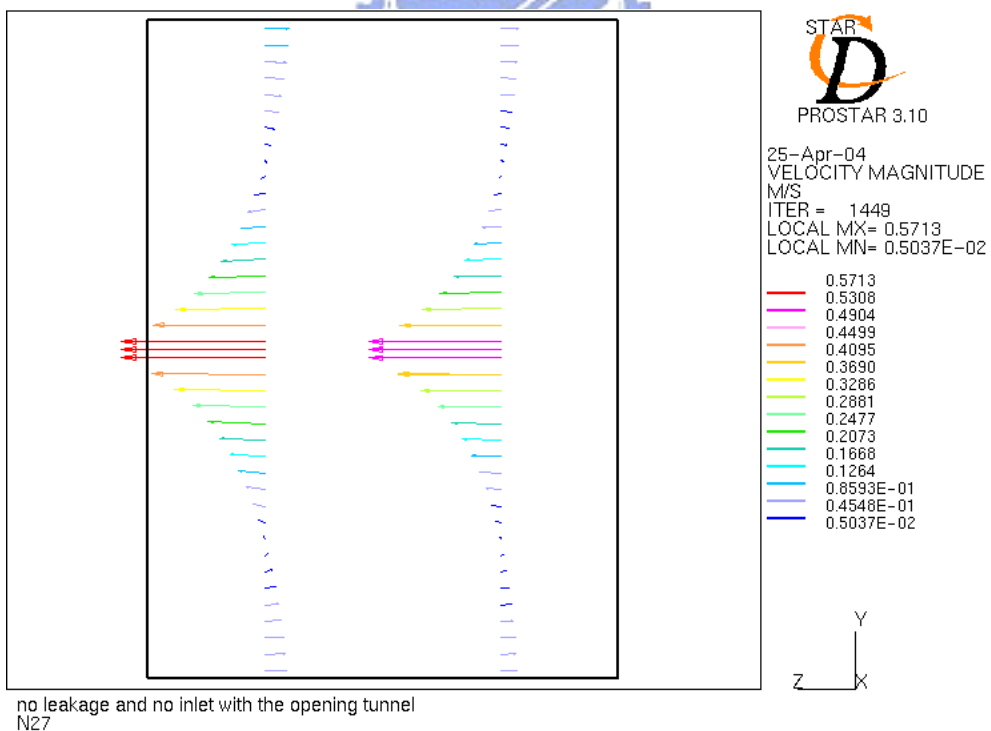


圖4-8 流場速度分佈圖，case a1，截面 a，part IV 最後出口部分

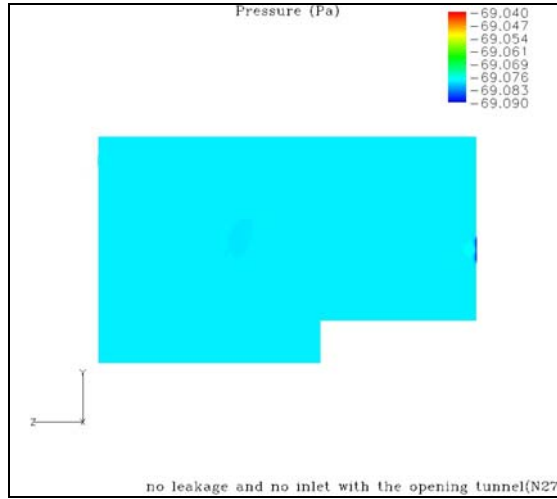


圖4-9 流場壓力分佈圖，case a1，截面 a，part I

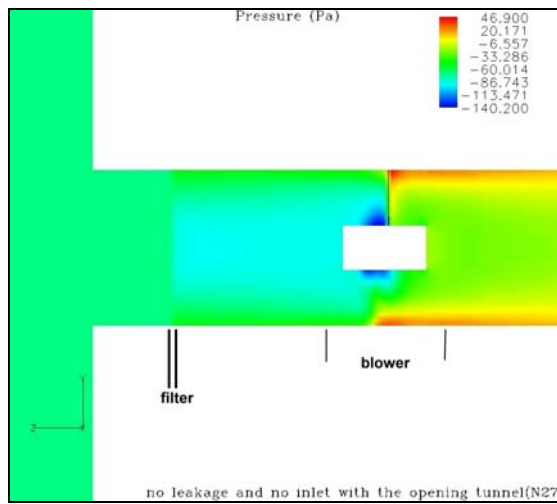


圖4-10 流場壓力分佈圖，case a1，截面 a，part II

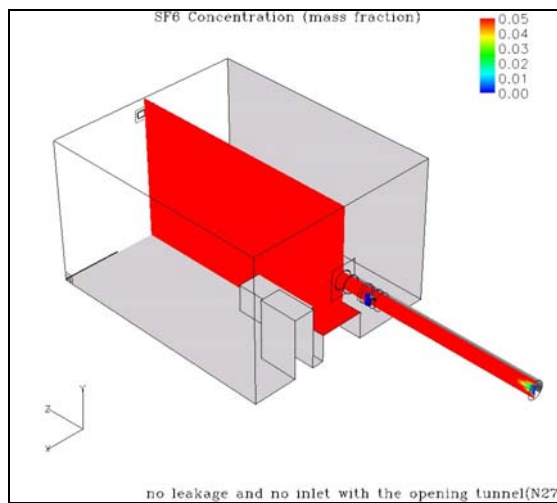


圖4-11 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a1，截面 a

亦是在大約-69 Pa 附近(未放置圖片)<sup>d</sup>，遠比標準負壓房-8Pa 而言的壓差多出許多。圖 4-10 則為風機附近的壓力圖，流場受到葉片轉動推擠作用下，葉片背面壓力最大而前面最小。此最低壓區延伸到濾網之前，但因為濾網為多孔性材質，流體不易通過，因而在此處損失部分的壓力降，反而使房內的壓力升高。

因此在這樣完全封閉的區間環境之下，無法有效的排除有害氣體，如圖 4-11 所示。以截面 a 為例，房內區域均超過 5% 的重量濃度(計算設定病床濃度源為 100%)，僅靠近出口處的有害氣體濃度略低。而截面 b、c 所得的結果也是如此，顯示房內污染嚴重。如以這樣的換氣封閉條件設計下，雖能達到極大的負壓效果，卻造成通風不良的情形，反而有害區間內工作人員或病患的安全。

#### 4.1.2 含濾網之風管利用門縫換氣的流場結構(型別 case a2)

此小節為顯示室內環境的換氣條件為門下縫隙所造成的開口，因為壓差的作用下而引入外界空氣的計算結果。

圖 4-12 為截面 a 之 part I 部分的速度圖，由於門縫壓差進氣的影響下，外界空氣沿地板流入區間內，大部分流體均是由此沿床面進入風管接口。一部分則延伸流向天花板，由於門縫設置位置因素而使之稍向負 X 軸方向流動。圖 4-13 為截面 c 的速度圖，在此更可直接看出進氣乃由門縫進入沿地板方向前進，並產生挾帶的現象。隨後因為阻礙物的影響下，使得流體受到阻礙而偏向，之後進入到風管。由此上二圖可知 case a2 造成了室內空氣有流進與流出的現象而不再單純的只有迴流現象如 case a1。圖 4-14 則為截面 a 之 part II 部分的速度圖，與圖 4-4(型別 case a1)的現象有類似之處，如產生迴流現象於風機與濾網附近，以及風機葉片背面於管壁側驅動流體至外界的現象。但較為不同之處則是濾網與房內接風管開口的流場部分，由於門縫開口的影響，使得流體可由門縫進入，因此得以使區間內的氣體順利流出，不再有於此處發生迴流的現象。以及在風機的前後停滯現象區域較少，使得流場較不易累積濃度。圖 4-15 為截面 a 之 part IV

<sup>d</sup> 由於房內屬於較為空曠的場所，壓力隨位置改變的情形由結果發現並不嚴重。在穩態情形下，截面 b 與 c 的壓力分佈也雷同於截面 a，而後於各型別也有類似現象，故省略圖片顯示之，之後不再多做說明。



部分的速度分佈圖，在此顯示雖然本型別為室內有開口的邊界條件設定，仍因壓差作用下發生管內迴流現象。但其情形比 case a1 小。至於靠近風管出口處可知均為向外流動的速度分佈，表示空氣的確由室內沿風管排出至外界大氣。

圖 4-16 為截面 c 的壓力分佈圖，由圖顯示設定門縫過後，外界流體平衡壓差作用由房外經門縫流入區間，導致房內壓力為-33.8Pa 較 case a1 房內的壓力-69Pa 為高，但是仍然維持負壓的環境。而最大的壓力位置則出現在入口與房間頂端的牆角處。其餘房內壓力大小則幾乎和截面 c 相同。圖 4-17 為截面 a 之 part II 部分的壓力分佈圖，由圖可顯示因為較低範圍的迴流區影響下在風機與濾網間的低壓區範圍較圖 4-10(型別 case a1)廣而平均，因此可充分抽換室內的氣體，但亦可由此圖發現濾網仍造成很大的壓損(約 33Pa)。圖 4-18 為 part IV 部分的壓力圖，顯示在末段的管內壓力差距並不會很大，因此流場在此處較為和緩，但仍有造成局部迴流的影響。

由於有別於完全封閉的區間，含有門縫進氣的模式下之室內有害氣體得以排除，因此可大為減低累積量。圖 4-19 為截面 a 的濃度分佈圖，由於雖設定床面 SF<sub>6</sub> 為濃度 100% 的邊界，但是結果除了少許網格部分外，區間內大部分濃度不高。因此為了清楚顯示污染差異，則色標範圍因此定義在 5%-0%，如此則能一目了然地看出差異。因此由圖 4-19 可知因為受到流場作用之下，由於床面附近屬於高濃度區域且未在主流道區域上，因此在床頭角落區域造成濃度累積。圖 4-20 則為型別 case a2 的等濃度面圖，繪製方式則是以某一濃度為等濃度劑量，尋找網格中幾乎相等的位置標記，並最後相接成一個面，並以顏色區分之。等濃度面的數值分別為紅色 5%、黃色 4%、淺藍色 1.2%、深藍色 0.12%，之後的等濃度面均以此數值繪製。由圖可知濃度範圍乃是以床面濃度發生源最為嚴重，而後如同一層一層的殼狀向外遞減，因此可知絕大部分室內濃度的範圍則是在 0 至 1% 附近，可和圖 4-19 相互參照。

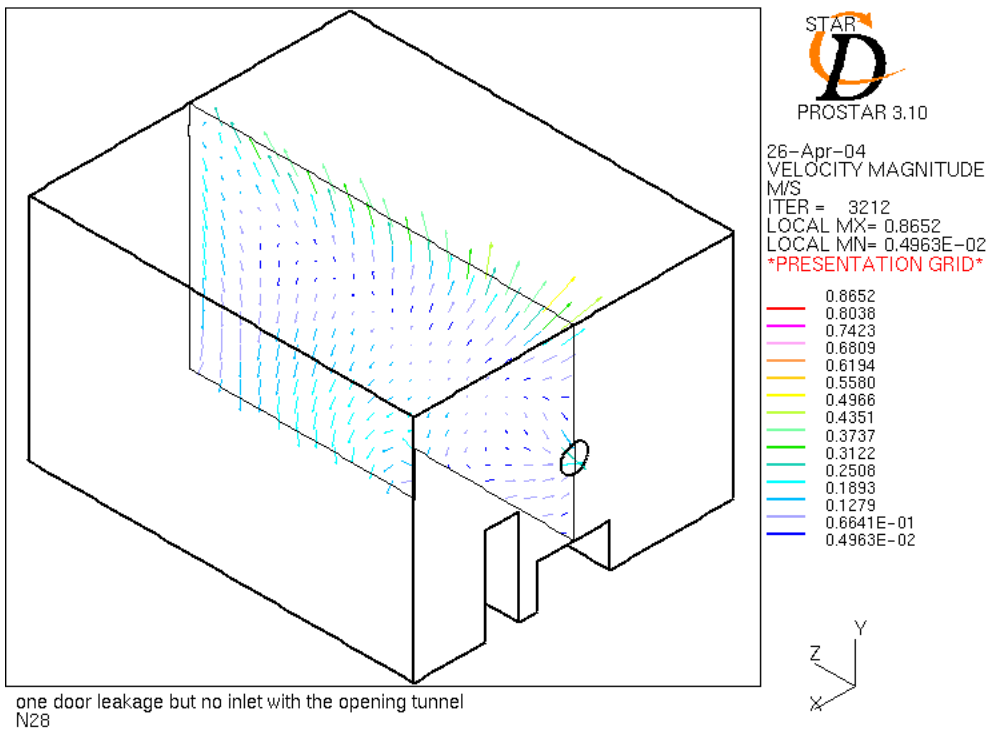


圖4-12 流場速度分佈圖，case a2，截面 a，part I

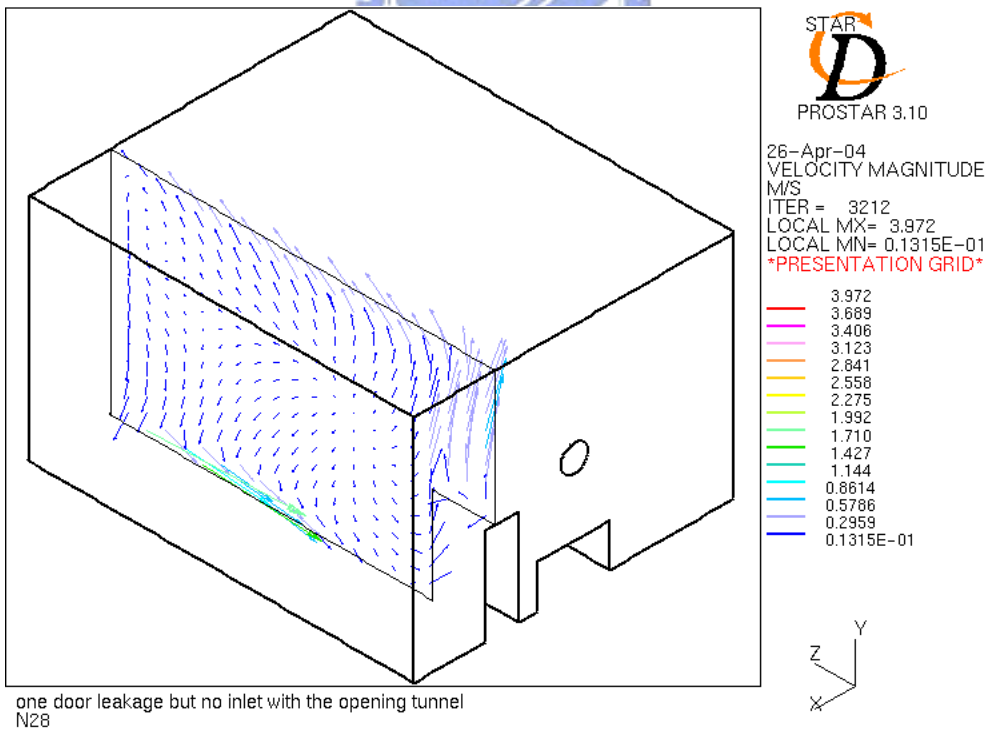


圖4-13 流場速度分佈圖，case a2，截面 c

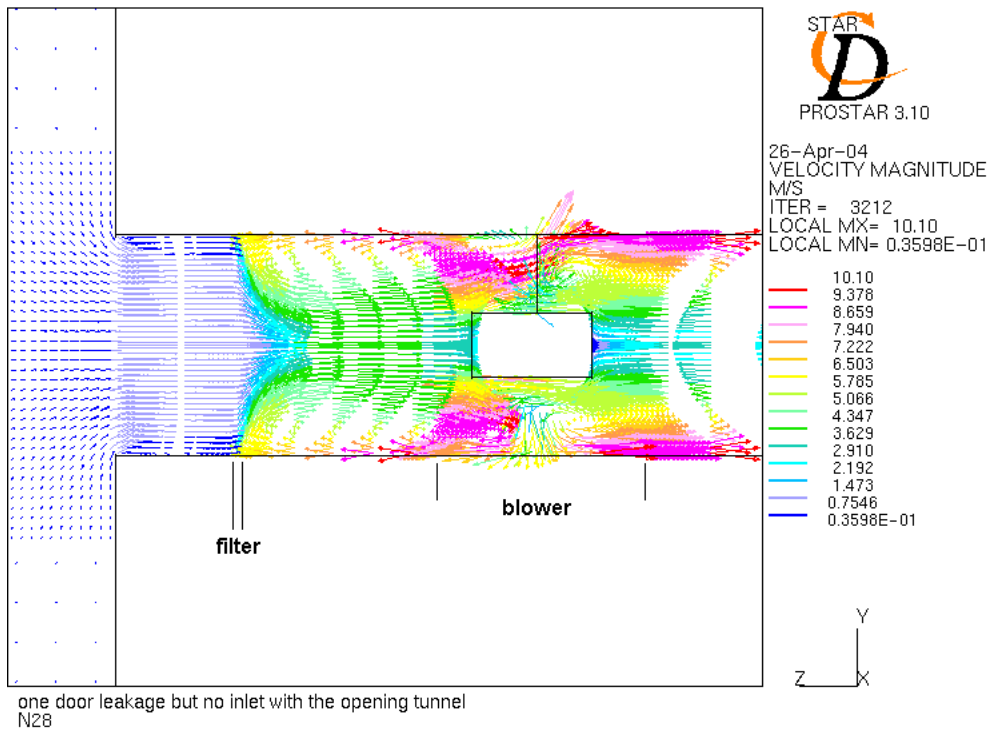


圖4-14 流場速度分佈圖，case a2，截面 a，part II

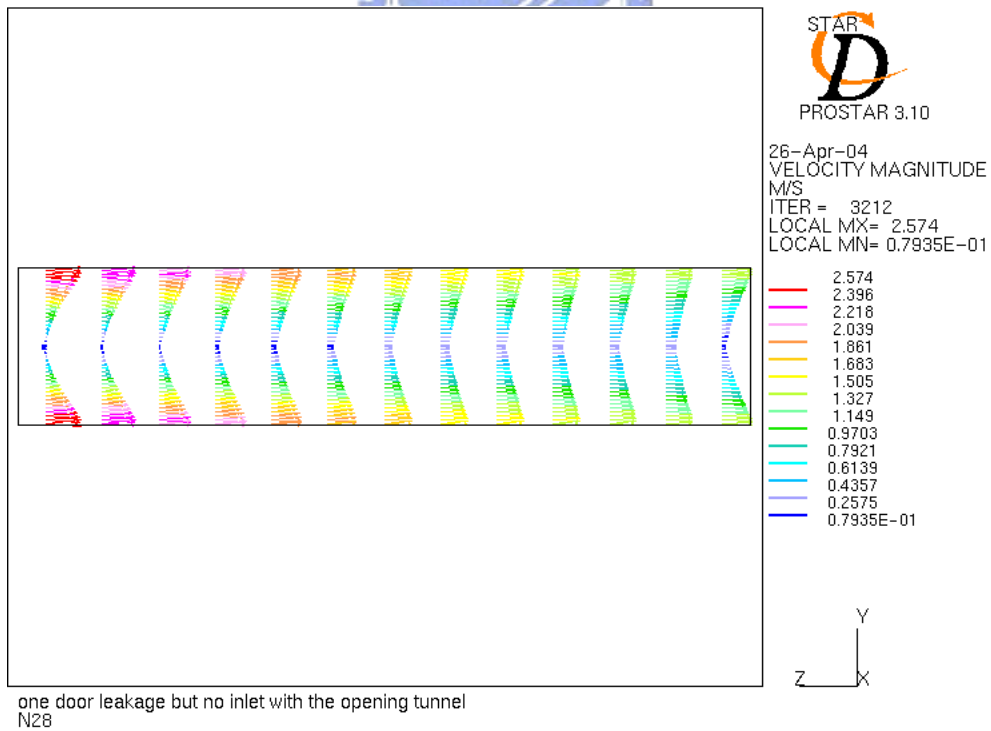


圖4-15 流場速度分佈圖，case a2，截面 a，part IV

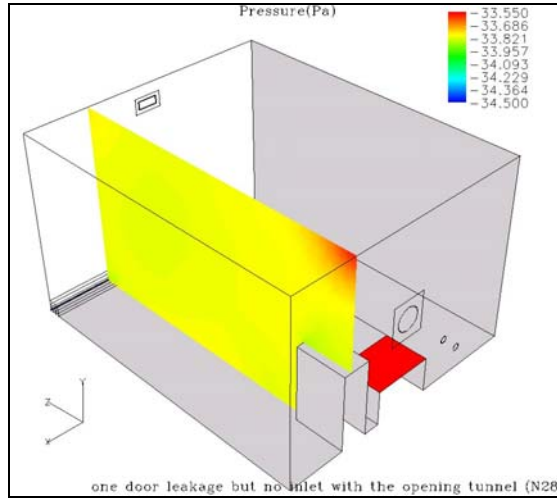


圖4-16 流場壓力分佈圖，case a2，截面 c

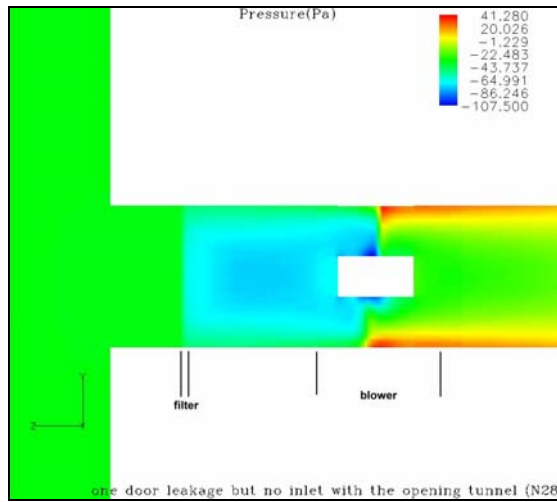


圖4-17 流場壓力分佈圖，case a2，截面 a，part II

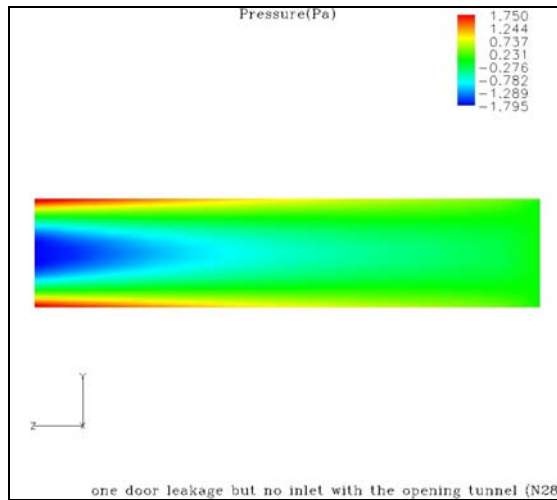


圖4-18 流場壓力分佈圖，case a2，截面 a，part IV

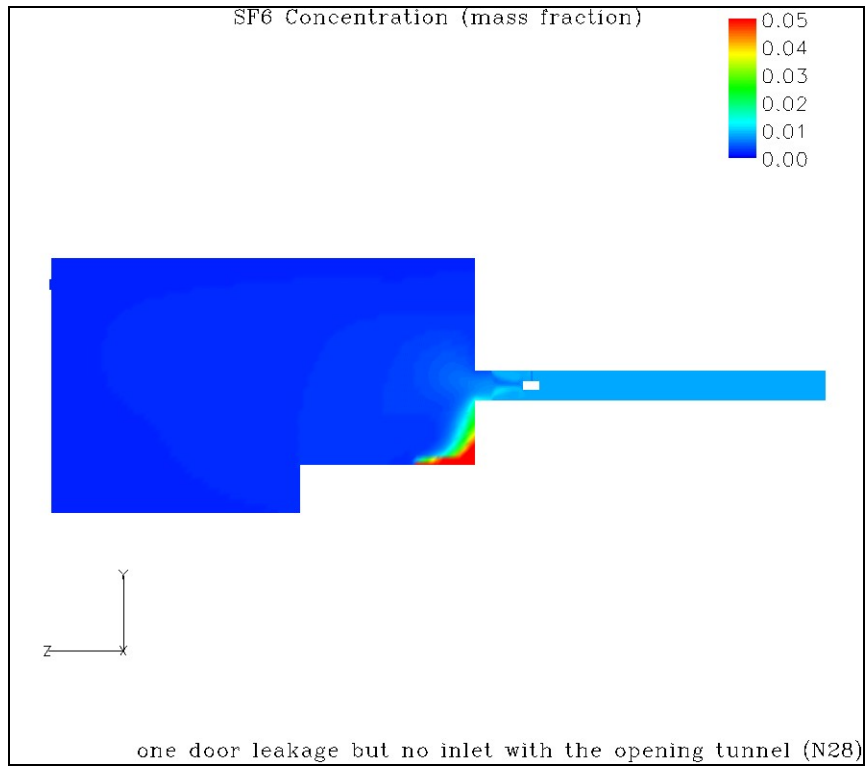


圖4-19 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a2，截面 a

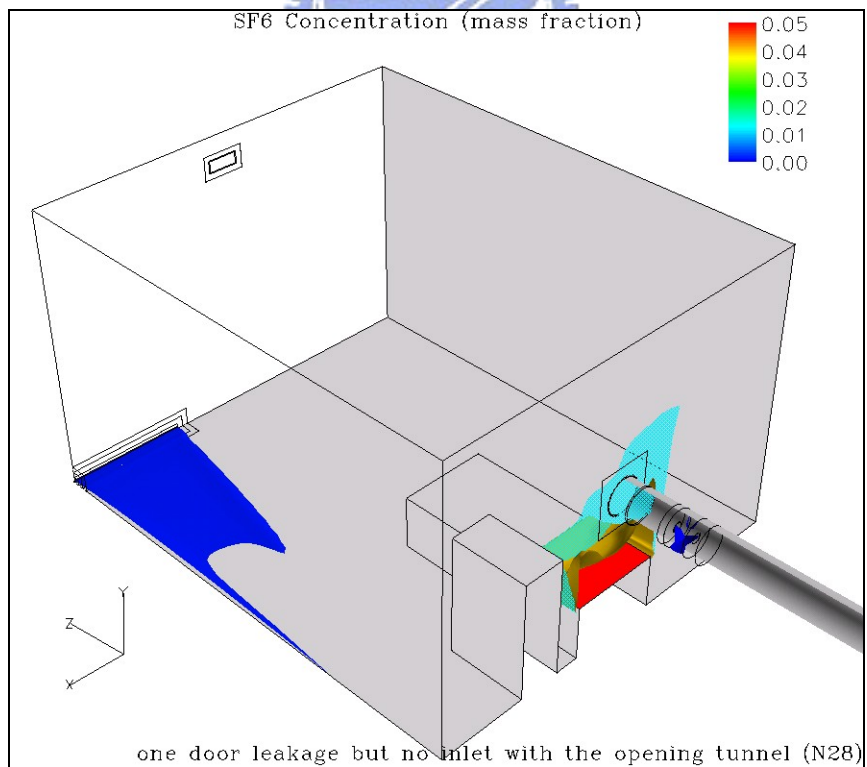


圖4-20 流場 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case a2

#### 4.1.3 含有濾網之風利使用門縫及洩漏口換氣的流場結構(型別 case a3、型別 case a4)

本小節所討論的結果則為分析一般正常隔離區間內的設置，使用洩漏口及門縫的進氣條件，而這兩者的差異是在於前者(型別 case a3)的洩漏口為藉由房內負壓環境以及相對房外是高壓環境而致使流體由外流入，而後者(型別 case a4)乃是使用直接設定風速，模擬新鮮外氣送風供應的結果。而設定上進氣的速度較前者高(型別 case a3)。而其結果兩者共通性很大，僅在約略上數值有所差異，因此合併分析之。

圖 4-21 為型別 case a3 在截面 a 之 part I 部分的速度場，顯示開啟上方洩漏口之壓力邊界後，在此因壓力平衡關係，由外向內流入外界空氣造成噴流現象，而由於設置上是在區間的上方處，因此延伸整個天花板噴入之後沿著牆面流向風管接口。房內供氣便因此以洩漏口為主要，而門縫的進氣則減弱。主要原因乃是洩漏口為 1.5 倍的門縫大小，其面積較大且長寬比較為接近，流量則會較大。而圖 4-22 則為型別 case a3 在截面 a 之 part I 部分的速度場，因為進氣設定上較前者大，因此整體主流流速也較快。圖 4-23、圖 4-24 是截面 a 之 part II 部分的速度圖，而這兩者所顯示出的迴流程度均比 case a2 的小，因此增設洩漏口可使抽換氣過程較為平順。而另外一個較為相異的地方則是由於 case a4 所流進的風量較為大，因此在圖 4-24 顯示風管接房內端處入口流較為不平均，而偏向上半部的管徑有較大的流量。

圖 4-25 為 case a3 在截面 a 之 part I 部分的壓力圖，整體區間內平均壓力大約在維持在-8.4 pa 左右，而 case a4 則維持在-3.4 pa 左右(因相似性而未放置圖片)，而洩漏口噴流現象則造成了房內局部區域壓力稍高，但差距在 0.5Pa 以內，所以影響不大。圖 4-26 則為 case a3 在房內端與風管接口附近的壓力分佈，顯示壓力明顯變化是在濾網附近，因此最大的損耗發生在過濾網端。而如僅以由壓力判斷流場，亦可知流體是由房內(較為高壓的-19.9Pa)流向風管處(較為低壓的-58.9Pa)。

圖 4-27、圖 4-28 為型別 case a3、case a4 在截面 a 的房內濃度分佈圖。如圖 4-28 因流體未能平順的完全流入風管，而繼續沿牆面而下，使得污染氣體向床面前移，而雖圖 4-27 發生的情形較小，但仍須注意設置的流量是否需要再加以調整。而圖 4-29、圖

4-30 則為 case a3、case a4 的等濃度圖，顯示污染的情形均比圖 4-20 之 case a2 來的範圍較大，但是均集中在床面附近。由此可知增加洩漏口的進氣的確使換氣率提高，但是如果設置不當位置或是不當風量則可能會造成污染擴散。

## 4.2 穩態計算風管不使用濾網之負壓隔離區間結果

本節為討論第一研究部份後四種型別的結果，也就是均屬於風管未設置濾網的情形。作為對照與比較前四種型別之用。而結果也證明未設置濾網的區間負壓情形的確是比相對應的型別好，但不一定代表有較好的污染物排除率。以下詳細討論差異。

### 4.2.1 不含濾網之風管的完全密閉區間的流場結構(型別 case b1)

本型別為相對照於型別 case a1，亦為完全封閉形式的區間，僅開放風管出口的壓力邊界，同之前各小節說明，本節(4.2.1)主要針對型別 case b1 討論，因此如無特別說明，則代表討論的型別為此型別，不再重複。

於型別 case a1 之中發現房內流體大部分均在房內迴流或為近乎停滯現象，但有別與此，本模式則發現流場有較嚴重的倒灌情形(相對於 case a1 而言)。如圖 4-31 所示為房內截面 a 的速度分佈圖，由圖中可看出房內接風管中央端有抽離房內氣體的現象，而由風管兩側則有流回至房內的氣體，並在房間的上方與床面造成迴流。為了清楚顯示圖 4-31 的右上角局部區域因此增附圖 4-32。而圖 4-33 則為房內截面 b 部分的速度向量圖，可知倒灌回房內的流體現象亦可以由此截面發現。因未有阻礙物影響下，擴散流動的速率較大。

圖 4-34 則為截面 a 之 part II 部分的速度圖，顯示出在無濾網的壓降作用下，風管中的流體可以幾乎不受阻礙的流動。但是在無法換氣情形下，則氣體交換率差，幾乎為相同的氣體往復於房內與管道之間。由圖可知，風機抽氣作用下風管於房內端與風機之間的部分在管中央處呈現流出的趨勢，但另一方面，為了平衡流量及壓差，則靠近管壁的部分(於此圖的風管上、下方)則有逆向流回房內的現象，並可參照圖 4-31 可知迴流現

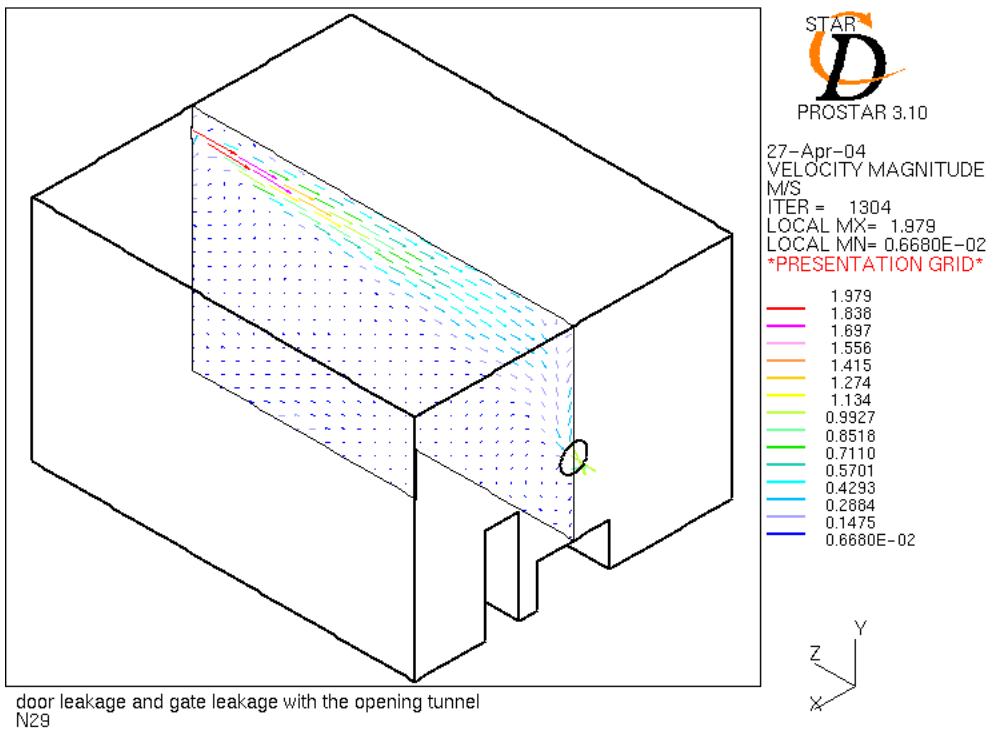


圖4-21 流場速度分佈圖，case a3，截面 a，part I

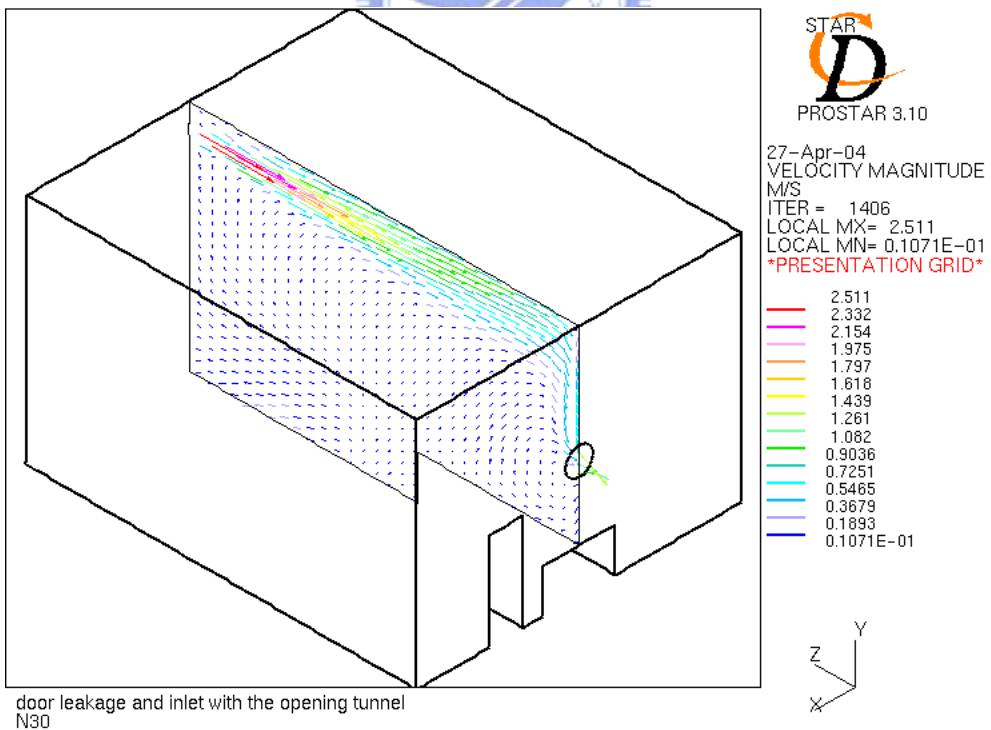


圖4-22 流場速度分佈圖，case a4，截面 a，part I



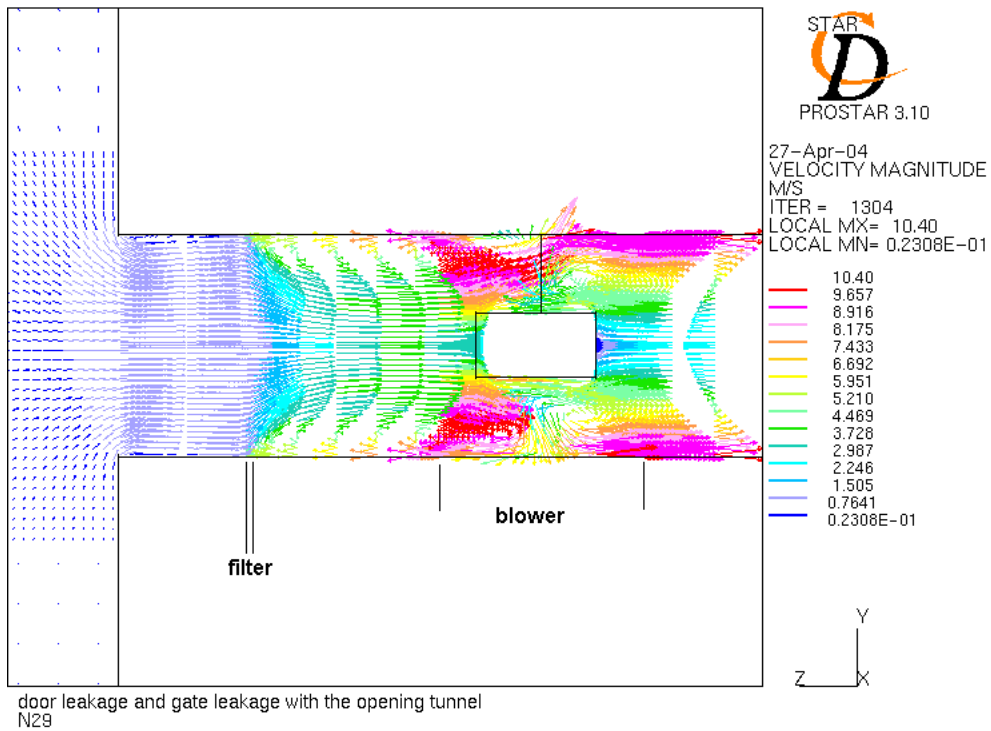


圖4-23 流場速度分佈圖，case a3，截面 a，part II

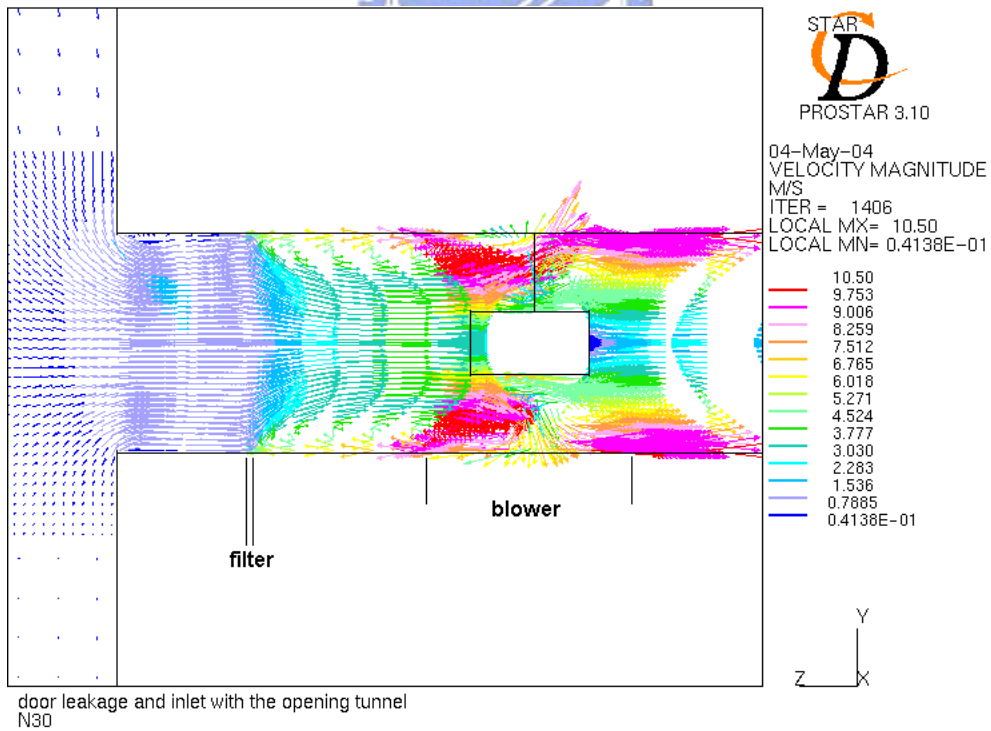


圖4-24 流場速度分佈圖，case a4，截面 a，part II

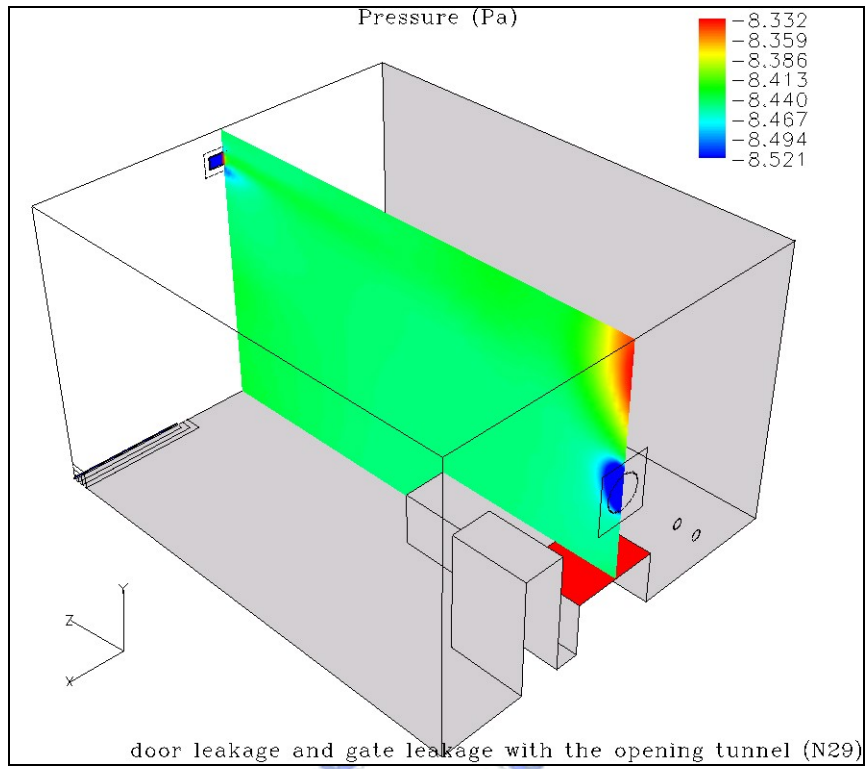


圖4-25 流場壓力分佈圖，case a3，截面 a，part I

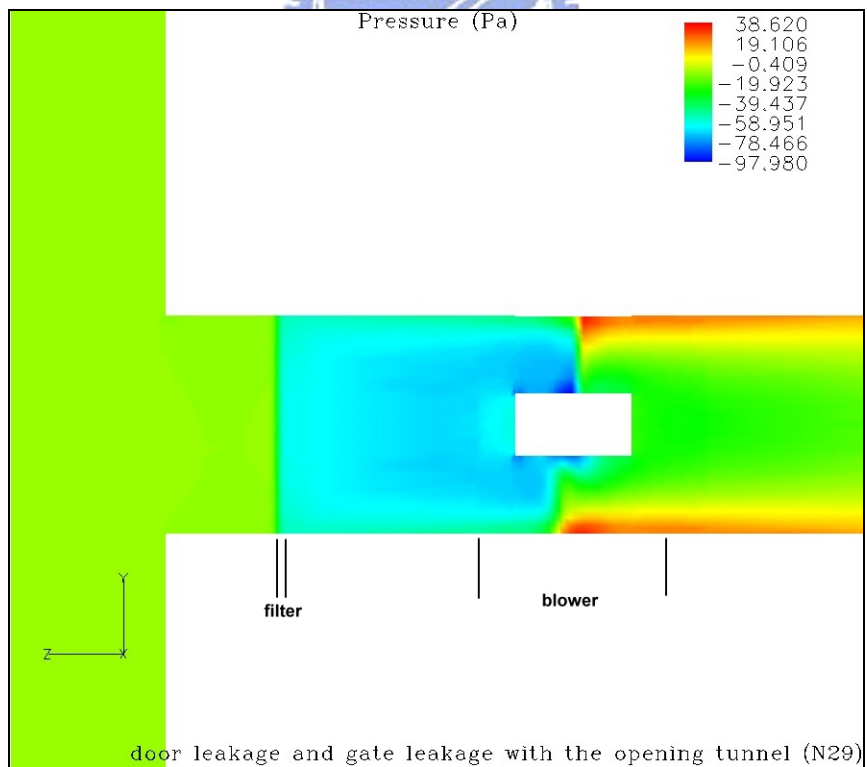


圖4-26 流場速度分佈圖，case a3，截面 a，part II

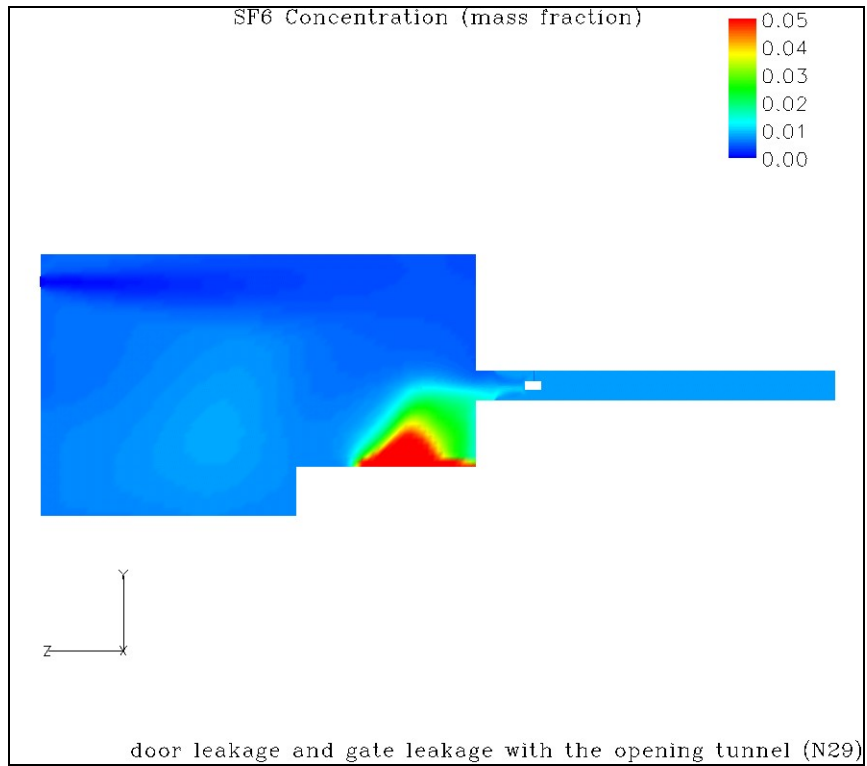


圖4-27 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a3，截面 a

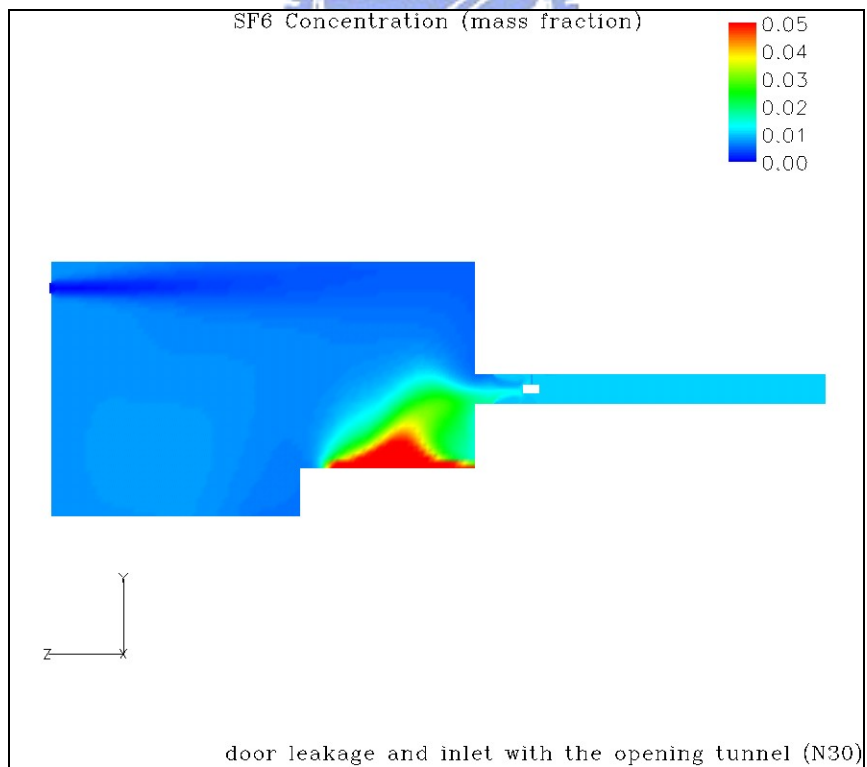


圖4-28 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case a4，截面 a

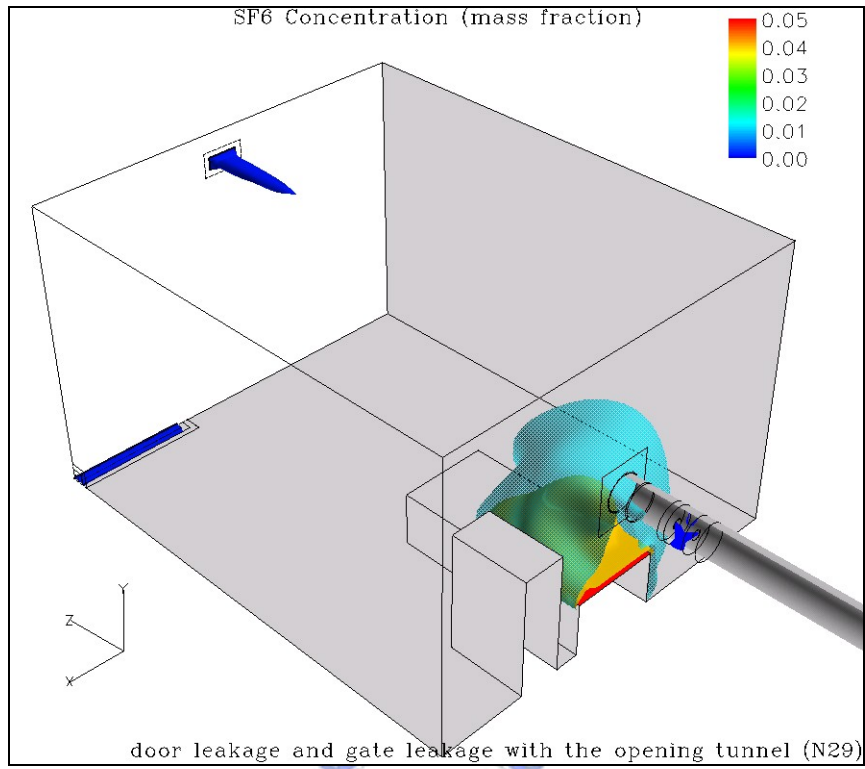


圖4-29 流場 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case a3

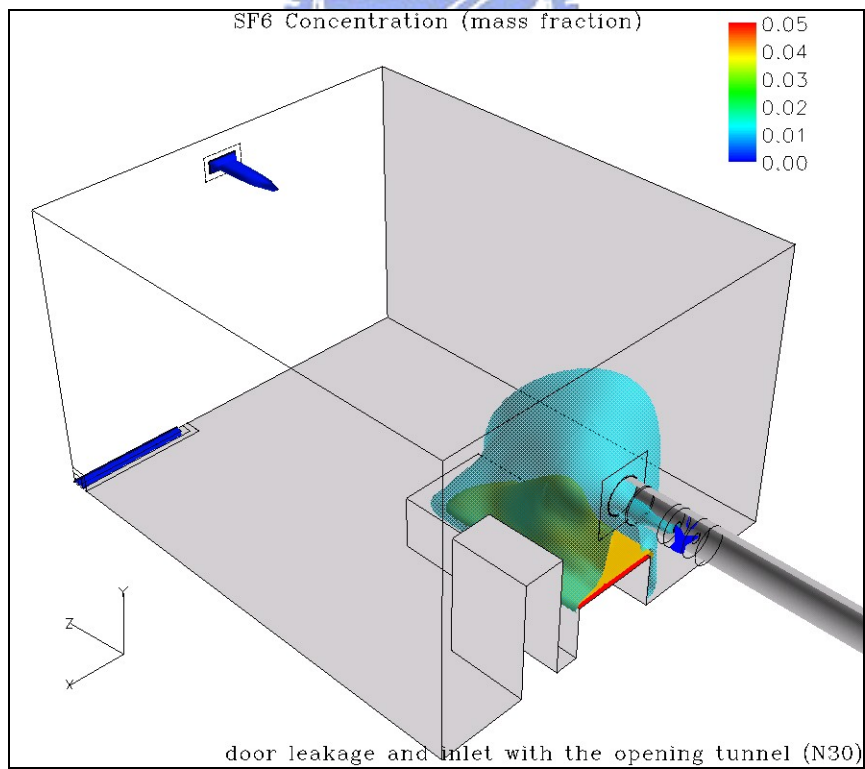


圖4-30 流場 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case a4

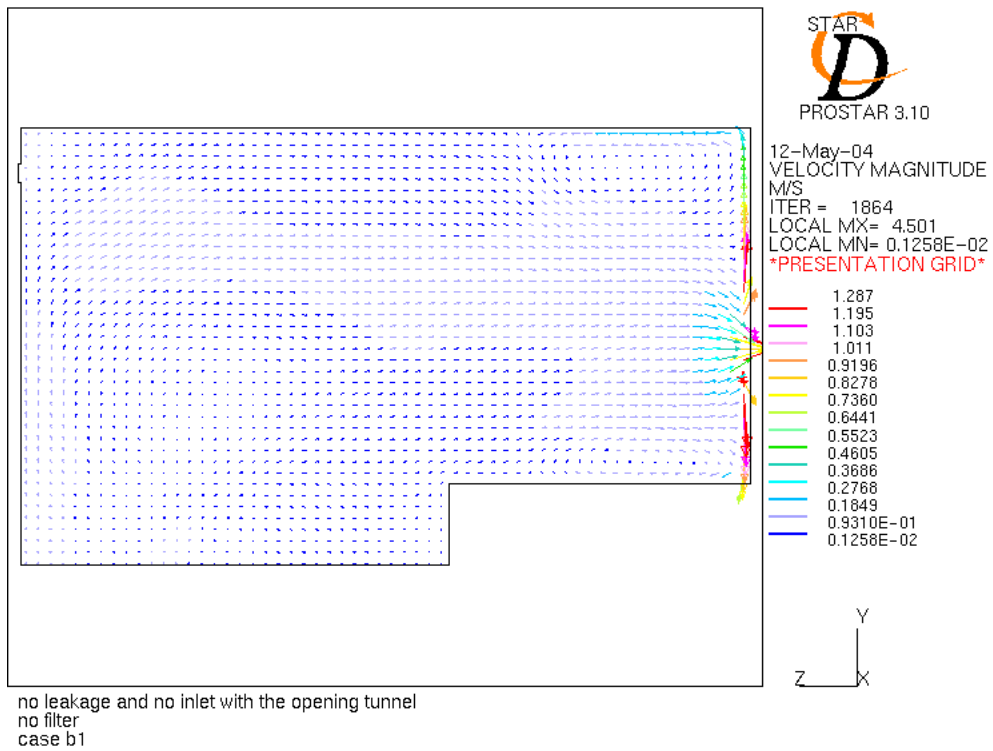


圖4-31 流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part I

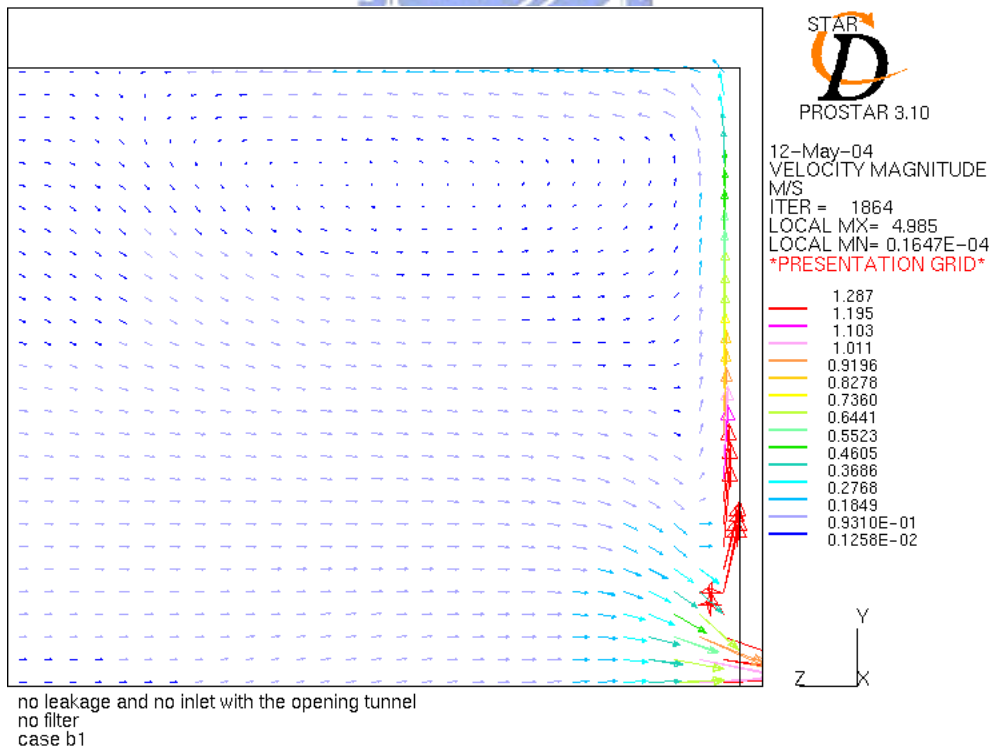


圖4-32 流場速度分佈圖，圖 4-31 右上側局部區域放大圖，case b1，截面 a，part I

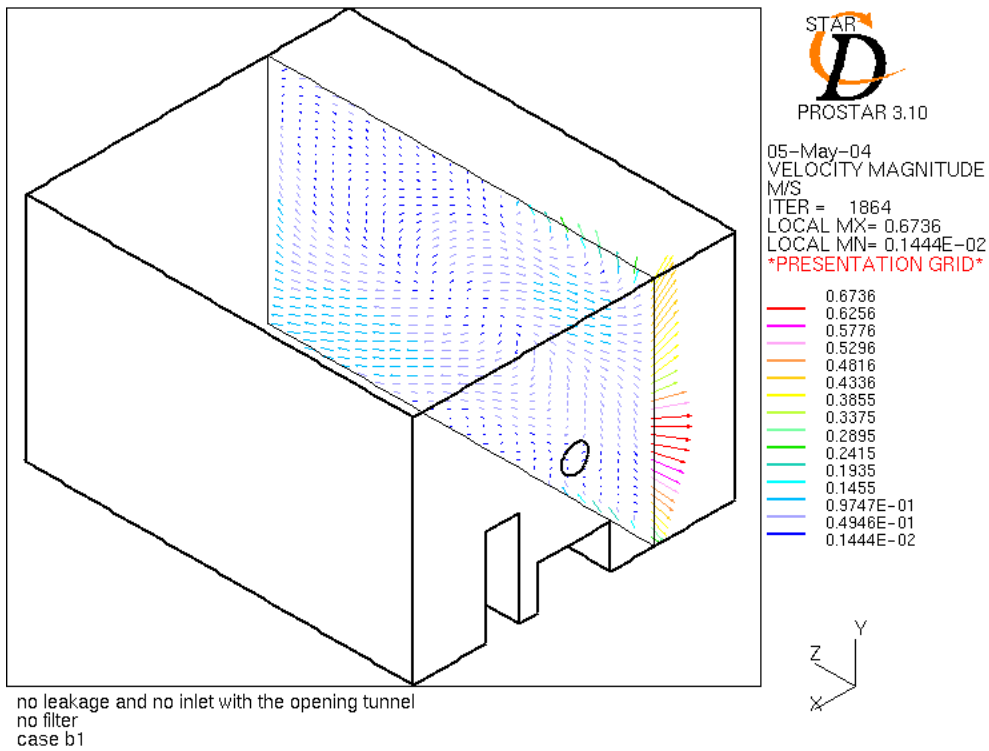


圖4-33 流場速度分佈圖，case b1，截面 b

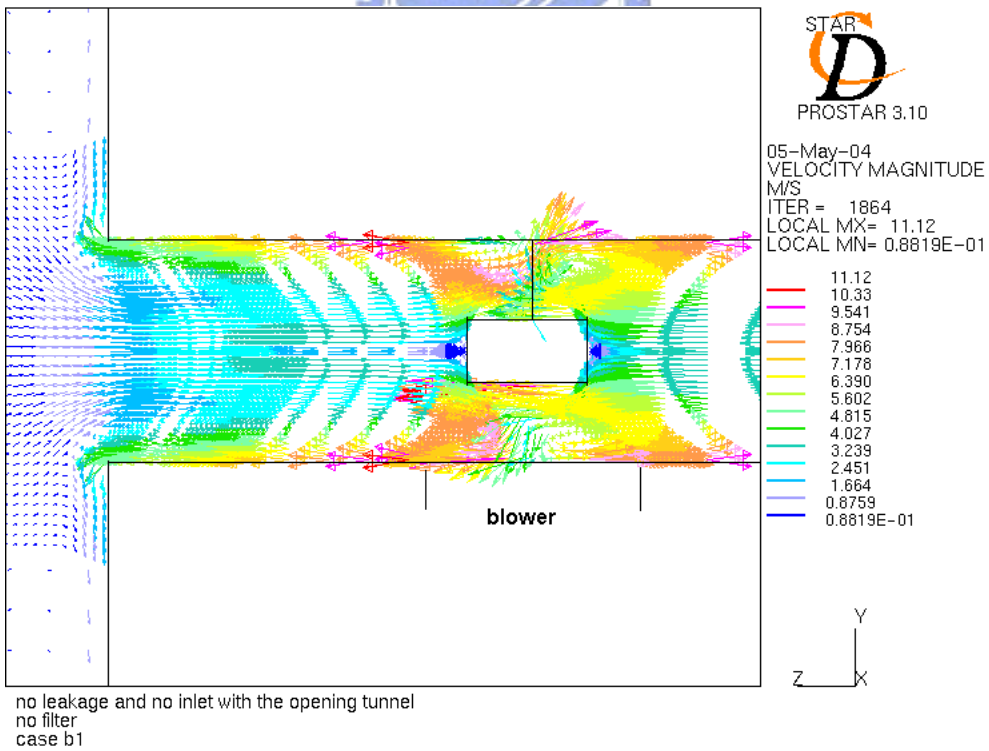


圖4-34 流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part II

象。圖 4-35、圖 4-36 是截面 a 於 part III、IV 部分的速度圖，也就是風機後至出口部分，顯示流體無法順利排放至外界，僅在風管循環的現象。

圖 4-37、圖 4-38 是房內於截面 a、b 部分的壓力圖，顯示房內壓力變化與含有濾網的型別(如 case a1)相同，即在房內則壓力變化不大，除了因為吸氣現象造成些許的壓降外，則為回氣流至天花板而造成升壓效果(但僅 0.05Pa 變化很小)。不過可知的確在未裝設濾網的作用下，室內負壓程度比有裝設濾網的好(-71.1 Pa 相對於 case a1 的 -69Pa)。

圖 4-39 是截面 a 於 part II 部分的壓力分佈圖。由圖可知於房內與風機之間的壓力變化較少(相對於 case a1 而言)，僅因風機抽氣所產生的壓力變化影響。而圖 4-40 為風管後段與風管出口之間的壓力圖，顯示出後段管壁壓力較中心部分大，因此會有渦流產生。同樣地與 case a1 相仿的風管末段結果，本型別在風管出口處亦有流體同時流進與流出的現象。

至於濃度累積方面則發現受到不斷迴氣的影響，整個區間部分呈現高濃度累積的現象，很多網格濃度均超過 30% 以上。但在此為使濃度顯示一致性，仍然維持使用 0-5% 的濃度色標表示，如圖 4-41 所示。因此可知不管有無設置濾網，在無通風情況下，濃度累積明顯。

#### 4.2.2 不含濾網之風管利用門縫換氣的流場結構(型別 case b2)

本模式為探討使用門縫的壓力邊界，所造成的換氣現象作為討論。並茲以對照型別 case a2 的模式，比較有無濾網風管所造成的差異性。

圖 4-42 為型別 case b2 在截面 a 於 part I 部分的速度圖，顯示開啟門縫造成外界新鮮空氣的引入，使得由房外進入的氣體，直接沿地板流向床面方向，而圖 4-43 則為截面 c 部分的速度分佈圖，流體流入在門附近造成挾帶作用，並因噴流作用使得流體更沿壁面向天花板流動。圖 4-44 為截面 a 之 part II 部分的速度圖，在風機介於房內端的風管部分顯示大部分流體均因抽氣作用由房內流出，但因為流量未能補足壓差，因此有些許部分的流體有迴流現象，但僅在風管部分流動，未回到房內。而圖 4-45 為 part III

部分的速度圖，延續風機的抽氣作用下大部分均是向外流出，但因壓差平衡下，仍有部分流體流回風機，但以出口處流量統計，則為流出的現象。

圖 4-46、圖 4-47 為房內於截面 a、c 部分的壓力分佈圖，由此可知在房內壓差除了在阻礙物上方附近的壓力較高外，其餘地方則無明顯變化，均為-57Pa 左右。但由此可知與型別 case a2 的負壓值-33.8Pa 比較則有明顯改變。顯示當有流體流進流出時，過濾網對於室內負壓程度改變較為明顯。而圖 4-48 為截面 a 於 part II 部分的壓力分佈圖，顯示不經過濾網則無明顯壓損差距(可和圖 4-17 比較)。

圖 4-49 為本型別於截面 a 的 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，顯示出的污染範圍為床面污染發生源部分，以及因為流向天花板的流體所對流擴散的污染部分，十分類似 case a2 的污染範圍，但是可看出範圍較 case a2 大，並可由等濃度圖(圖 4-50)比較。但由於些許污染物(大約差距 0.2%左右)，使得進氣的等濃度面僅在門縫附近，未能如 case a2 相同而延伸至地板面。



#### 4.2.3 風管不使用濾網之門縫及洩漏口換氣隔離區間的流場結構(型別 case b3、型別 case b4)

本節主要討論未使用濾網情形下，根據不同的洩漏口送風條件所對於流場造成影響的探討。而此兩者型別(case b3、b4)在部分方面所顯示的流場現象有相同與相異的地方，故合併討論之。

圖 4-51、圖 4-52 為此兩種型別於房內截面 a 的速度分佈圖，由圖中可知，在壓力邊界的洩漏口條件下因為壓差而引入外氣，造成進口速率為 4.6m/s 左右，始能滿足流場的需求。但 case b4 為了配合 case a4 的送風口進口速率，則未加以修改(即風速維持 2.5 m/s 不變)。因此門縫的流速也有所差異，在 case b3 平均為 4.5 m/s 左右，而 case b4 則為 4.9 m/s 左右(可參考圖 4-53)，因此這樣的差別，造成之後的污染範圍及程度上的不同。而亦可由圖 4-53 發現因為 case b4 有較強的門縫氣體噴流的影響，進氣在房內形成較大的迴流。圖 4-54 為 case b3 的截面 a 於 part II 部分的速度分佈圖，顯示由於足量的供氣，使得風機與房內端之間的風管不再產生逆流現象，而 case b4(圖 4-55)



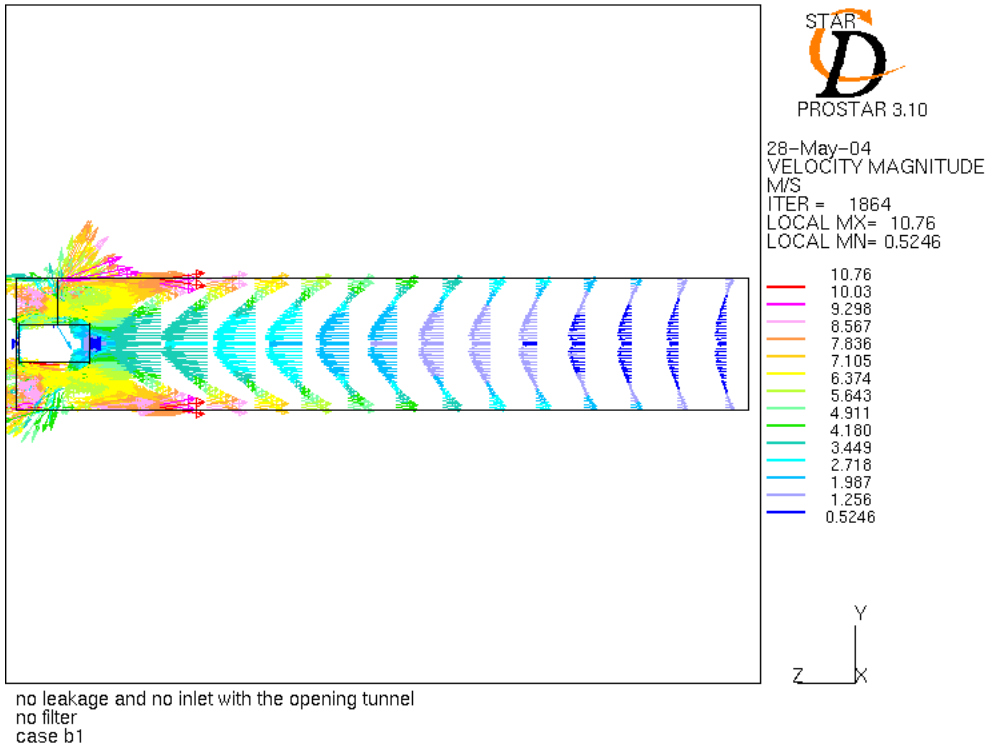


圖4-35 流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part III

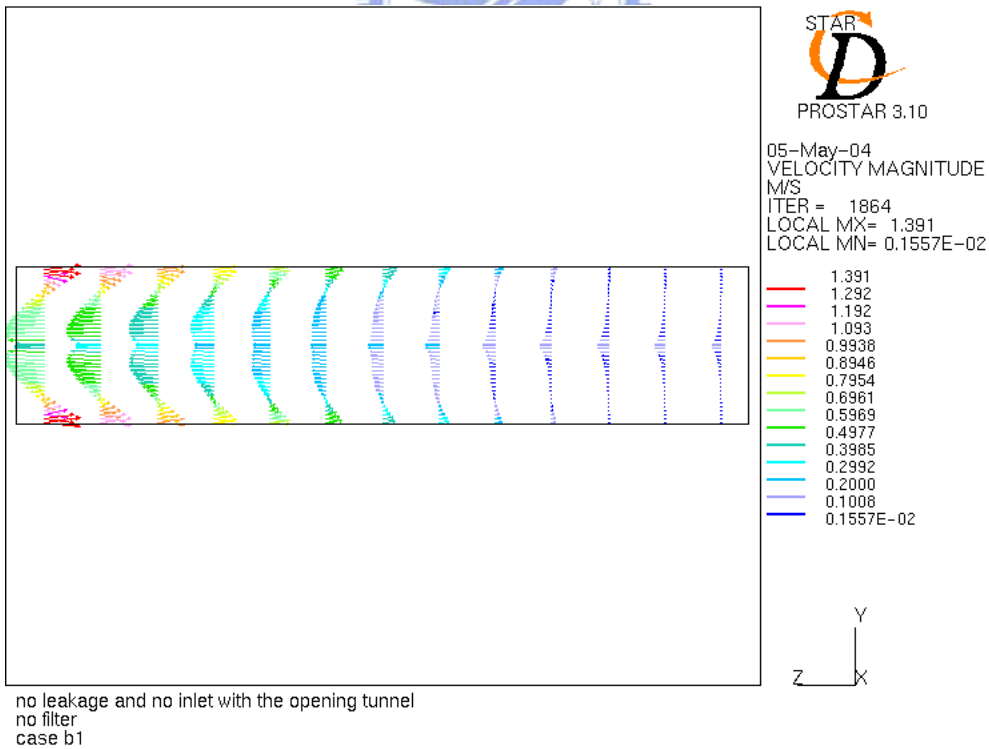


圖4-36 流場速度分佈圖，case b1，截面 a，part IV

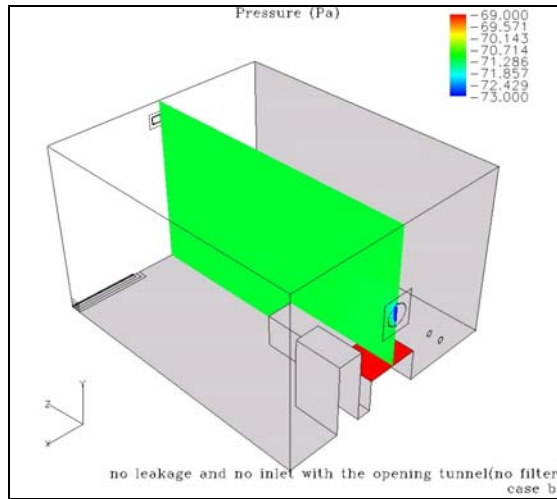


圖4-37 流場壓力分佈圖，case b1，截面 a，part I

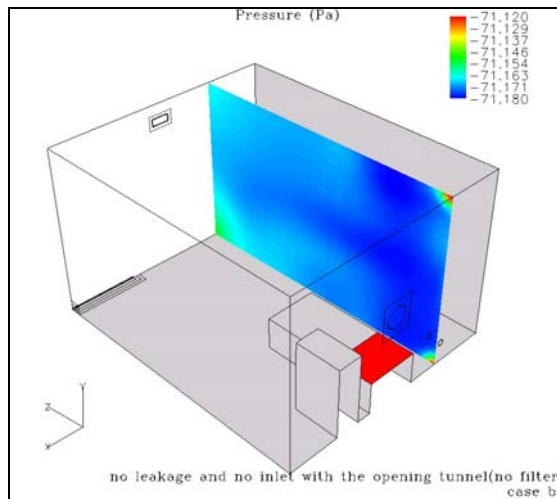


圖4-38 流場壓力分佈圖，case b1，截面 b

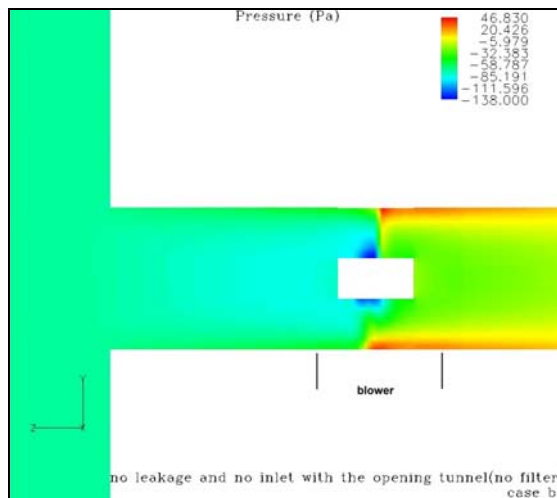


圖4-39 流場壓力分佈圖，case b1，截面 a，part II

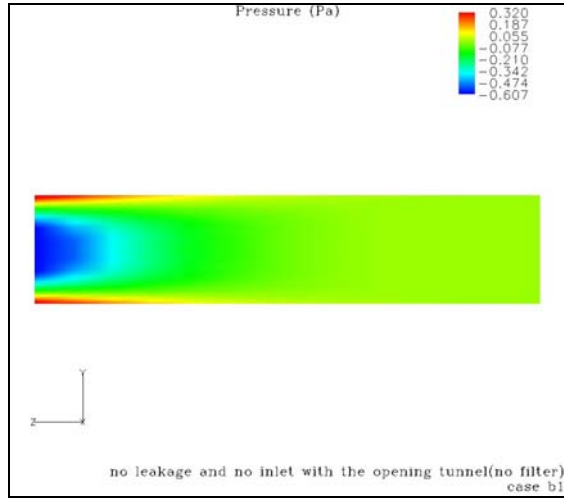


圖4-40 流場壓力分佈圖，case b1，截面 a，part IV

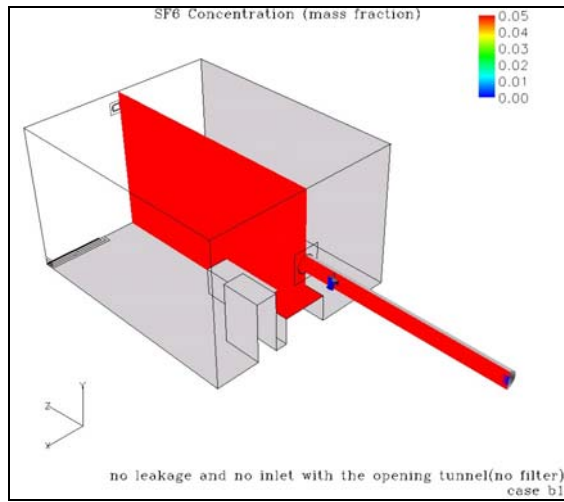


圖4-41 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b1，截面 a

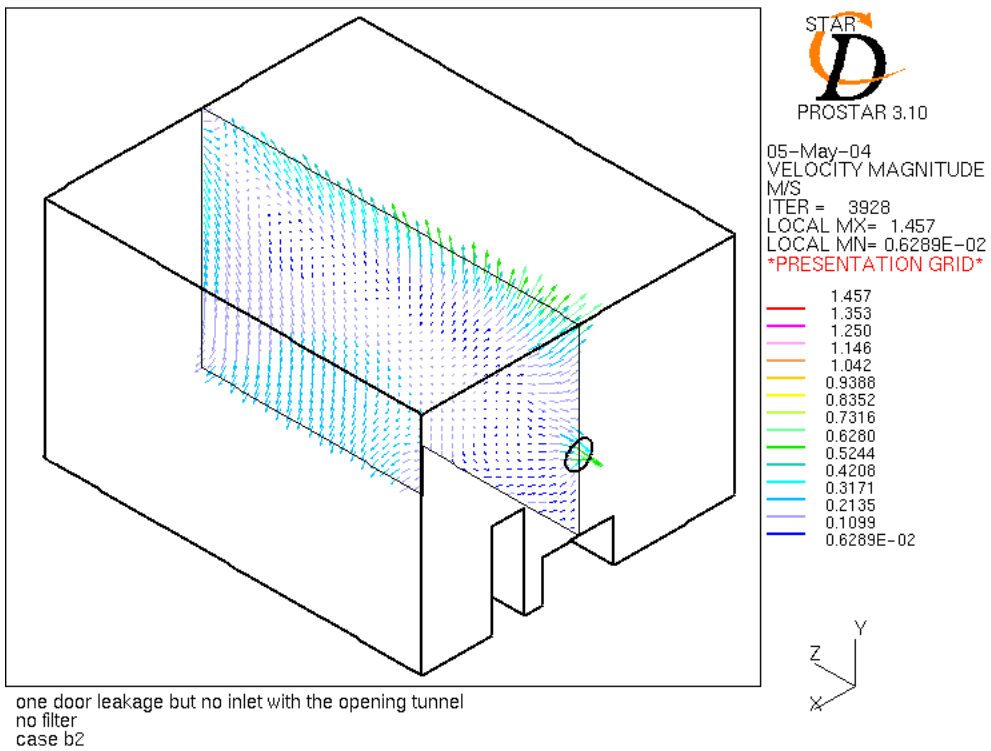


圖4-42 流場速度分佈圖，case b2，截面 a，part I

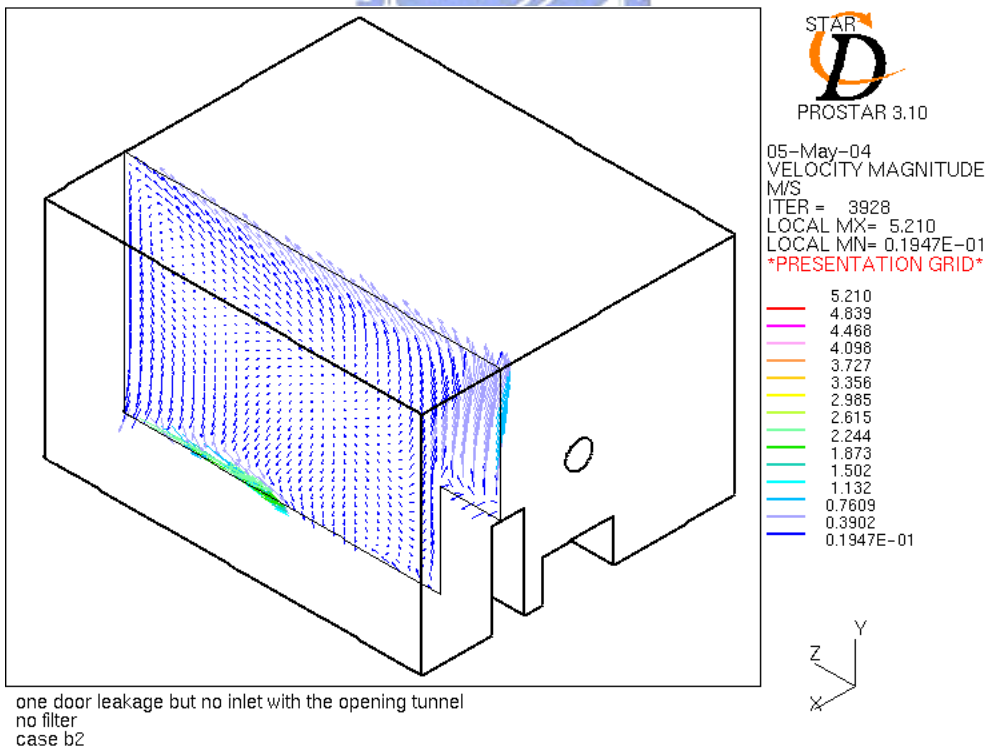


圖4-43 流場速度分佈圖，case b2，截面 c

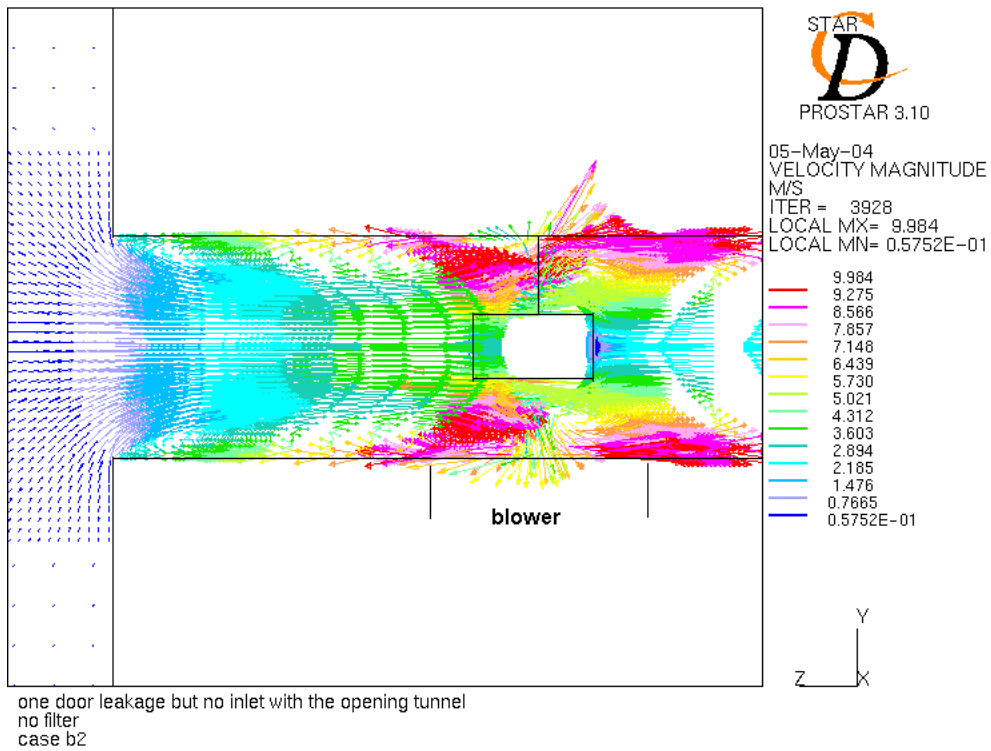


圖4-44 流場速度分佈圖，case b2，截面 a，part II

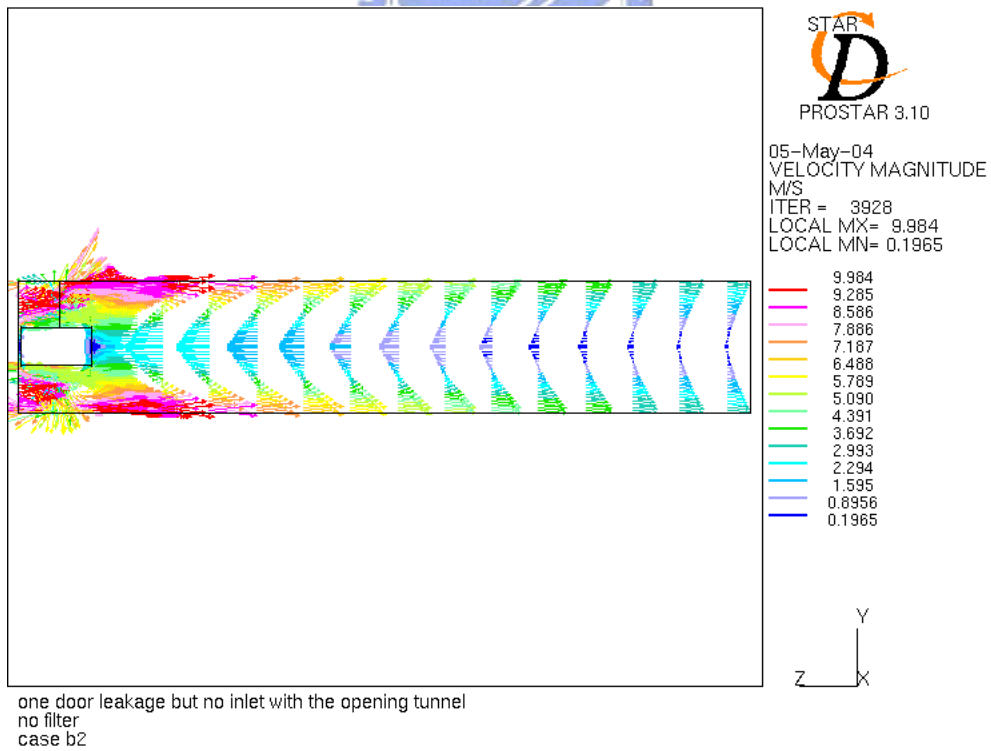


圖4-45 流場速度分佈圖，case b2，截面 a，part III

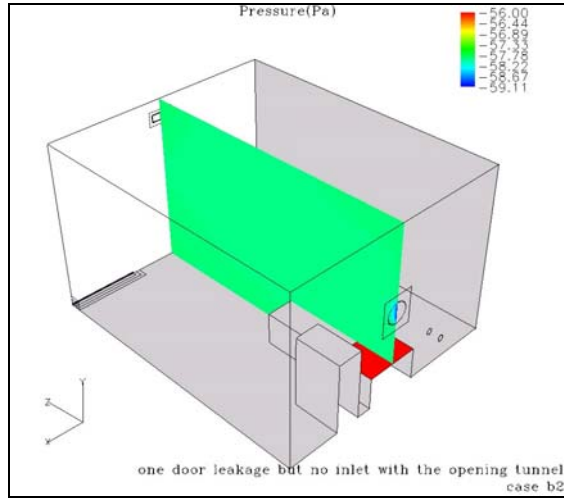


圖4-46 流場壓力分佈圖，case b2，截面 a，part I

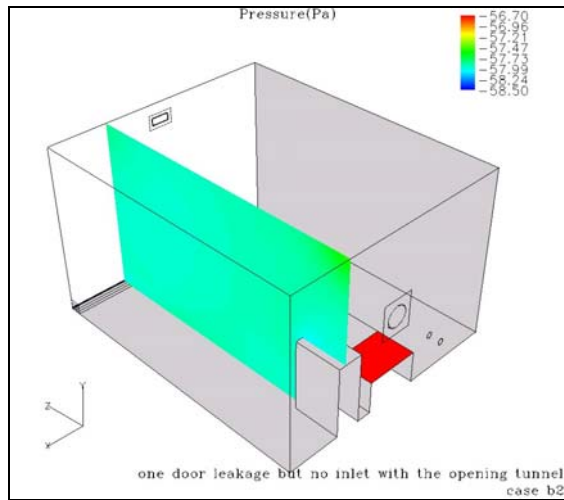


圖4-47 流場壓力分佈圖，case b2，截面 c

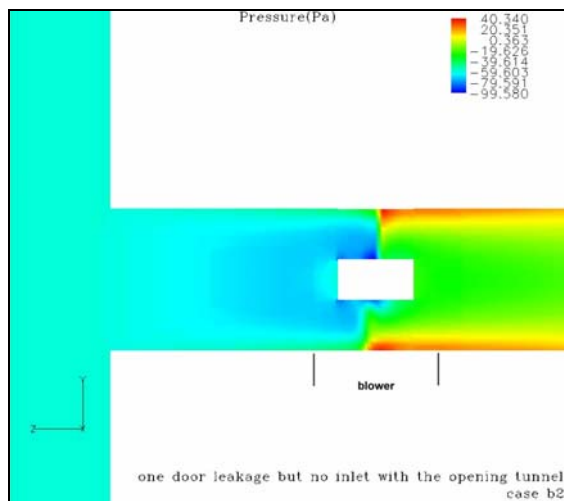


圖4-48 流場壓力分佈圖，case b2，截面 a，part II

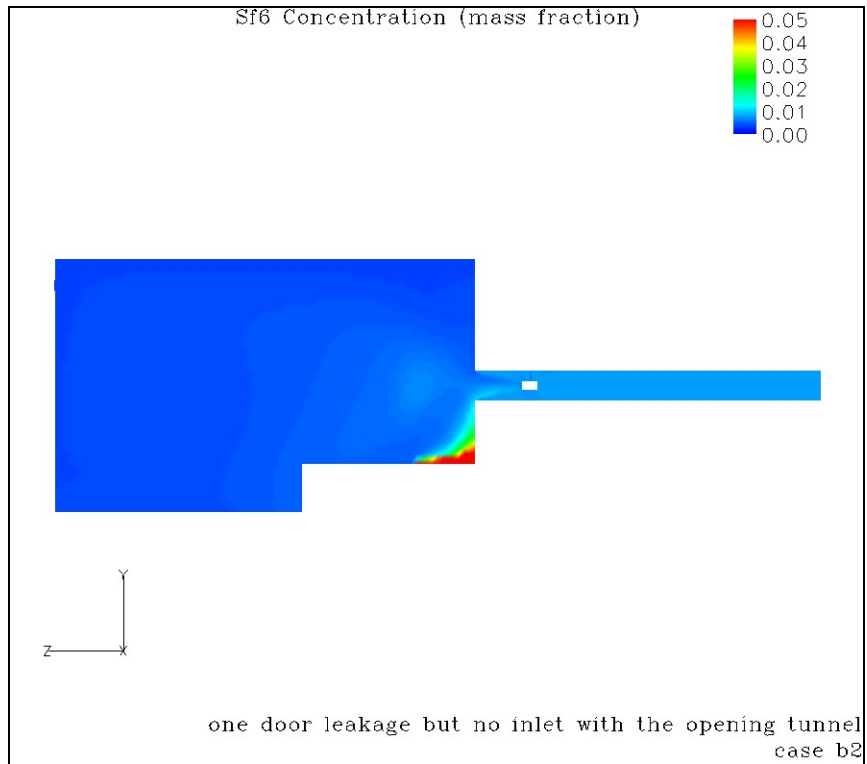


圖4-49 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b2，截面 a

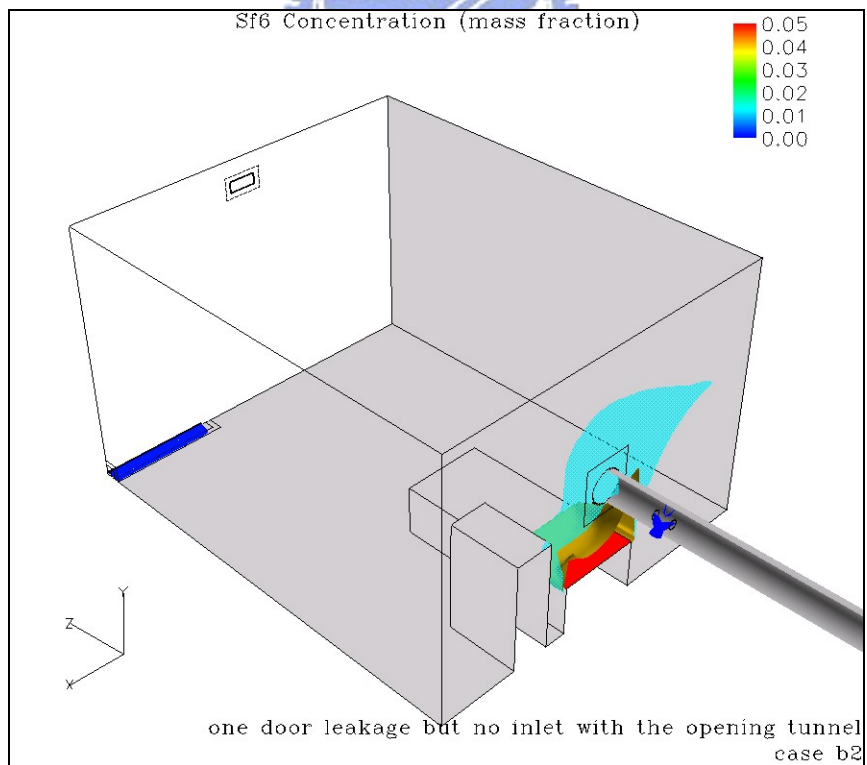


圖4-50 流場 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case b2

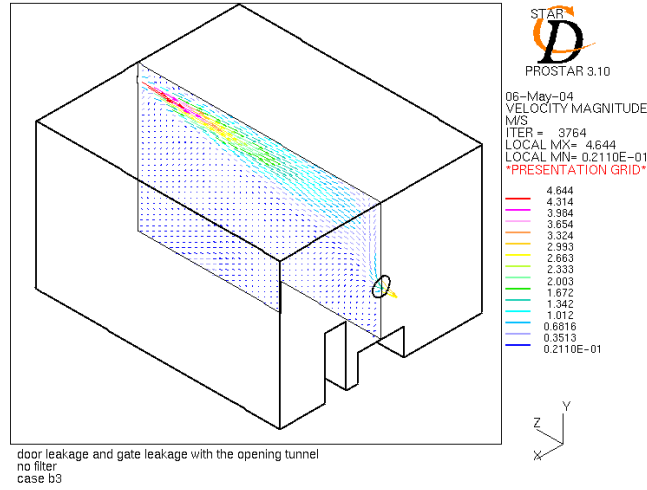


圖4-51 流場速度分佈圖，case b3，截面 a，part I

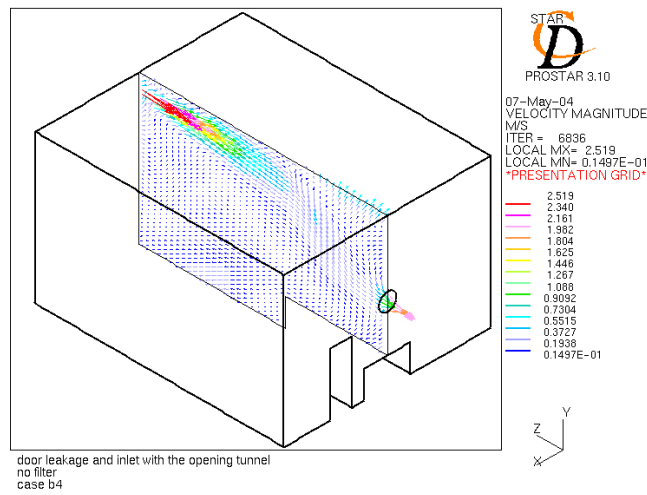


圖4-52 流場速度分佈圖，case b4，截面 a，part I

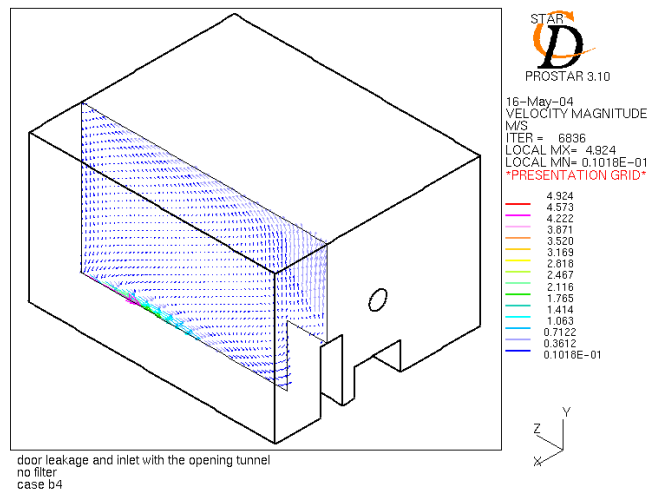


圖4-53 流場速度分佈圖，case b4，截面 c



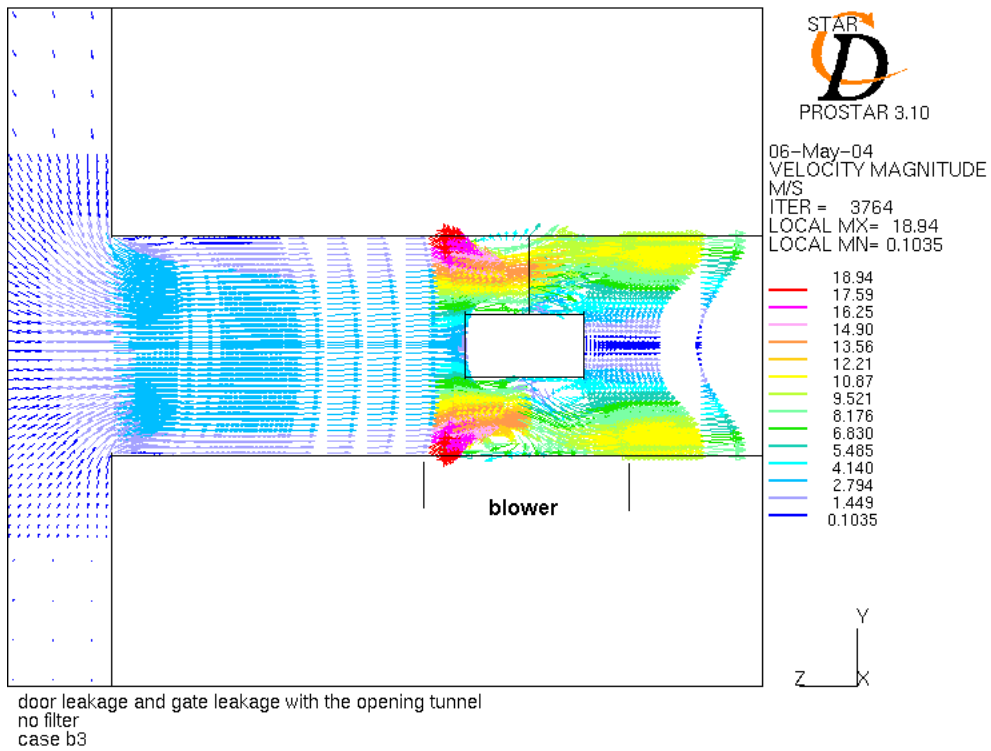


圖4-54 流場速度分佈圖，case b3，截面 a，part II

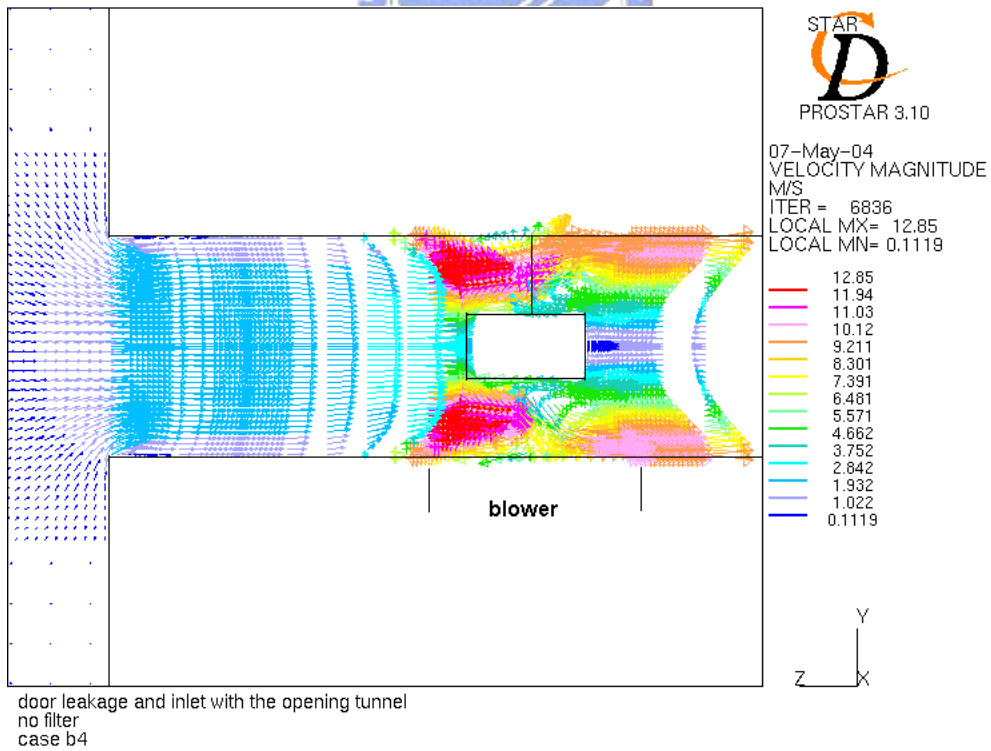


圖4-55 流場速度分佈圖，case b4，截面 a，part II

於此部分亦顯示此情形

而如此在壓力分佈上也略有所差異，圖 4-56、圖 4-57 則分別為其於截面 a 部分 part I 的壓力分佈圖，顯示分別平均為-45.4 Pa 與-51.8 Pa。而噴流所影響的壓力分佈情形，則 case b3 所造成的情形較為嚴重。

至於濃度分佈方面，圖 4-58、圖 4-59 為 case b3、b4 於截面 a 的濃度分佈圖，而圖 4-60、圖 4-61 為其各自的等濃度面圖。因為 case b3 與 case a3 類似，均是使用壓力邊界於門縫與洩漏口，因此所污染的範圍有相似性。但由於 case b4 的強制進口速率卻比 case b3 低，相對而言，case b4 雖然不會因為過大的洩漏口風速造成床面污染向外散溢，但是卻因為門縫所產生的擾流使得房內污染整體較高，造成如圖 4-61 所示，在床面與地板逸散的現象。

因此可知，對於整體的負壓房的配置應做整體考量，才能達到排除有害氣體的目的。

### 4.3 穩態計算負壓隔離區間結果數值比較

由前小節(4.1 與 4.2)可知，改變不同的邊界設定條件或是改變風管有無濾網，使得之後的結果因此有所差異。因此為了說明起見，於前小節僅說明關於流場的部分以及濃度場分佈上的差異。而本小節以統計的方式比較穩態計算之各型別的不同，並且分析之。

對於一般負壓區間整體換氣為一個重要課題，因為換氣量影響有害氣體的排除。因此本文採用統計網格於最接近出口處的總體積流率，使用式(4.1)方式計算，結果示於圖 4-62。

$$\text{總空氣體積流率} = \sum_{i=1}^k u_i \left( \frac{m}{s} \right) \cdot A_i \left( m^2 \right) \quad (4.1)$$

其中式(4.1)的體積流率是  $m^3/s$ ，但是空調通風較常使用的是無因次的每小時換氣率 (ACH)，因此將上式轉換，並將結果做成圖 4-63。

$$\text{區間內ACH} = \frac{\text{總空氣體積流率} \left( \frac{m^3}{s} \right) \cdot 3600 \left( \frac{\text{sec}}{\text{hr}} \right)}{\text{房內體積} \left( 3.6 \times 5 \times 6 \quad m^2 \right)} \quad (4.2)$$

根據圖 4-62 所示，可知當區間內關閉門縫與洩漏口的邊界的時候，區間內無法順利導入外氣，因此在出口處亦很難有空氣排出，所以總空氣體積流率幾乎呈現為零的數值(圖中為 0.0001 及 0.0002 m<sup>3</sup>/s)。至於型別 case a2、a3、a4 則是因為邊界不同而有不同送風量，case a4 因為送風速率比壓差進氣來的高，因此最後淨流率也較為高。而 case b2、b3、b4 結果亦是如此，但是 case b4 為維持對應與 case a4 進口風速條件下，洩漏口進口速率就相對比 case b3 來的低，因此換氣量也較低。

圖 4-63 為轉換成每小時換氣率的流量圖。由本文第一章緒論可知一般正常區間最小供氣應該在每小時 6 次以上，而最佳則應該在 8-12 次。因此由圖中可發現，大部分的設定狀態均不及最低標，而僅 case b3、b4 在良好範圍內。

再者，為了分析壓力分佈於房內與風管的差異，本文由出口處沿風管經風機至區間底面牆面之直線距離擷取各點壓力值，以距離為橫軸作圖顯示。而為了便於說明特徵起見，特先設置結構圖與關係圖表作為對照，如圖 4-64 所示。

圖 4-64 以有過濾網的型別 case a3 之壓力曲線為例(之後有圖另列，本圖僅示意)並列結構圖。區間內由於處在形狀結構良好的空間，因此於此處壓力差距並不是很大，在曲線上為近乎水平的線段。而後，房內至風管接口區域由於形狀大小差距影響下，會有形狀阻力壓損產生。進入風管段，因為風管中有多孔性濾網作用，因此亦會造成壓損。風機部分則是抽風現象而有急速升壓的峰值。為了之後說明起見與方便閱讀性，則不再並置結構圖與關係圖，如圖 4-65、圖 4-66、圖 4-67 所示。

圖 4-65 為型別 case a1-a4 壓力與距離關係圖，可知 case a2、a3、a4 均是區間內壓力比濾網與風機之間的風管段壓力高，而且可發現室內換氣率越大則濾網段壓損越大。但型別 case a1 呈現區間內壓力比濾網與風機之間的風管壓力低的情形，但於前段卻又較高，因此阻止由風機迴流的氣體直接進入區間內，並維持其低壓情形。

圖 4-66 則為型別 case b1-b4 的壓力與距離關係圖，由於未設置濾網的裝置，使流體可以順利通過，因此無明顯的壓損。而在房內端與接口處則因為形狀阻力而產生較大的損耗。其中型別 case b1、b2 在區間內壓力比風機前風管低，因此產生迴流，可看出流體容易逆流回區間，造成濃度累積效應。

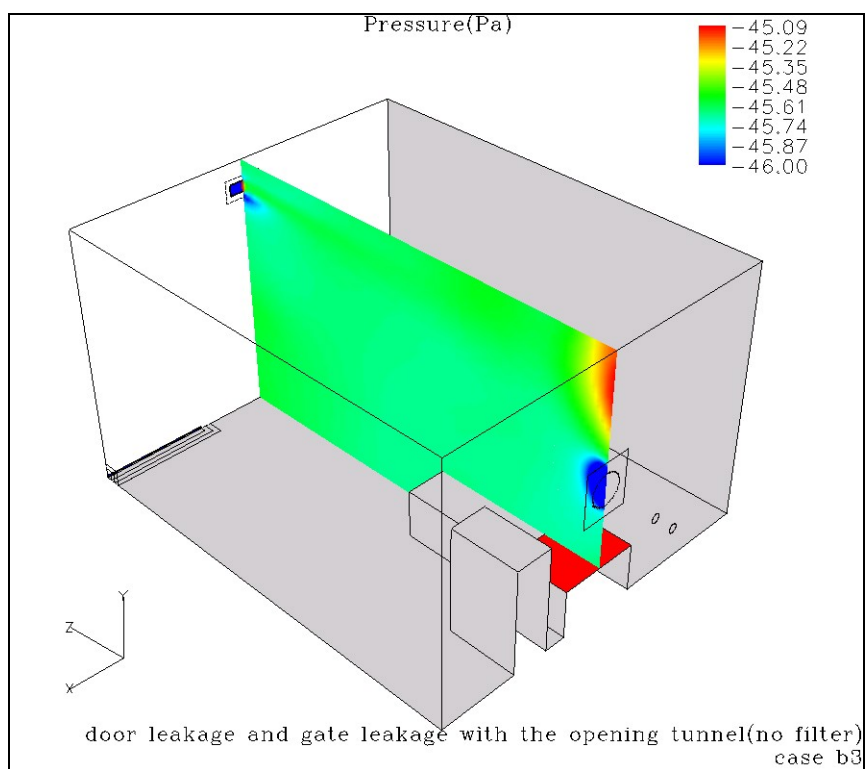


圖4-56 流場壓力分佈圖，case b3，截面 a，part I

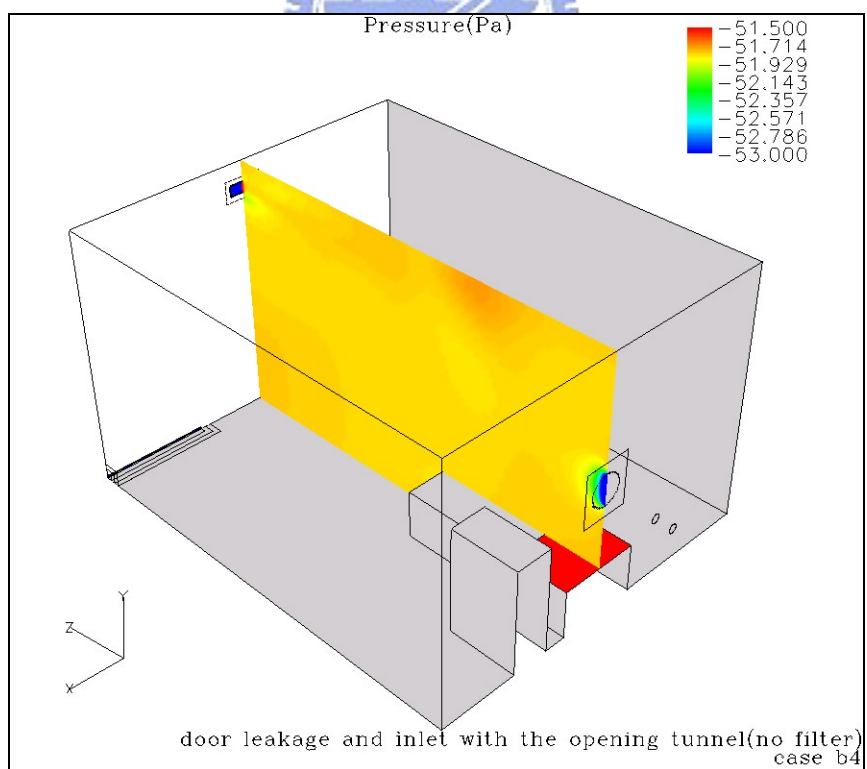


圖4-57 流場壓力分佈圖，case b4，截面 a，part I

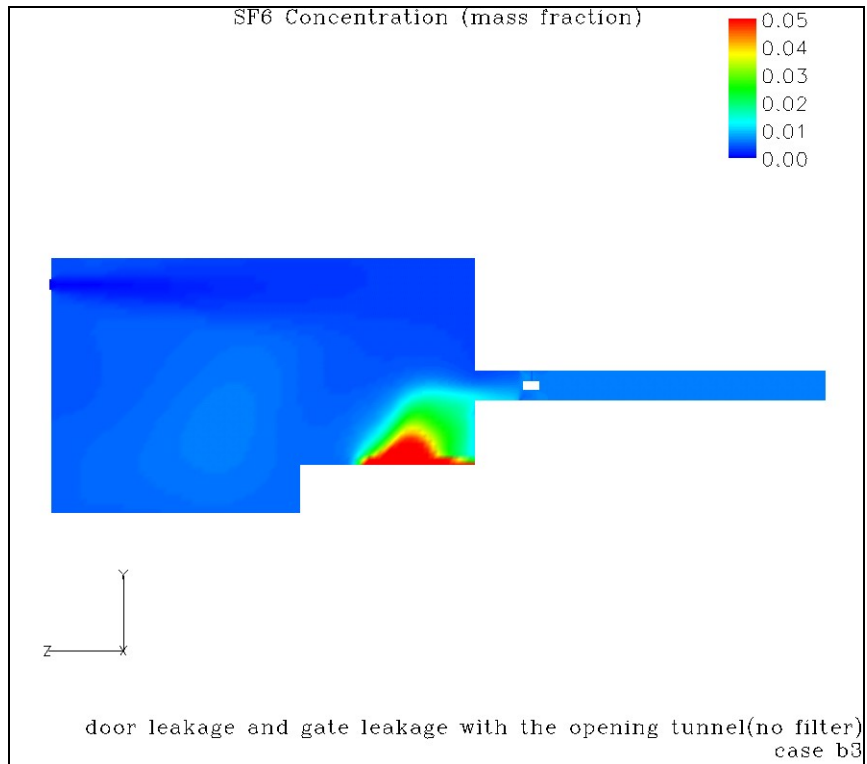


圖4-58 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b3，截面 a

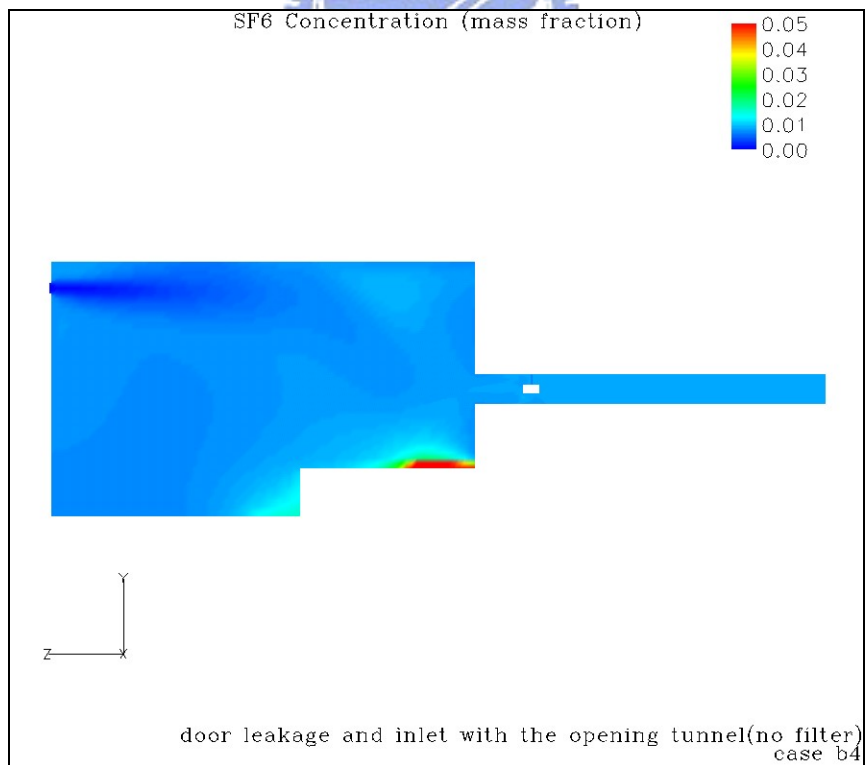


圖4-59 流場 SF<sub>6</sub> 濃度分佈圖，case b4，截面 a

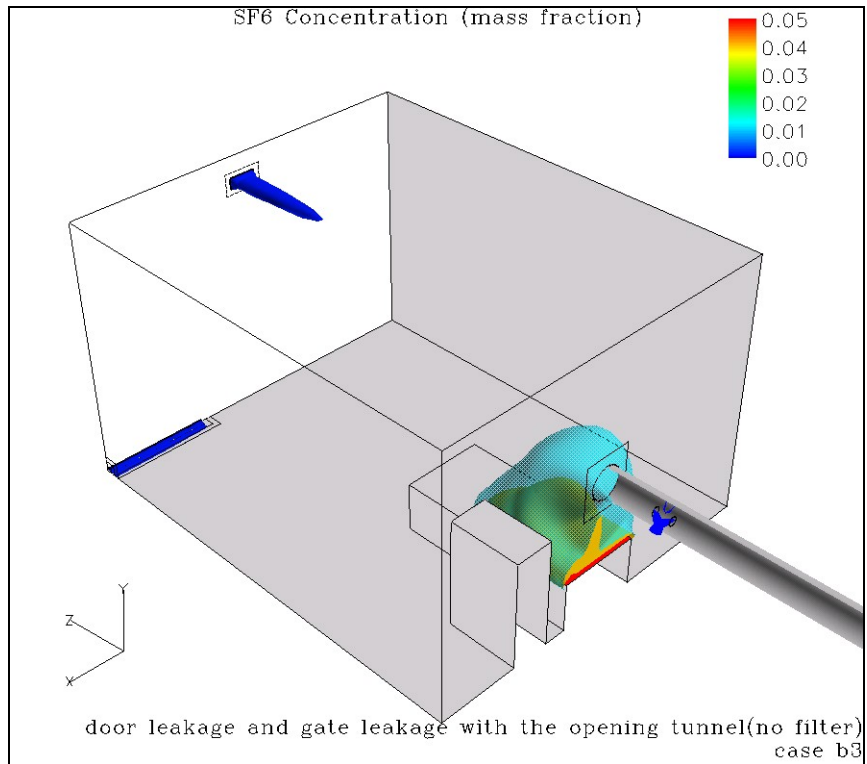


圖4-60 流場 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case b3

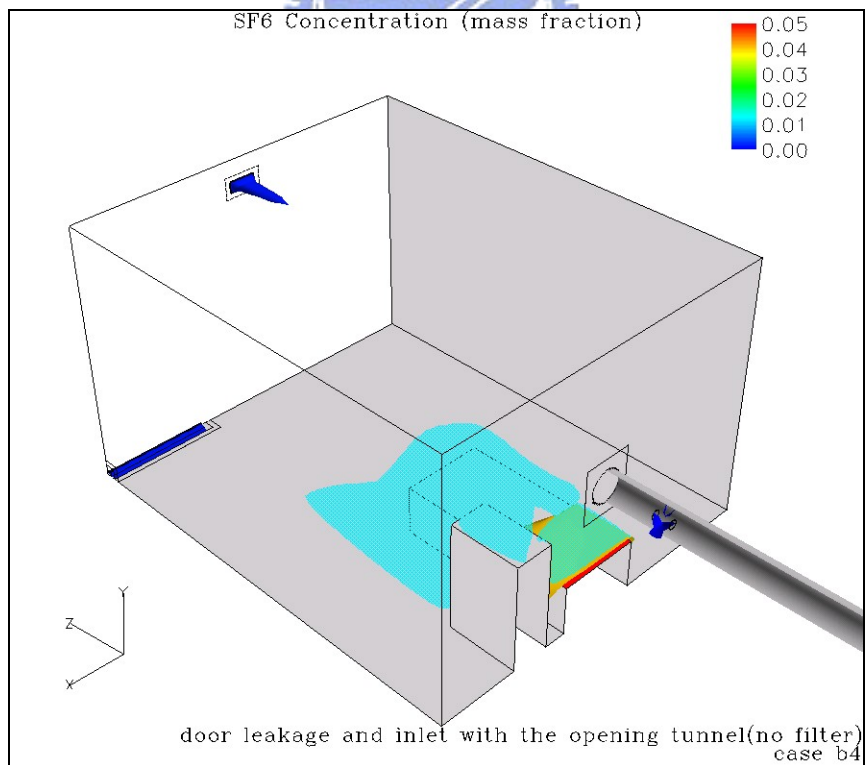


圖4-61 流場 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case b4

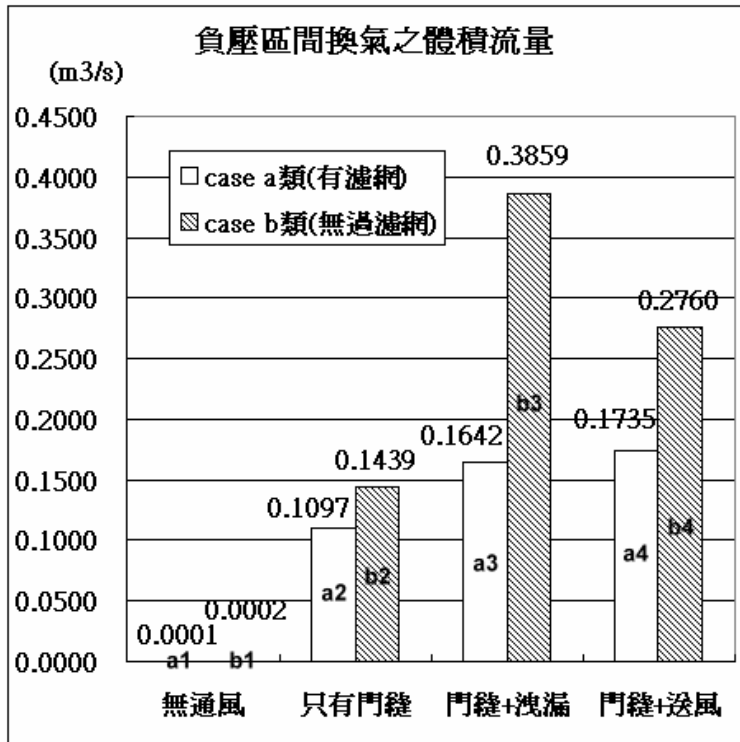


圖4-62 區間內流出至外界的空氣體積流率圖

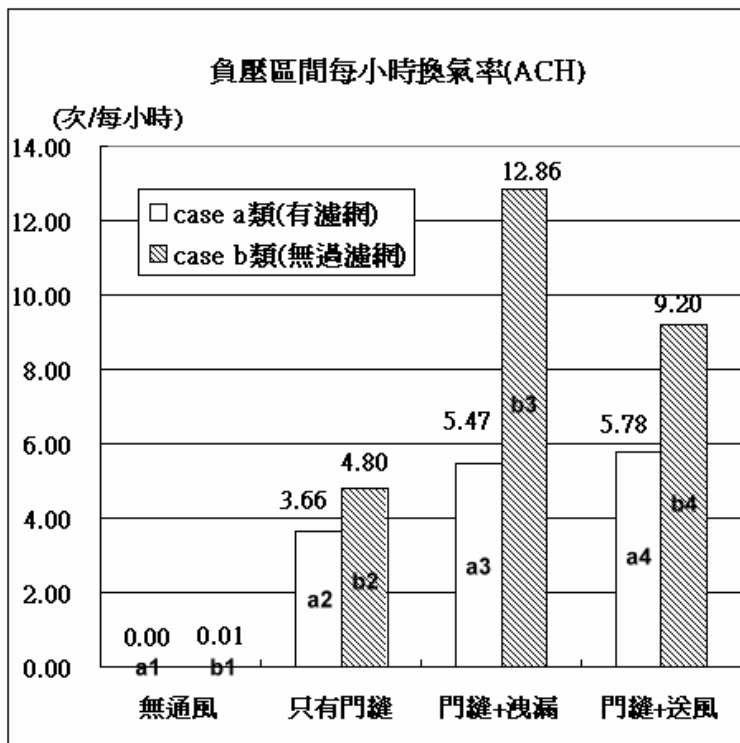


圖4-63 負壓區間內每小時換氣率(ACH)圖

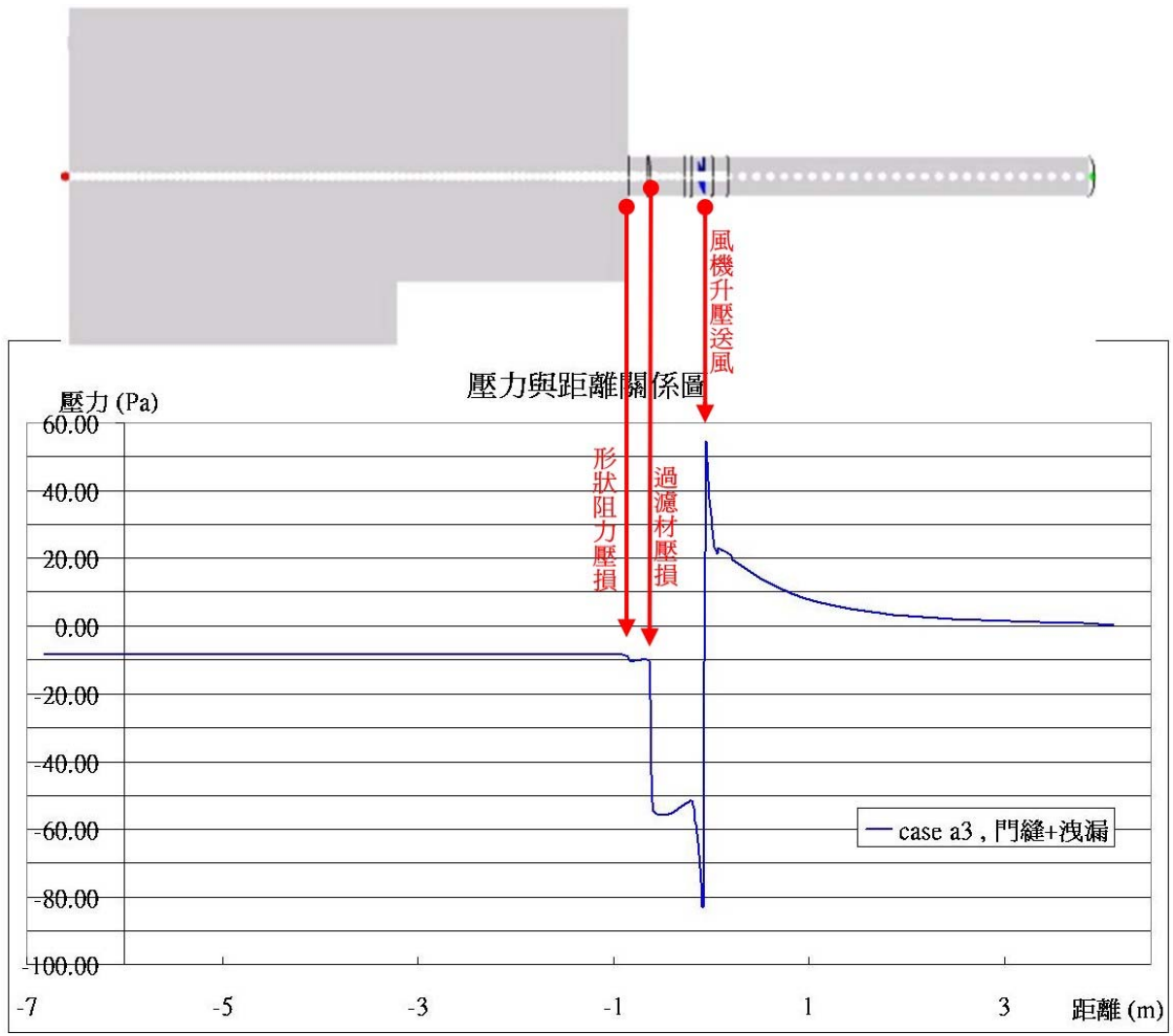


圖4-64 壓力與距離關係圖相對於房內各點位置對照圖



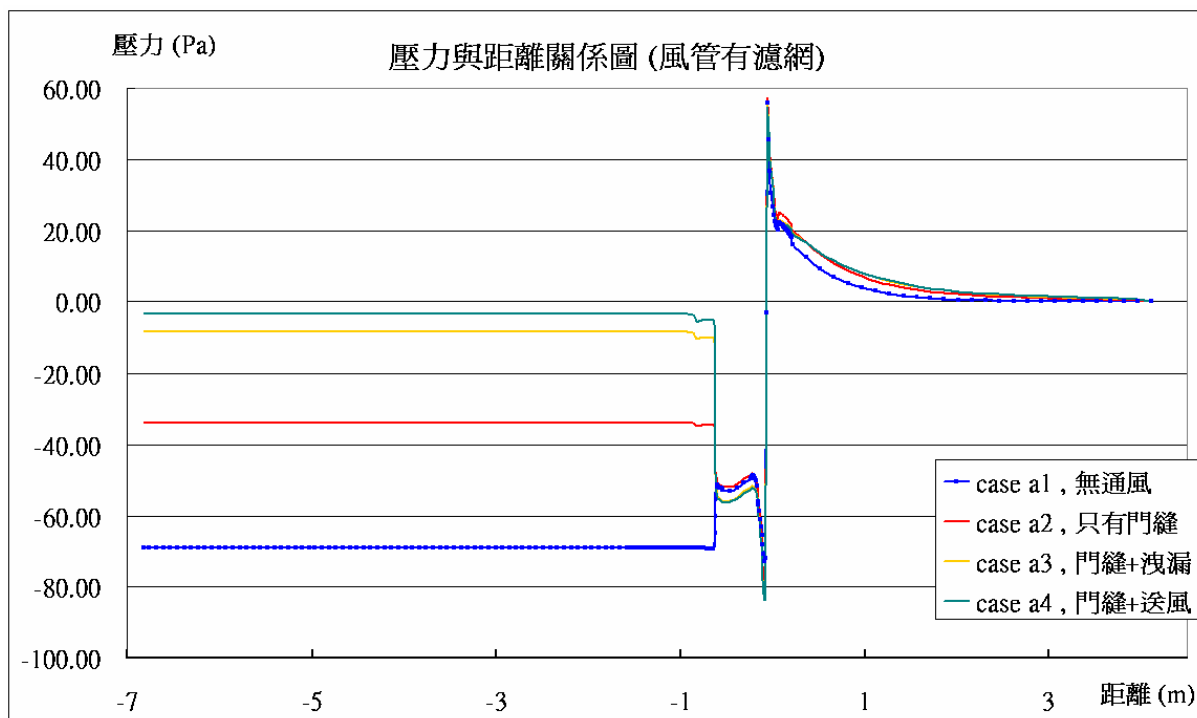


圖4-65 壓力與距離關係圖 (型別:case a1-a4)

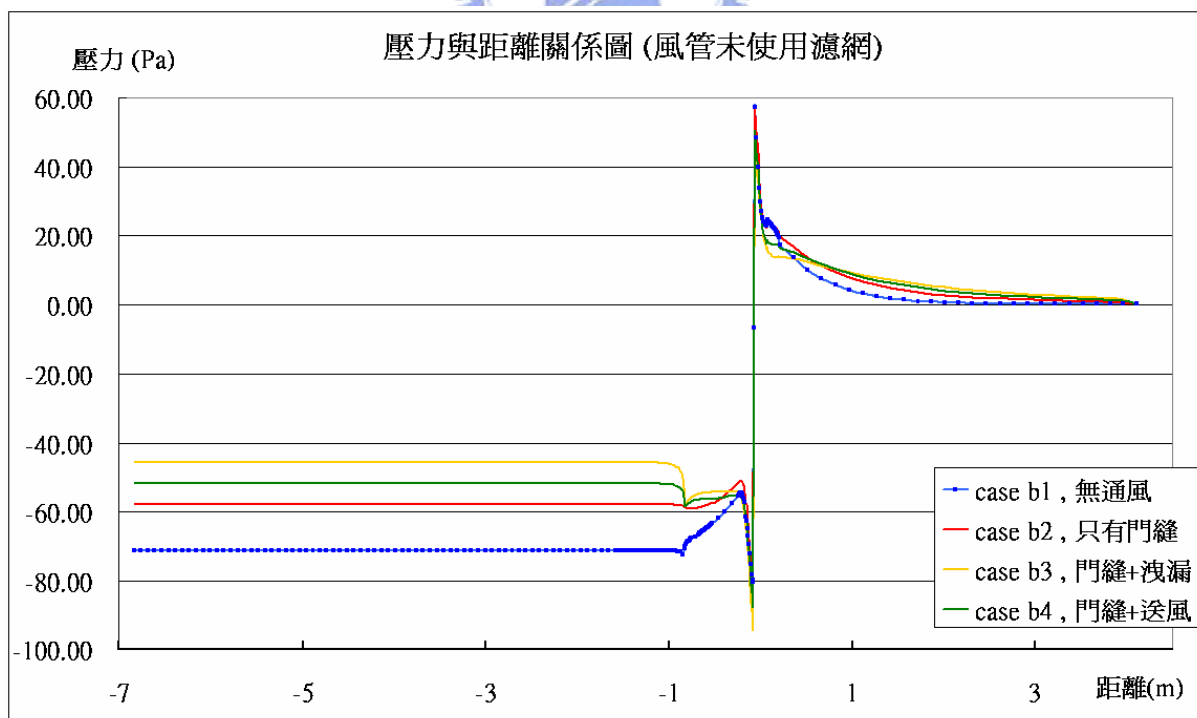


圖4-66 壓力與距離關係圖 (型別:case b1-b4)

圖 4-67 則為同邊界設定的型別(使用門縫與洩漏口均為壓力邊界的型別，case a3、b3)之壓力曲線與距離關係圖，可得知差異性在於如有使用過濾材時其過濾材部分會造成大部分的消耗。而在房內與風管接口端則以無濾網材設置的型別損耗較多。

至於濃度分析則是以床面污染源質量流率與濃度過大網格數量統計及整體區間內累積有毒氣體總量三者作為討論。

由於在邊界上的設定是以床面的部分設定為固定濃度邊界，因此無法得知有毒氣體的流量。為了得知流量關係則需要再以結果加以計算。計算方式乃是採用與床面發生源相接的網格計算差分結果，再乘上相關係數而得，如式(4.3)所示

床面污染物 SF6 的質量流率(kg/sec)

$$F_{sf6} = \sum_{i=1}^k \rho_i \cdot D_{SF6} \cdot \frac{1-C_i}{\frac{dx}{2}} \cdot A_i \quad (4.3)$$

式(4.3)，其中

$D_{SF6}$  為其擴散率，於表 2-3 可知為  $3.004e-05$  [m<sup>2</sup>/s]

經過統計之後，所得到的結果如圖 4-68 所示。而由此可知，由床面發散的濃度幾乎一致，而除了 case b1 之外都在流量約每秒 0.8 公克左右。原因是因為 case b1 所累積的總量高，而使床面污染物無法順利擴散所致。

另一方面以濃度過高的累計區域觀點來看，區間內某區域有過高濃度區域時，則此處就有危害人員健康的顧慮。因此本文需做此方面分析。計算方式為判斷區間內各網格，如超過重量濃度 0.1 以上者，則計其網格體積大小，而後將超過此濃度範圍的總網格體積量累計並除以整體房間大小，並最後以百分比表示。結果如圖 4-69 所示。

由圖 4-69 可知在換氣條件為無通風的型別之中，由於無法排除氣體，因此整體房內 100% 範圍都受到過高濃度的污染。而其餘均在千分之一以下的範圍。由圖可知原則上以換氣量越大則房內過高濃度污染的網格範圍越少，但是如 case a2 (0.0463%) 與 case a3 (0.0602%)，則為相反。反而換氣率較低者(型別 case a2)，過高污染的網格範圍低。因此顯示室內通風觀點仍須考慮整體流場是否會發生因噴流現象所產生的迴流現象，否則可能會導致有毒氣體被吹散的情形發生，而使過高污染範圍升高的趨勢。

關於區間內累積有毒氣體的計算方式，由於本文採用重量濃度作為計算基準，但以數值計算而言，於計算速度場與壓力場時均以有限體積法計算，採用分格的體積單位，因此需先轉換成為體積濃度，再將此比例乘以此單位格體積，而後乘上密度，所得的即是區間內的累積總量。

$$\text{累積有毒氣體SF}_6\text{總重} = \sum_{i=1}^k \rho_{\text{SF}_6} \cdot V_i \cdot \frac{\frac{C_i}{146.06}}{\frac{C_i}{146.06} + \frac{1-C_i}{28.9}} \quad (4.4)$$

式(4.4)其中，146.06 為 SF<sub>6</sub> 的分子量，28.9 為空氣的分子量，本文遵守理想氣體體積定律，因此換算體積濃度則可用莫耳數比例。

而計算後的有毒氣體累積總重整理為如圖 4-70 所示。

圖 4-70 為區間內累積有毒氣體的總重統計圖，顯示無通風情形下則不論在過高濃度網格方面或是總累積量均十分的高，而 case b1 更呈現出 352kg，結果為因不斷迴流至區間內而且無通風的情形下所造成的現象。其餘型別均在 1kg 以下。最低累積量者為 case a2(0.32kg 者)，代表低通風量而流場平順較低迴流者累積程度低，而雖通風量大者(如型別 case a4、b3)則會因過大噴流使房內流場流動不平順，而累積總量稍高。

因此，以穩態計算的模式下顯示負壓區間設置上最好是以高通風量並且無迴流情形發生較佳，如可將洩漏口直接設置面對房內與風管接口端相對處，而可避免不必要的迴流發生。當然換氣量仍是十分需要考量，但是過大的換氣量則會使房內工作人員不適，而且十分耗費能源，因此最好均配合考慮之。

#### 4.4 暫態計算負壓隔離區間開門過程結果

本節討論則為第二研究部分的結果，設定條件則是暫態的計算過程。方式是時間零秒時採用預先計算收斂的穩態流場結果，以滑移網格方式使房門做滑移開啟動作，並計算每一時間步進流場。由於每一間隔時間為 0.0125 秒，總共為 4 秒過程，因此共有 320 個時間步進。然而限於篇幅有限，僅展示較具代表性的時間步進結果，分別是 t=0 秒(未

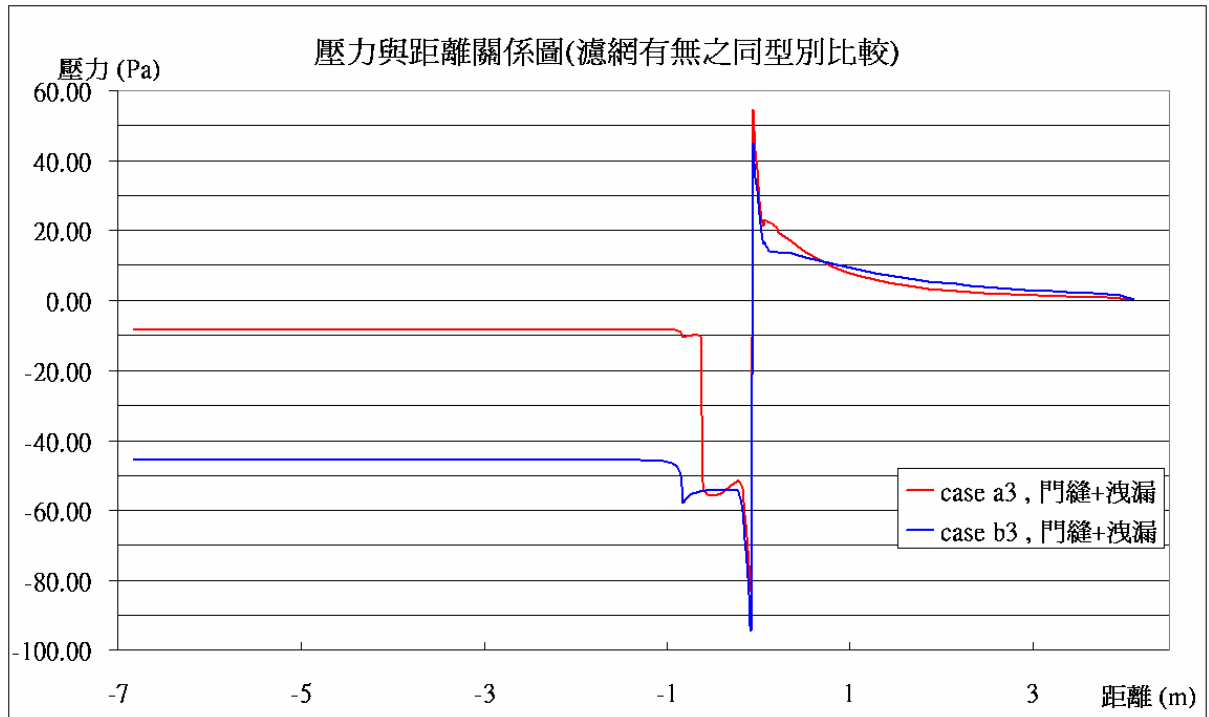


圖4-67 壓力與距離關係圖(型別:case a3 與 case b3 比較)

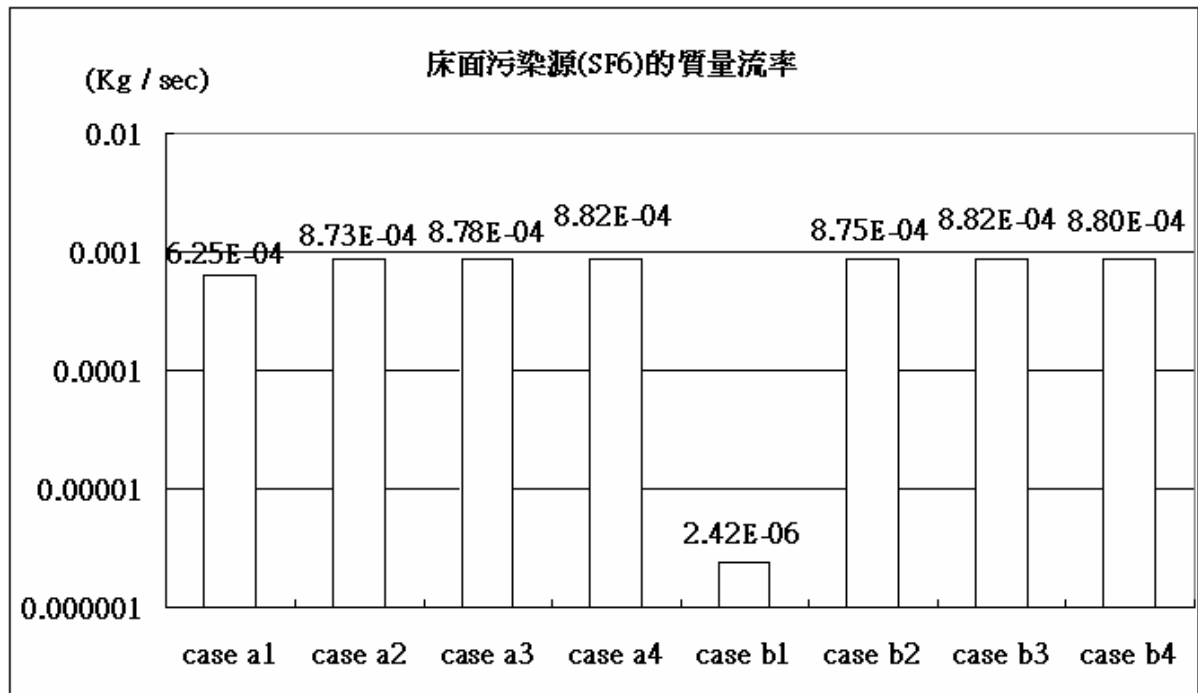


圖4-68 由床面污染源(SF6)擴散的質量流率統計圖(對數座標)

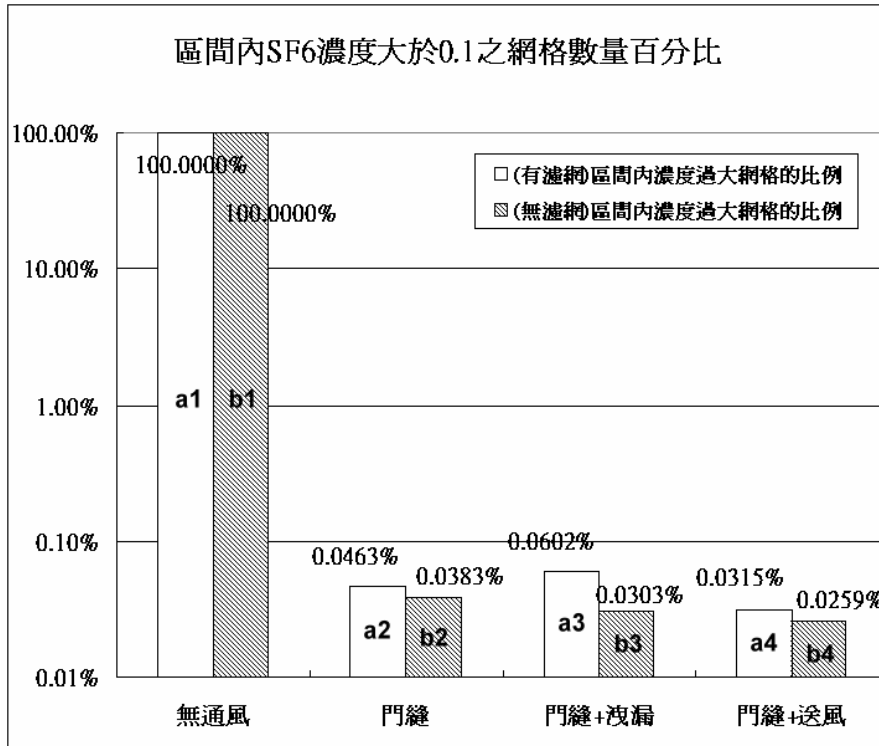


圖4-69 負壓區間內有害氣體濃度過大之網格數量百分比統計圖(對數座標)

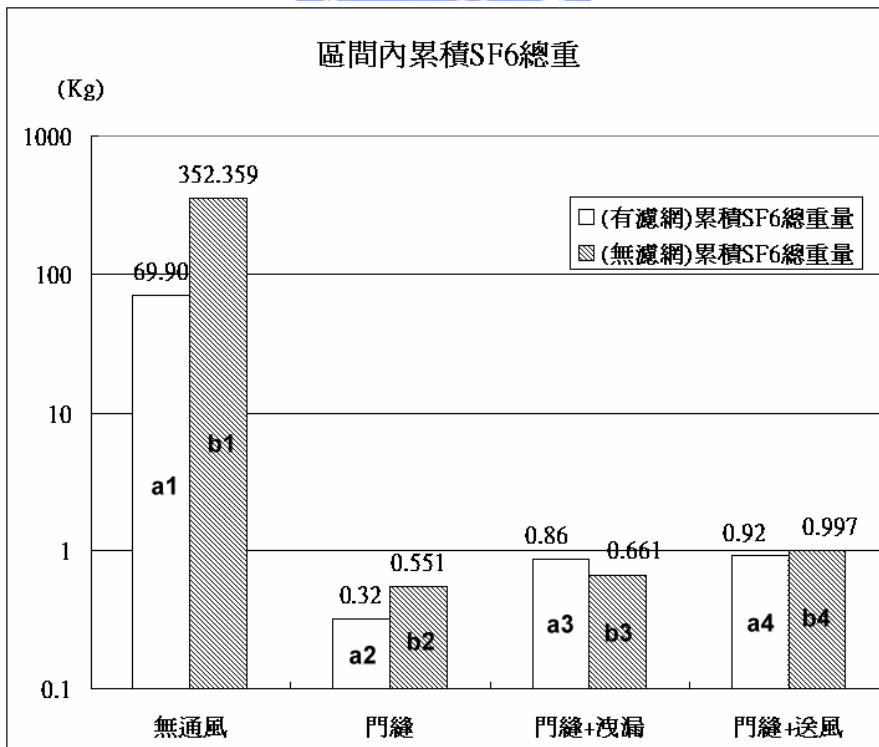


圖4-70 負壓區間內有害氣體累積總質量統計圖(對數座標)

開啟房門前的狀態)、 $t=0.1$  秒(剛開門的瞬間)、 $t=1$  秒(房門開啟 1/4)、 $t=2$  秒(房門開啟 1/2)、 $t=3$  秒(房門開啟 3/4)、 $t=4$  秒(房門完全開啟)。

而為清楚顯示房門開啟位置特別以箭頭表示，紅色箭頭置於滑移門開口前緣，而綠色箭頭置於滑移門另一邊的後緣部分，如圖 4-71 所示其兩箭頭放置於灰色門上方處，如此可察覺行進位置。而由可由此圖發現洩漏口下方有粗黑框，此黑框代表最後房門開啟停止位置。

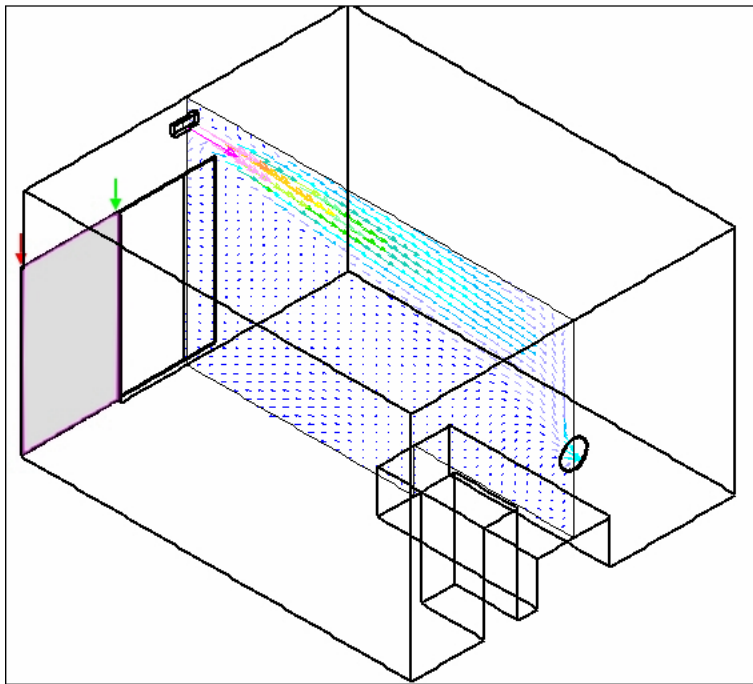
圖 4-71 為暫態開門過程於截面 a 的速度分佈圖，分別為各時間的速度分佈圖，藉此可察覺流場隨時間變化的過程。圖 4-71(甲)為  $t=0$  秒的速度分佈圖，可知於開啟房門前，區間內的洩漏口進氣速度約為  $2.23\text{m/s}$  左右。而圖 4-71(乙)為  $t=0.1$  秒的結果顯示，房門開啟的瞬間，洩漏口的速度則變化為  $0.36\text{m/s}$ ，因此與(甲)對照則可知房門開啟瞬間，洩漏口流速迅速下降。其原因則為壓力突然上升，且外界新鮮空氣改由較易通過的房門開口進入，而較少經由較難通過的門縫或洩漏口進入，所以洩漏口流速下降。圖 4-71(丙)為  $t=1$  秒於截面 a 之速度分佈圖，顯示在流速迅速下降的過程時，洩漏口噴流氣體整體速度也降低。而在靠近風管接口的部分則有速度提高的趨勢，由  $t=0$  秒時的  $0.8\text{m/s}$  左右提升至  $1.5\text{m/s}$ ，顯示抽氣量因房門開啟的過程迅速提高。圖 4-71(丁)(戊)(己)則各為時間於 2、3、4 秒於截面 a 的速度圖，顯示於開啟房門後半的時間狀態下，噴流流場逐漸減弱，但削弱的速度已經變慢，未如 0 到 2 秒時變化較為劇烈的結果。

圖 4-72 為暫態開門過程於截面 c 的速度分佈圖，其截剖房門的內外位置，因此可於約三秒後的時間觀察區間內外流場連接的情形。圖 4-72(甲)為  $t=0$  秒時於截面 c 的速度分佈圖，由圖可知在未開啟房門時，區間內流場係受到洩漏口及門縫的進氣而產生的流動現象。圖 4-72(乙)為  $t=0.1$  秒的結果，可查察房內於門縫處的流速減低，而阻礙物上方因開門處空氣流入的影響下產生迴流。圖 4-72(丙)(丁)則為  $t=1$  及 2 秒的速度分佈圖，可知門縫處的流速仍隨時間逐漸減低，而迴流作用則增強。圖 4-72(戊)(己)為  $t=3$  及 4 秒的速度分佈，於(己)可知房門已完全打開，內外流場已經與此截面處相接的情形。故可由(戊)(己)兩圖可知當開門作用影響下，後期的進氣情況較為和緩，相通後在門附近也大約為  $0.1\text{m/s}$  的流速。

圖 4-73 為暫態開門過程於截面 a 的壓力分佈圖。圖 4-73(甲)為  $t=0$  秒時，未開門的區間內外壓力情形，可知區間內的壓力大約在  $-11.4\text{Pa}$  的負壓情況，走廊的壓力則與外界相通，呈現  $0\text{Pa}$  左右的壓力值。因此可知區間內外在一般狀態下為  $-11\text{Pa}$  左右的差距。圖 4-73(乙)為  $t=0.1$  秒(房門剛開啟)的壓力分佈圖，顯示當開啟房門後，區間內的壓力則變成約  $-1.4\text{Pa}$  的情形，因此可知此過程作用使區間內壓力急升。圖 4-73(丙)(丁)為  $t=1$  及  $2$  秒的壓力分佈圖，可知在這時間下，區間內與外界壓力差距逐漸減少，而區間內壓力也升高至約  $-0.03\text{Pa}$  左右。因此亦可說明洩漏口及門縫在此時間下，流速逐漸減低的原因。圖 4-73(戊)(己)為  $t=3$  及  $4$  秒的壓力分佈圖，可知開門作用的後期部分，區間內的壓力幾乎為零，和外界差距甚小。因此由以上可知當開門作用下，對於區間內的負壓環境則很難維持。

圖 4-74 為暫態開門作用下於區間內與走廊的  $\text{SF}_6$  等濃度面圖。等濃度面的設定則延續前小節設定，並增加藍色亦為接近極低污染(濃度  $0.004$ )濃度面，以便觀測流場情形。

圖 4-74(甲)為  $t=0$  秒的未開門前的等濃度面情形，可知在區間吸入外氣的情形下，門縫與洩漏口附近濃度均低，而高濃度污染範圍均集中在床面附近，至於房內大部分的範圍則是介於濃度  $0.012$  與  $0.004$  之間。而  $t=0$  秒的等濃度面分佈現象則與 case a3 相同，可與圖 4-29 相互對照。圖 4-74(乙)為  $t=0.1$  秒的剛開門的等濃度面情形，顯示在剛開門的一瞬間，房內整體而言濃度面分佈的情形，無太大改變。圖 4-74(丙)(丁)則是  $t=1$  及  $2$  秒的時間下的等濃度面圖，顯示由洩漏口與門縫流進的流體減少影響下，低濃度的區域難以繼續維持，因此可察覺噴流的藍色範圍(濃度面  $0.004$  及  $0.0012$ )縮小的趨勢。而由開門作用下造成的開口，使外界潔淨空氣進入，稀釋室內之污染空氣，因此而有濃度  $0.0012$  及  $0.004$ (深藍色與藍色)的等濃度面沿著開口與門的面產生。圖 4-74(戊)(己)則是  $t=3$  及  $4$  秒的時間下之等濃度面圖，由圖可知在此時間狀態之下，靠近牆壁側的房門開口部分的等濃度面(濃度  $0.004$  及  $0.0012$ )有向內移動的趨勢，顯示新鮮空氣持續注入房內的現象，而靠近房門的開口部分則因流入房內的流體流速逐漸減慢的影響下，等濃度面  $0.0012$  (深藍色)幾乎和房門門緣平行重疊。由牆面至門緣仔細觀察可看出整個



STAR  
D  
PROSTAR 3.10

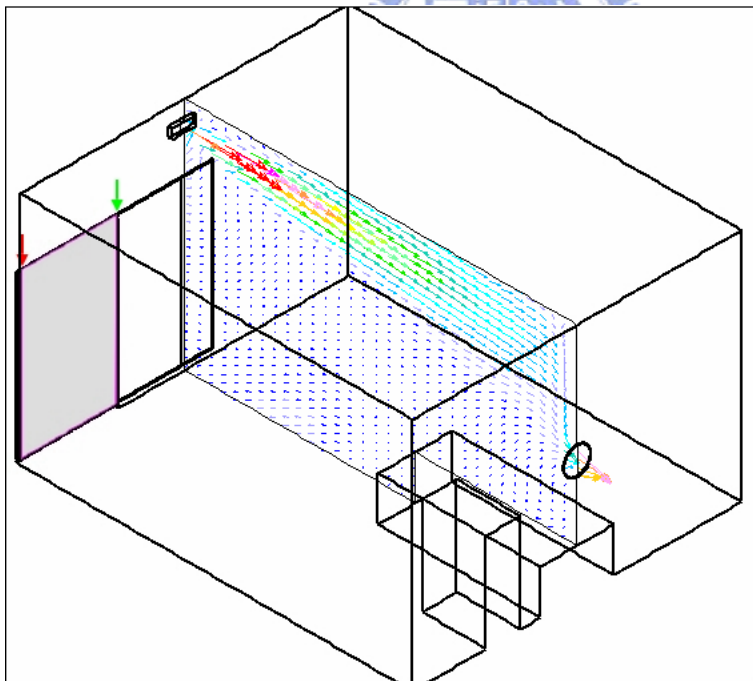
24-May-04  
VELOCITY MAGNITUDE  
M/S  
ITER = 1973  
LOCAL MX= 2.232  
LOCAL MN= 0.2757E-06  
\*PRESENTATION GRID\*

- 2.232
- 2.072
- 1.913
- 1.754
- 1.594
- 1.435
- 1.275
- 1.116
- 0.9565
- 0.7971
- 0.6376
- 0.4782
- 0.3188
- 0.1594
- 0.2682E-06



NPIRs operation with transient analysis of opening door event by moving mesh  
case c  
Time=0 sec

(甲)



STAR  
D  
PROSTAR 3.10

24-May-04  
VELOCITY MAGNITUDE  
M/S  
TIME = 0.100000  
LOCAL MX= 1.710  
LOCAL MN= 0.6884E-03  
\*PRESENTATION GRID\*

- 1.710
- 1.588
- 1.465
- 1.343
- 1.221
- 1.099
- 0.9772
- 0.8551
- 0.7331
- 0.6110
- 0.4889
- 0.3669
- 0.2446
- 0.1226
- 0.6884E-03



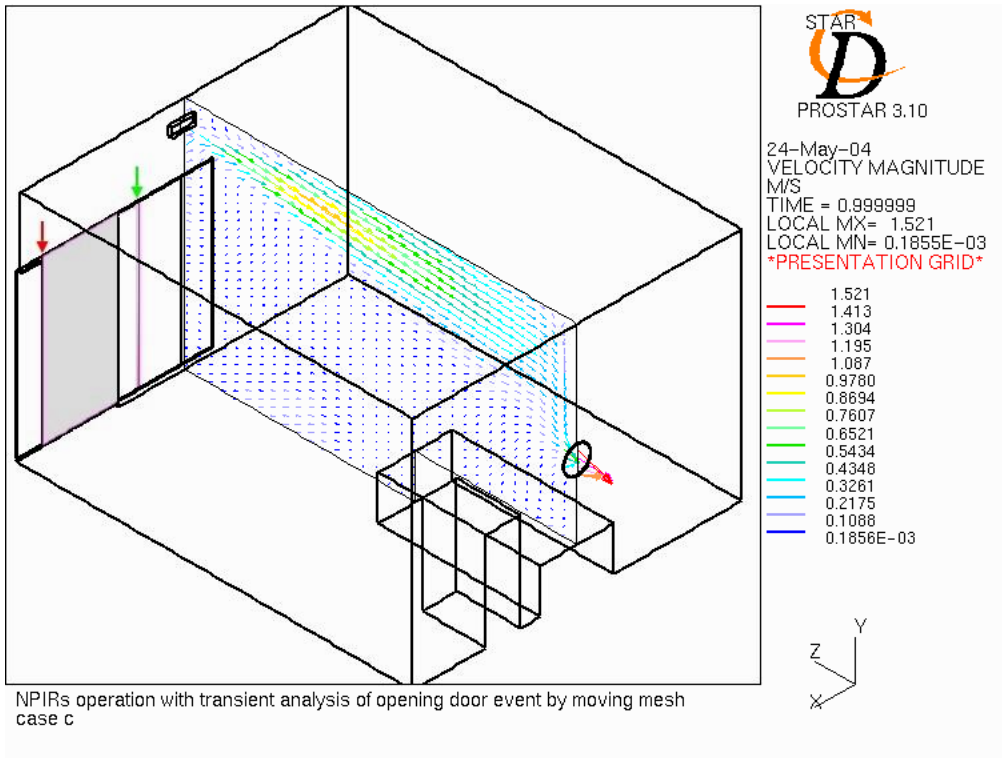
NPIRs operation with transient analysis of opening door event by moving mesh  
case c

(乙)

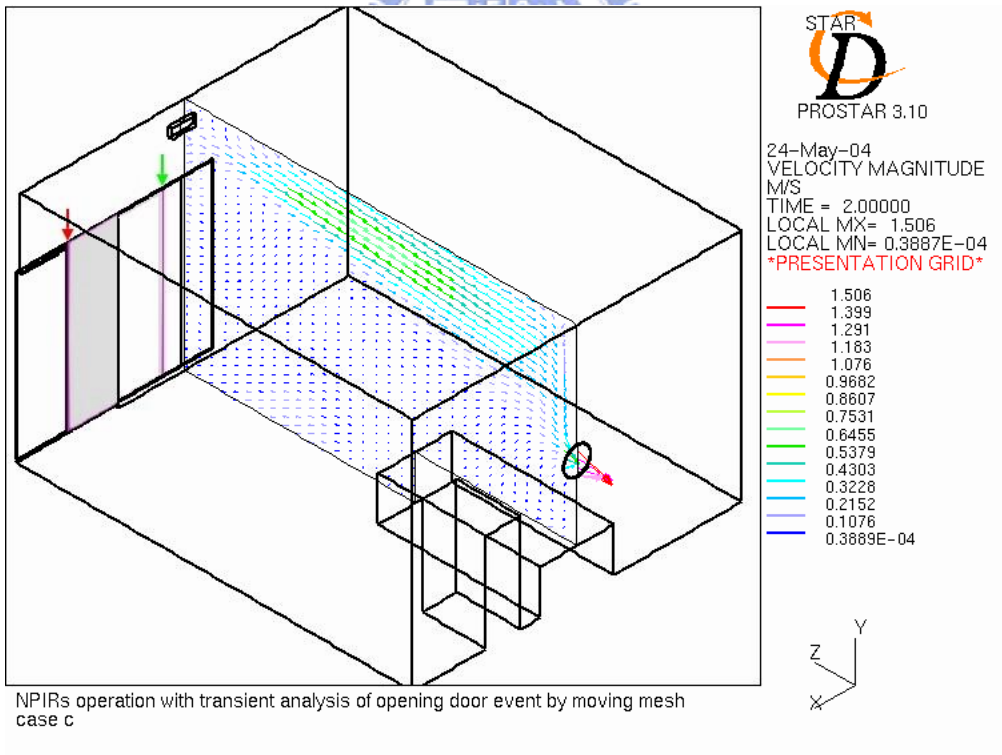
圖4-71 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。

(甲)t=0sec (乙)t=0.1 sec



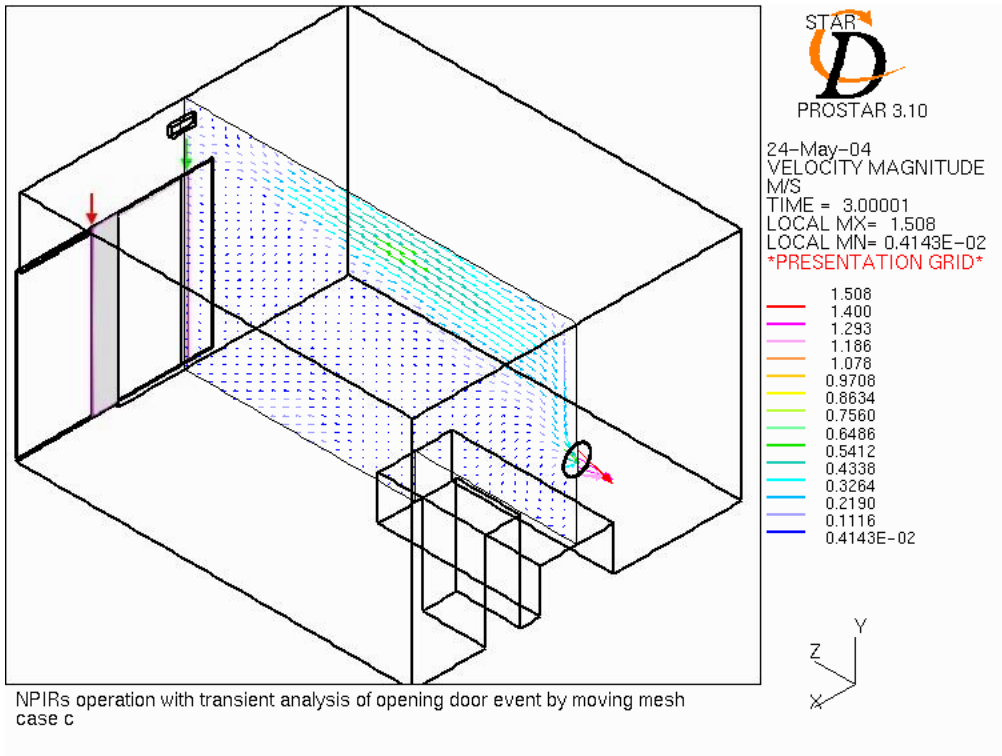


(丙)

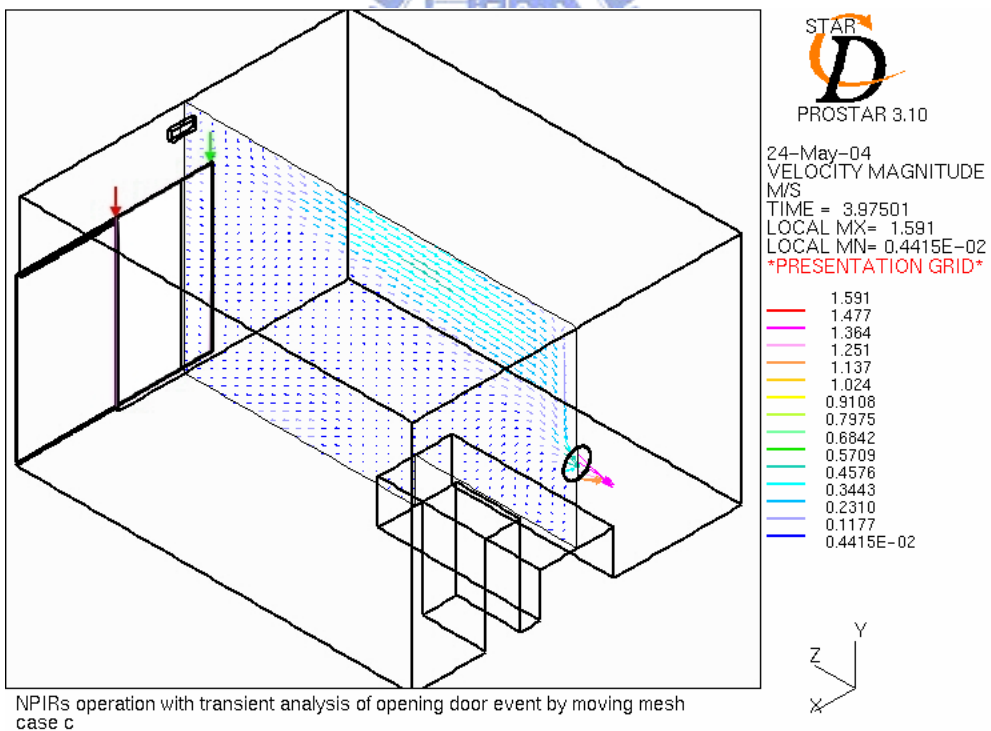


(丁)

圖4-71(續 1) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。(丙)t=1 sec (丁)t=2 sec

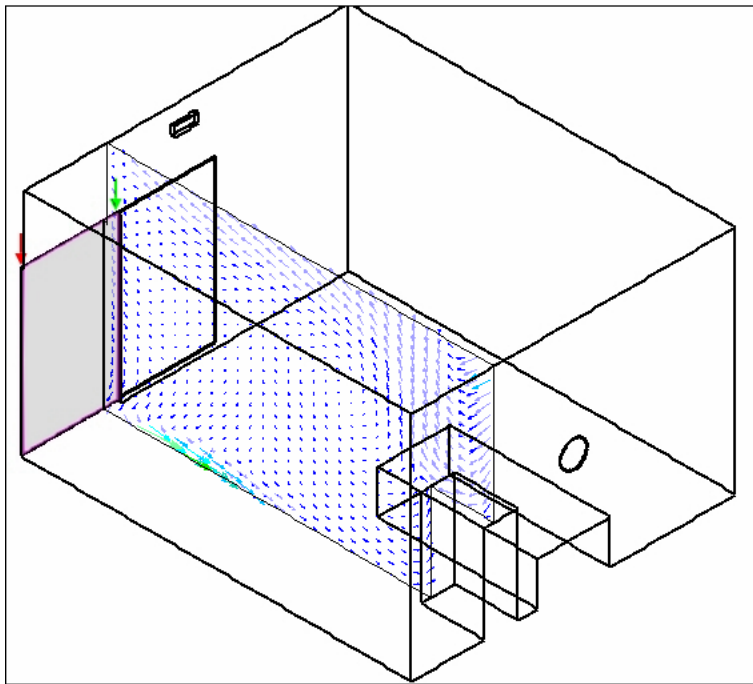


(戊)



(己)

圖4-71(續 2) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。(戊)t=3 sec (己)t=4 sec



STAR  
D  
PROSTAR 3.10

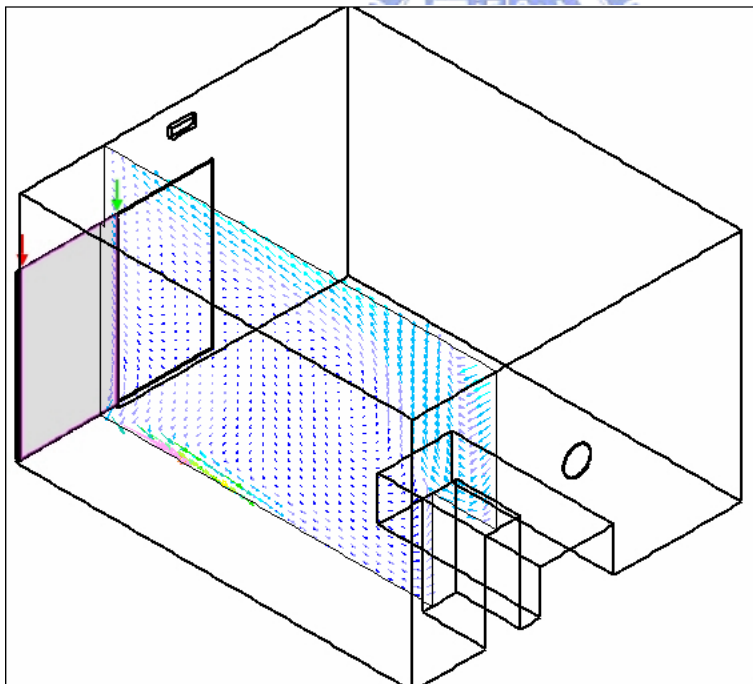
24-May-04  
VELOCITY MAGNITUDE  
M/S  
ITER = 1973  
LOCAL MX= 1.960  
LOCAL MN= 0.3528E-06  
\*PRESENTATION GRID\*

1.960  
1.820  
1.680  
1.540  
1.400  
1.260  
1.120  
0.9798  
0.8399  
0.6999  
0.5599  
0.4199  
0.2800  
0.1400  
0.3278E-06



NPIRs operation with transient analysis of opening door event by moving mesh  
case c  
Time=0 sec

(甲)



STAR  
D  
PROSTAR 3.10

24-May-04  
VELOCITY MAGNITUDE  
M/S  
TIME = 0.100000  
LOCAL MX= 1.036  
LOCAL MN= 0.8963E-03  
\*PRESENTATION GRID\*

1.036  
0.9624  
0.8885  
0.8145  
0.7405  
0.6666  
0.5926  
0.5187  
0.4447  
0.3707  
0.2966  
0.2226  
0.1486  
0.7486E-01  
0.8963E-03

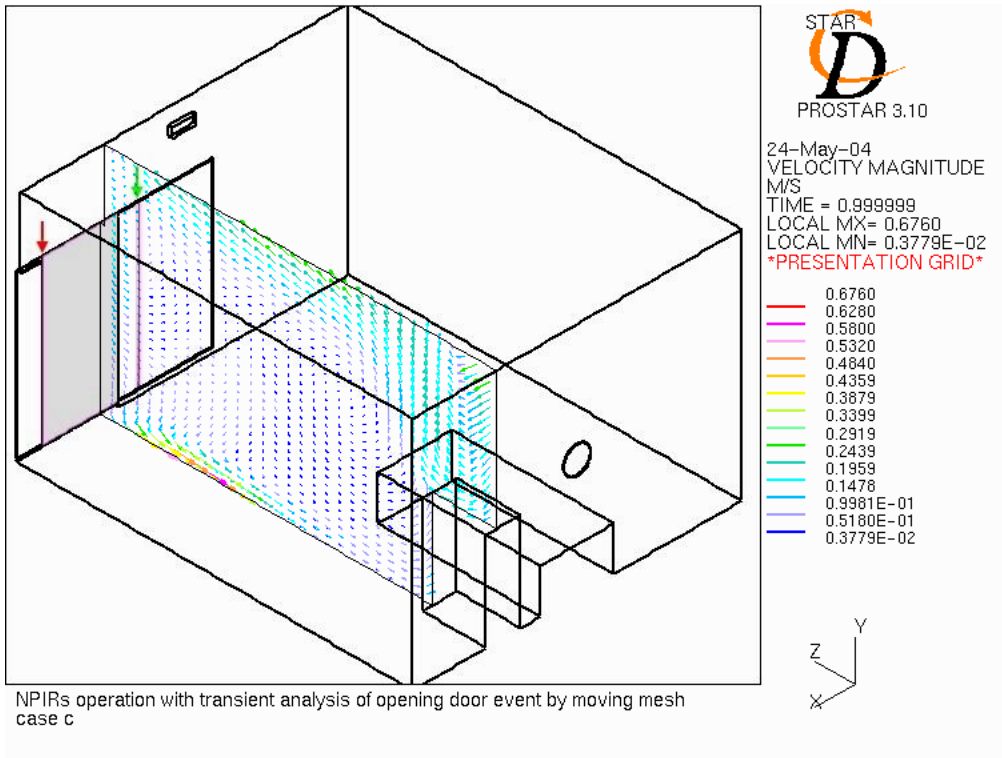


NPIRs operation with transient analysis of opening door event by moving mesh  
case c

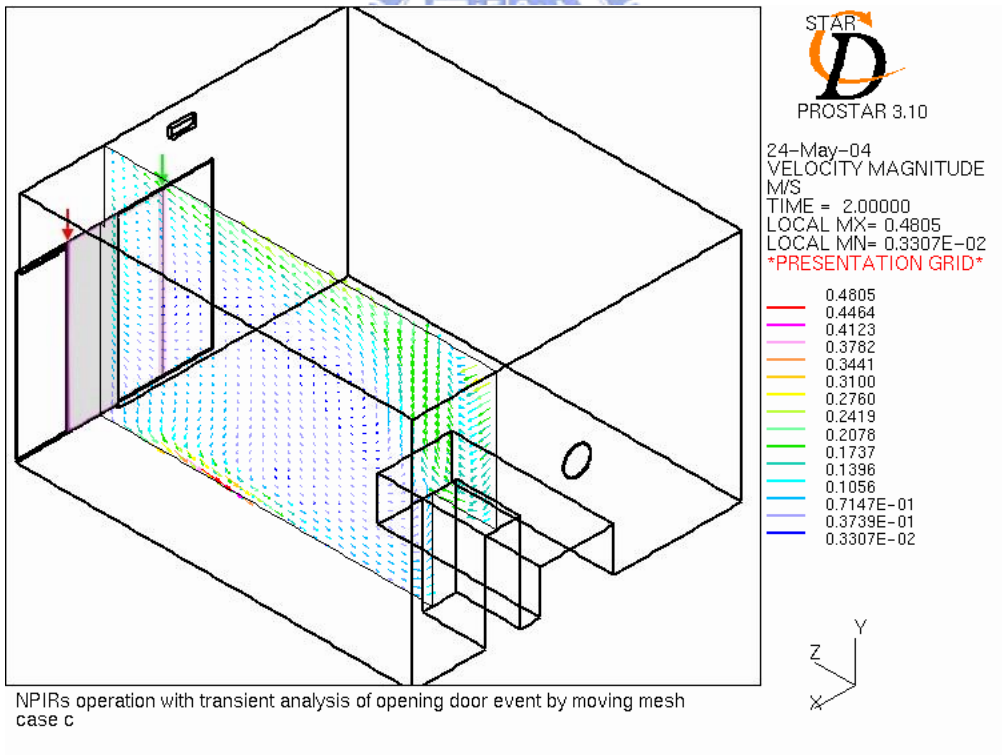
(乙)

圖4-72 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 c，房外走廊及 part I 部分。

(甲)t=0 sec (乙)t=0.1 sec

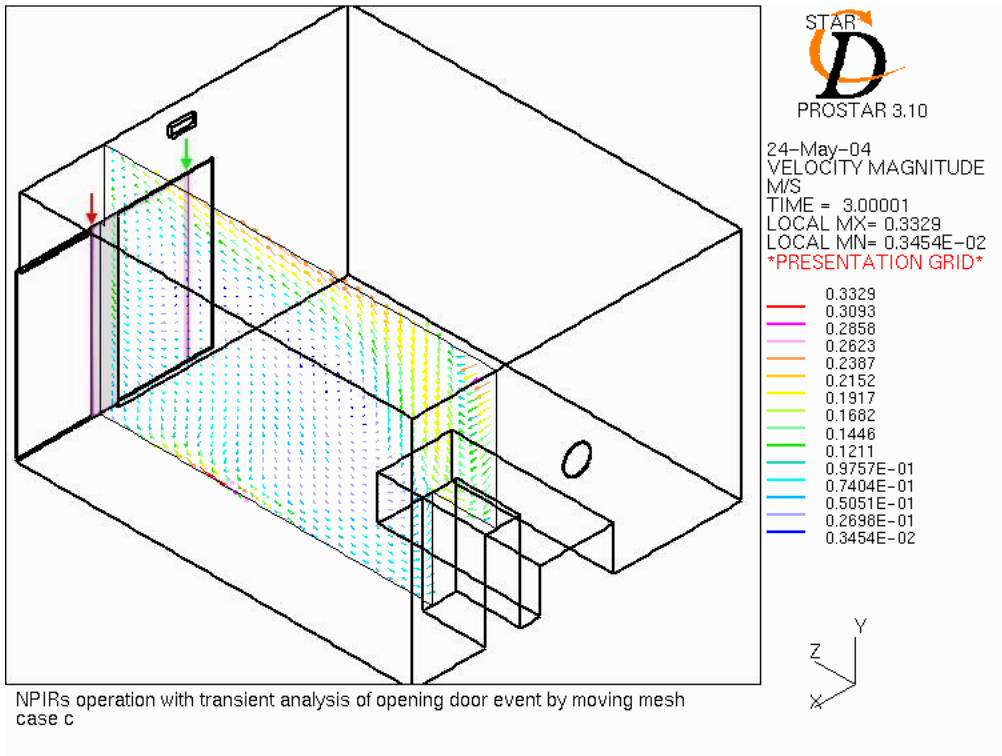


(丙)

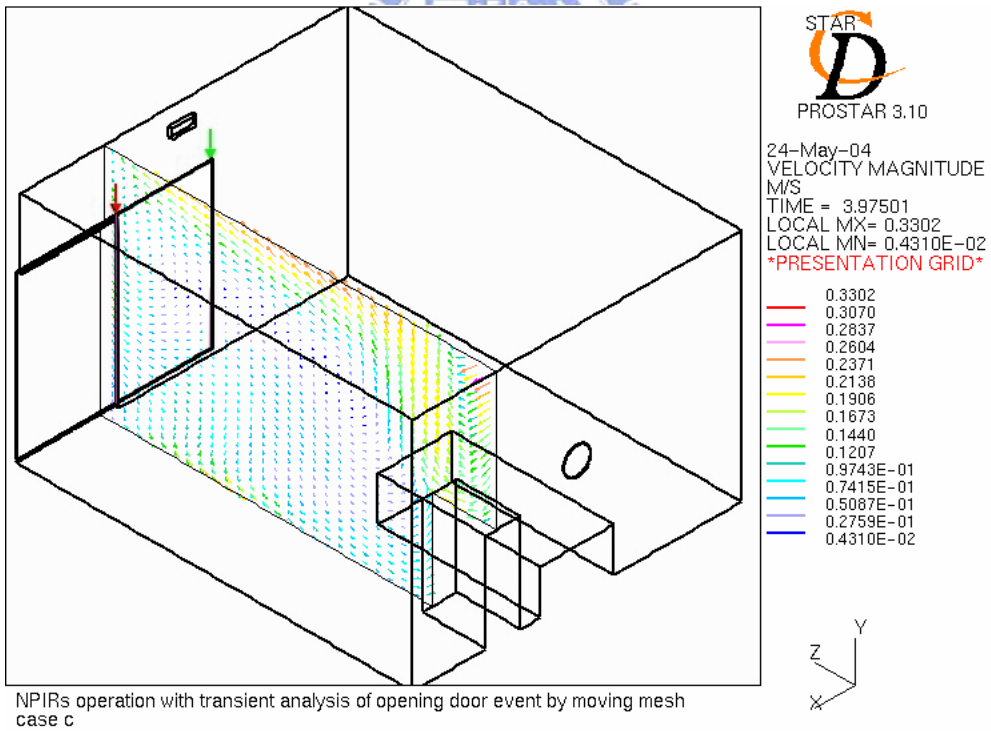


(丁)

圖4-72 (續 1) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 c，房外走廊及 part I 部分。(丙)t=1 sec (丁)t=2 sec

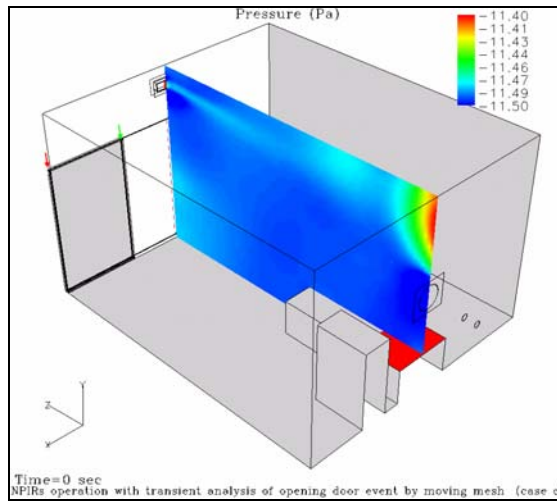


(戊)

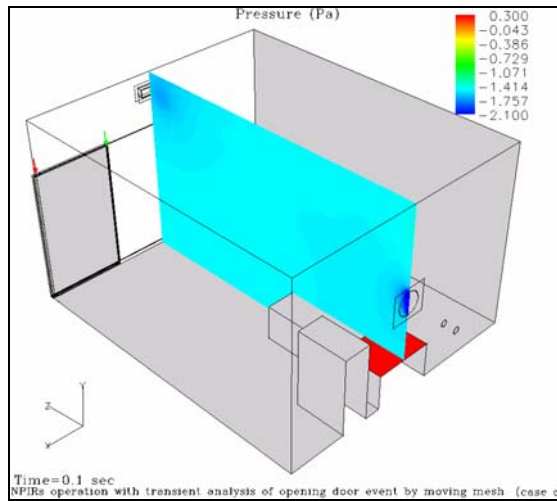


(己)

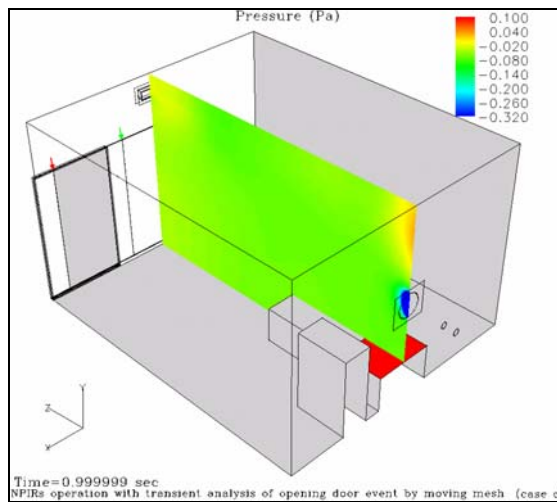
圖4-72 (續 2) 暫態開門過程流場速度分佈圖，case c，截面 c，房外走廊及 part I 部分。(戊)t=3 sec (己)t=4 sec



(甲)

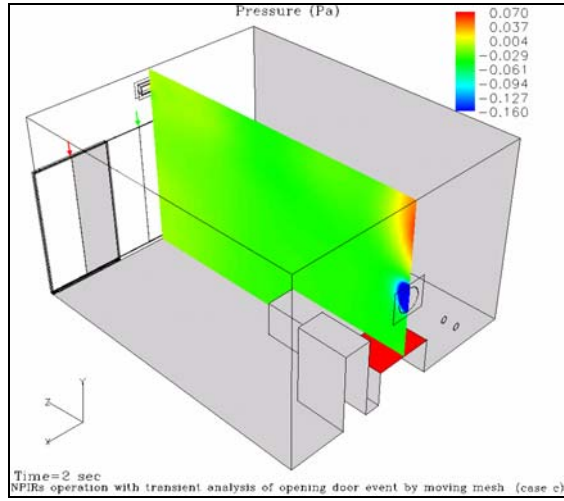


(乙)

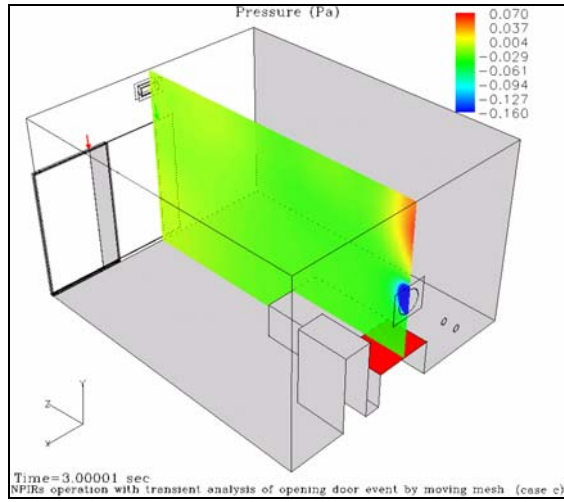


(丙)

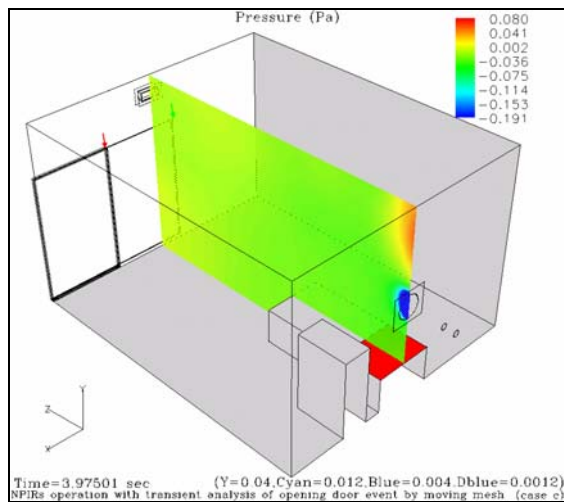
圖4-73 暫態開門過程壓力分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。(甲)t=0 sec (乙)t=0.1 sec(丙)t=1 sec



(丁)



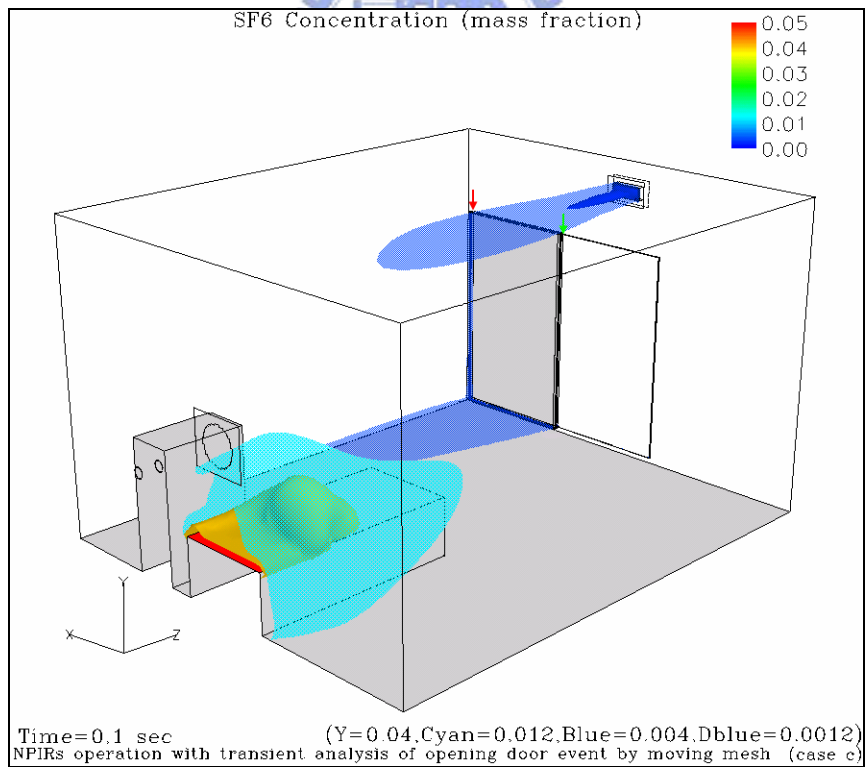
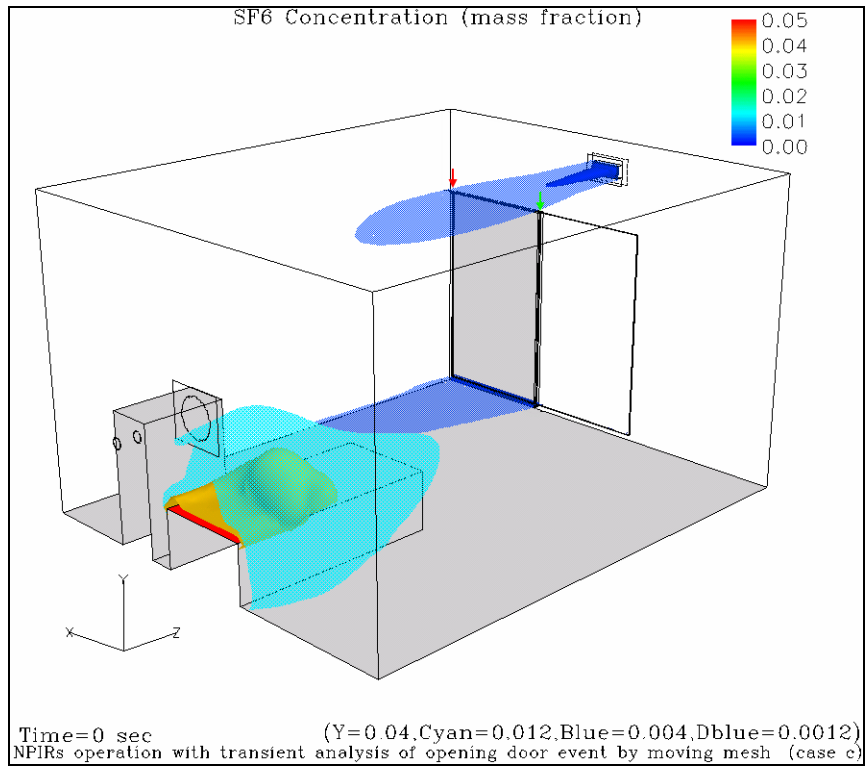
(戊)



(己)

圖4-73(續 1) 暫態開門過程壓力分佈圖，case c，截面 a，房外走廊及 part I 部分。

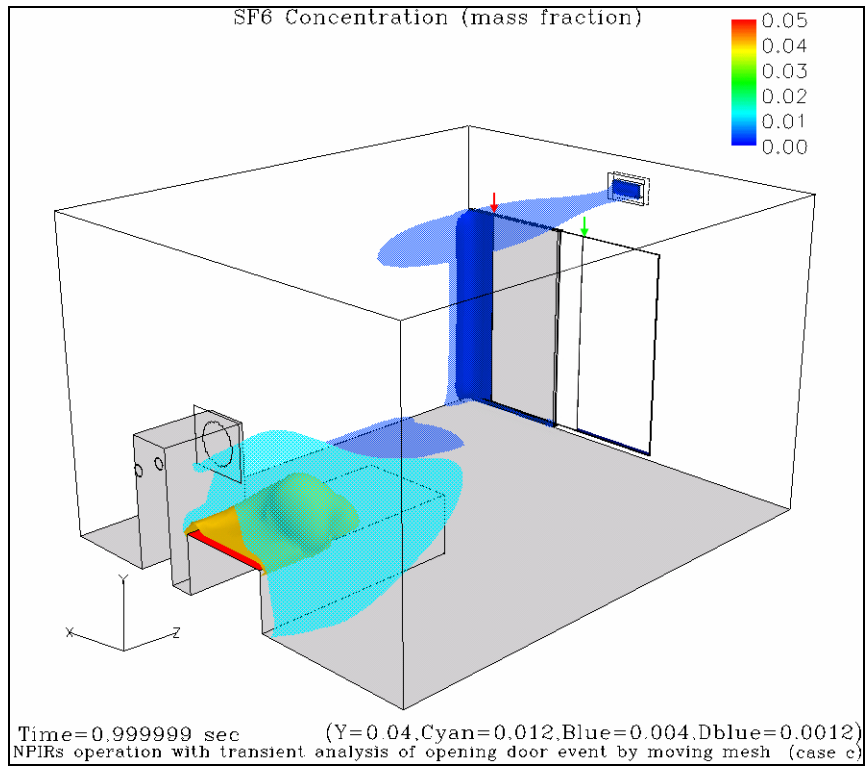
(丁)t=2 sec (戊)t=3 sec(己)t=4 sec



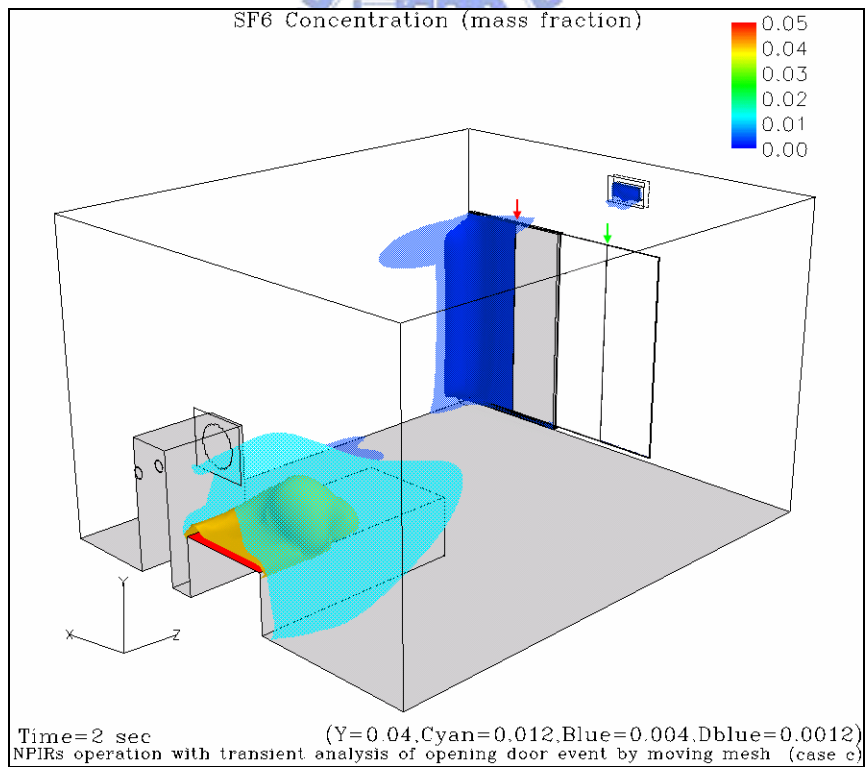
(乙)

圖4-74 暫態開門過程 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case c，房外走廊及 part I 部分。(甲)t=0 sec  
(乙)t=0.1 sec



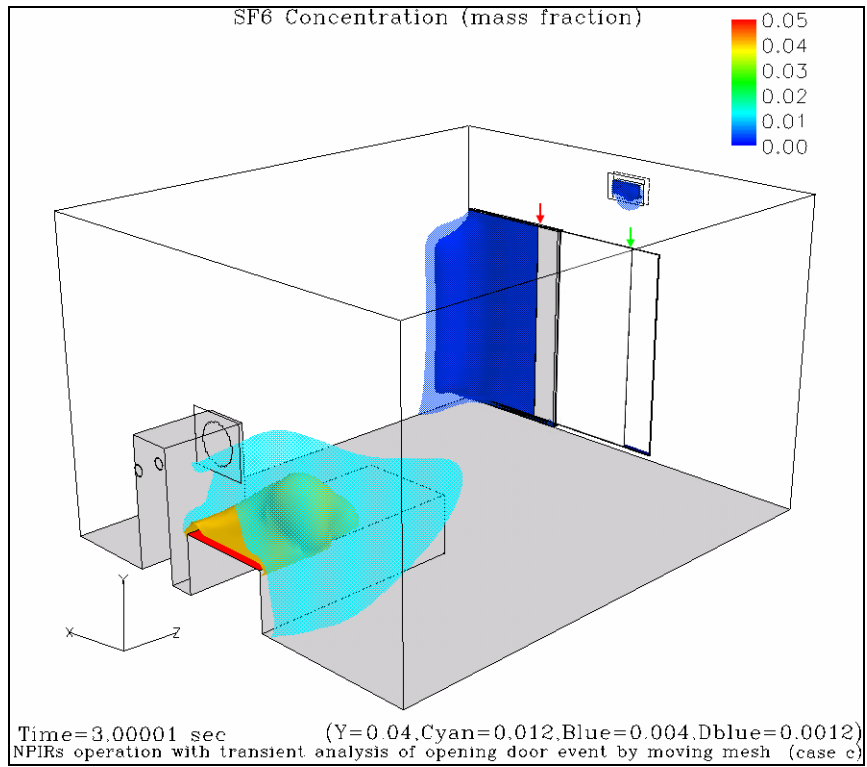


(丙)

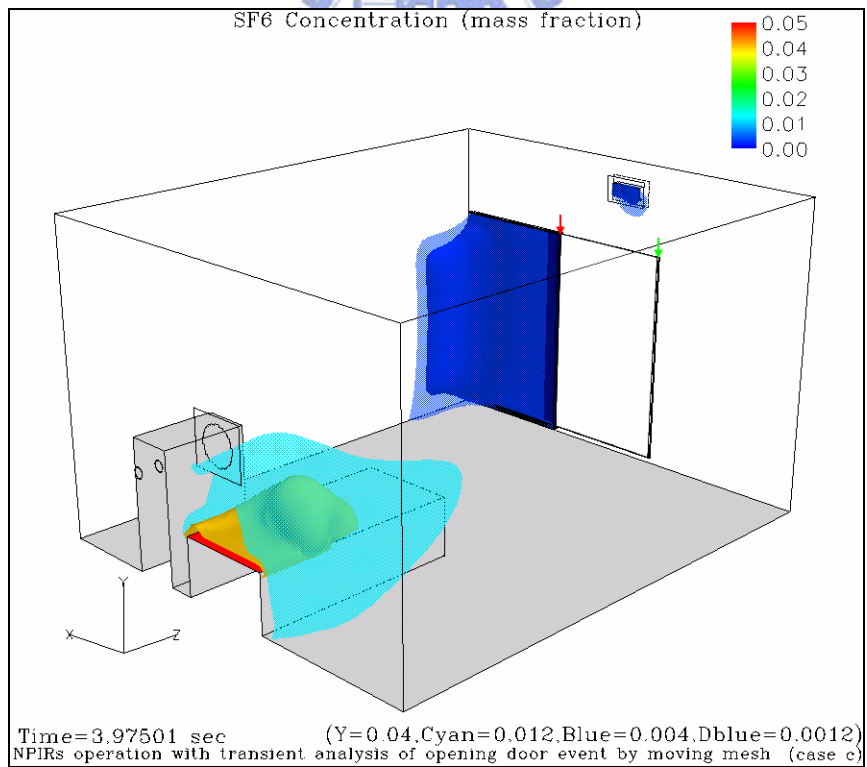


(丁)

圖4-74(續 1) 暫態開門過程 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖, case c, 房外走廊及 part I 部分。(丙)t=1 sec (丁)t=2 sec



(戊)



(己)

圖4-74(續 2) 暫態開門過程 SF<sub>6</sub> 等濃度面圖，case c，房外走廊及 part I 部分。(戊)t=3 sec (己)t=4 sec

0.0012 等濃度面呈現一凹形弧狀面。然而以床面附近的等濃度面(濃度 0.04 及 0.012)來說，在開門過程的 4 秒時間內，卻無非常明顯移動(等濃度面後退距離非常微小，圖需更加放大才能發現後退現象)。

而對於第二研究部分的數值分析方面，評估的重點則是在於開啟房門後，使否能夠確保其區間內的負壓環境，確保區間內的空氣不致流出區間外；以及進一步確認開啟房門後，是否有污染擴散至區間外(走廊)的情形。因此需加以分析流場結果。

對於一個開門過程中判別房內與房外的壓力變化與濃度變化是否危及外界，則需要同時監測區間內與區間外的部分，而於實際情形下則設置有限量的監測器，而最主要的監測點一般選擇靠近房門附近內外交界處，如此可得最佳監測點。本文取樣壓力與濃度監測點位置如圖 4-75 所示，取樣為靠近牆面於房門中間部分在內外各 0.5 公尺處，取樣時間同之前代表性時間步進( $t=0$ 、0.1、1、2、3、4 秒)，並依照與房門距離，區間內為正值，走廊部分為負值依照不同時間繪製如圖 4-76、圖 4-77 所示

圖 4-76 為不同的時間下壓力與位置關係圖，顯示當  $t=0$  未開啟房門時，房內壓力為約 -11.4Pa 左右，而房外則幾乎為零。而當剛開啟時  $t=0.1$  的曲線顯示房內端的部分壓力上升，有明顯的改變。而之後的時間下，則內外壓力幾乎保持在水平的曲線位置於 0Pa(與外界大氣壓同)。可見開啟房門作用的確讓負壓區間難以維持原有的負壓環境。

圖 4-77 為不同時間下重量濃度與位置關係圖，當  $t=0$  時靠近房門內部的濃度為約 0.6%，而走廊側則呈現幾乎為零的濃度。當剛開啟房門的時候( $t=0.1$  秒)則由於外界新鮮空氣進入房內，因此靠近房門的區間內部分濃度下降，但超過房門內 0.1m 處則仍無變化。而後隨著時間的變化，可察覺房內靠近房門附近的濃度逐漸下降，並逐漸擴及較內部的區間。而由圖可知，當開門作用進行時在 4 秒的過程之中，房外的濃度並無明顯上升的趨勢。

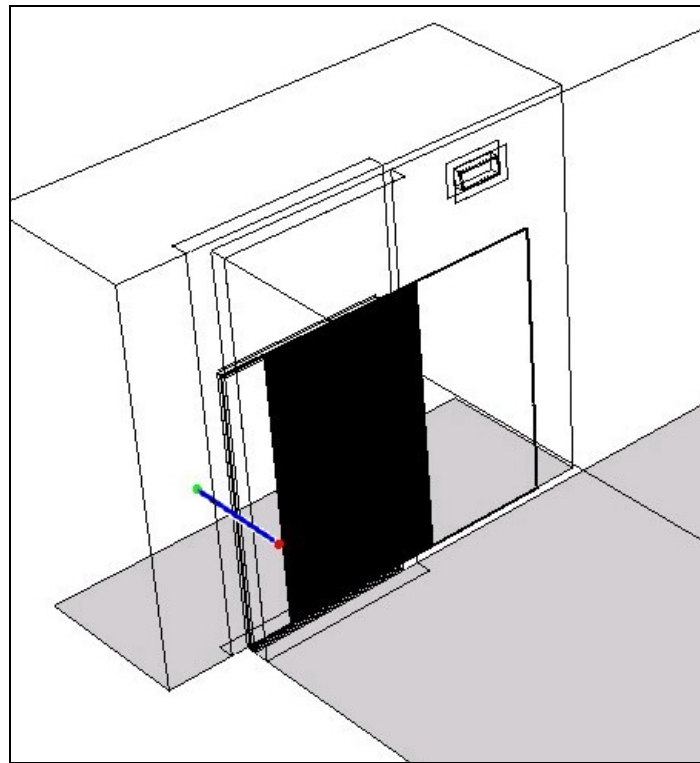


圖4-75 暫態開門過程壓力與濃度變化圖擷取資料點位置示意圖

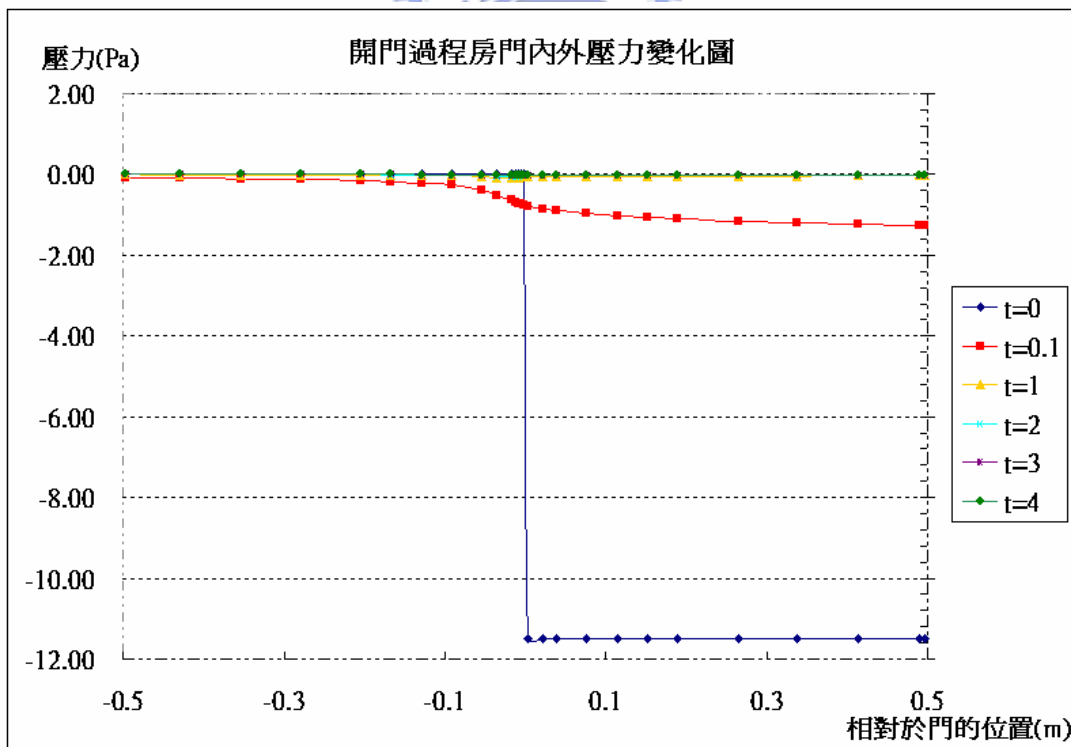


圖4-76 暫態開門過程房門內外壓力變化圖

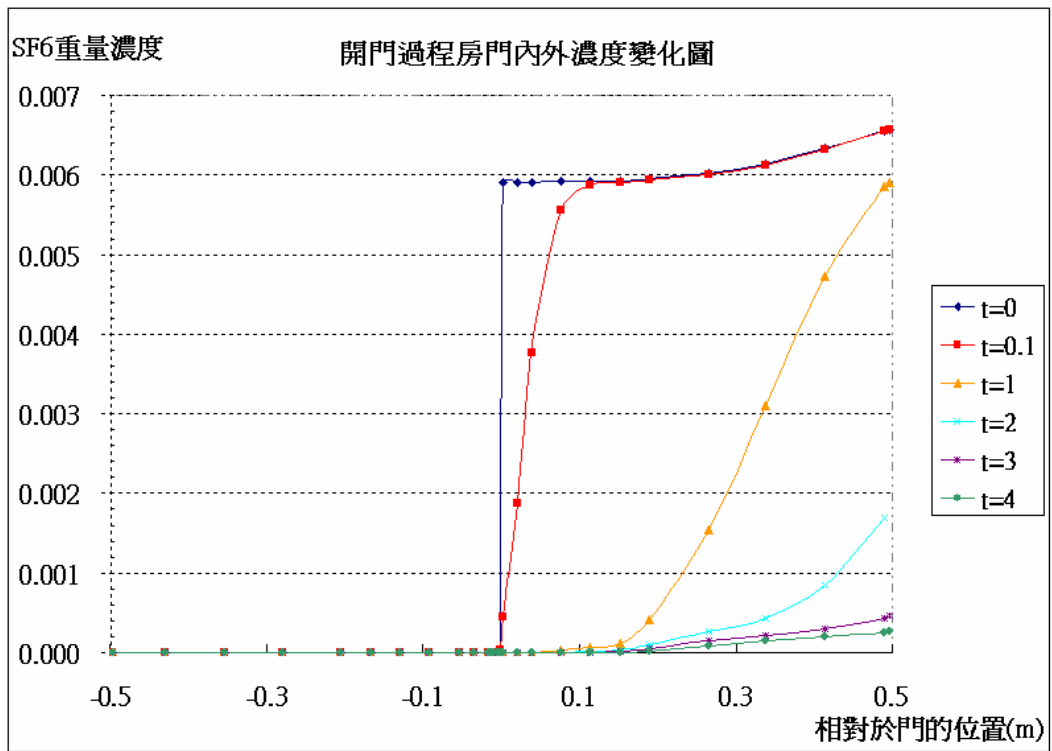


圖4-77 暫態開門過程房門內外 SF<sub>6</sub> 濃度變化圖

## 第五章 結論與建議

### 5.1 總結

對於負壓區間的流場分析與污染擴散的問題，本文利用數值計算方法分析之，並得到以下結論。

1. 設計負壓區間不可一味地要求極低壓的負壓環境而不考慮整體換氣問題，不僅耗費能源而且有污染累積的效應。由結果顯示換氣率越高，房內過高濃度區域則越少，則越能避免有毒氣體累積或外洩的影響。
2. 負壓區間的排風管對於是否設置過濾材的考量，則影響區間內的負壓程度。設置過濾材者則需考慮其以及其他效應(如形狀壓損)所帶來的壓力損耗，才能正確設計出合適的負壓程度的環境，不致有區間內的負壓程度不夠低的情形。反之，排風管未設置過濾材，則需考慮是否會造成迴流至房內的效果，避免濃度於房內累積。
3. 通風口設置宜加以規劃合適位置，盡量設置在主流道上，避免造成區間內迴流的發生，不致造成妨礙有毒氣體排除，才不會造成濃度累積。
4. 區間內開門動作的實施，致使房內負壓環境在極短時間內便無法保持。並其開門效應無可避免的會造成污染擴散的影響。建議可增設緩衝室減低擴散的機制。

### 5.2 建議

本文使用數值計算配合套裝軟體 Star-cd 進行計算模擬負壓空間的流場與濃度場變化。為類似葉[14]的延伸研究部分，採用修正動量方程式達到風機轉動的目的，而本文結果也有諸多討論。在此，仍有許多不免缺憾的地方，謹提供建議如下，茲供欲做相關

研究者一些參考。

1. 本文的風機葉片為了簡化圓轉翼形過程，是使用前置撰寫網點程式依照方程式建置網點而後讀入建構風機周圍葉片網格。因此葉片數量只有五片而且與業界所推出的產品幾何有所差異，導致在某些流場型態會無可避免的造成失真的效果。建議可以直接引用 CAD 繪製風機的 3D 圖形，轉檔後由切割網格軟體讀入(例如.Gridgen, Ideas 等軟體)而進行分割網格動作，如此可以使風機葉片幾何與數值模擬較為真實。
2. 本文所分析穩態負壓空間的物理模式均已大幅簡化，與真實情形有所差異，僅分析理想化的負壓房結構。同文獻[11]、[13]所提及的，場所的通風型態與設置方式，對於影響污染累積有極大的影響，因此在分析不同的設置環境(如房間尺寸有異、通風口設置改變)，往往需要個別做考慮，由於流場型態也會有所差異的因素。
3. 通風口的設置位置本文未討論此研究，僅有改變風速例子。如改置於正對風管接房內端位置，則或許效能與型態又會迥異於本文，未來可加以研究。
4. 而設定污染濃度部分，宜有別於本論文，改採固定濃度流率方式而非固定濃度，並可考慮人員呼吸次數與病毒濃度產生關係，而做較為合宜方式。且由於病毒會隨口沫飛揚，可改分析由分子量較重的六氟化硫為較輕的氣體如水蒸氣、甲烷之類氣體分析。
5. 設置較為妥善的隔離區間，應均使用緩衝室，本文為分析最不佳方式(無緩衝室)。因此可繼續延伸此研究分別分析緩衝室的影響，並且討論內外門開啟房門時間的機制。

## 參考文獻

- [1] 法務部全國法規資料庫 , <http://law.moj.gov.tw/>
- [2] ASHRAE , ASHARE handbook ” Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications ” , pp7.1-7.12, Inch-Pound Edition,1991
- [3] MMWR , ” Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium tuberculosis in Health-care Facilities ” , CDC No.RR-13,1994
- [4] 王順志, 「通風基本觀念與 SARS 隔離病房功能檢查指引(2)」, 勞工研究所網站 , 民國 92 年
- [5] 楊金源, 「不同壓力區開口部效應對空氣污染控制之影響研究」, 國立雲林科技大學 , 碩士論文 , 2001
- [6] C. S. Hayden, II, O. E. Johnston, R. T. Hughes, and P. A. Jensen, ” Air volume migration from negative pressure isolation rooms during entry/exit” APPL. OCCUP. ENVIRON. HYG. 13(7) , pp518-527, July 1998
- [7] 陳友剛、鍾基強等編著, 「複式均勻混合模式於整體換氣之應用」, 勞工安全衛生研究季刊 , 第六卷第一期 , 1998
- [8] 林振華, 「呼吸道傳染隔離病房通風換氣需求與系統節能之探討」, 國立台北科技大學 , 碩士論文 , 2002
- [9] S. M. Bowes, E. G. Mason, and M. Corn, ” Confined space ventilation: transfer gas analysis of mixing characteristics ” , AM. Ind. HGY. ASSOC. J. , 54(11), pp.639-646, 1993
- [10] 葉斯馨, 「以實驗方式探討排氣櫃的流場變化,國立交通大學」, 碩士論文 , 1994
- [11] 林慶峰, 「密閉室內有害氣體之排除」, 國立交通大學, 碩士論文 , 1995
- [12] Bin Zhao, Ying Zhang, Xianting Li, Xudong Yang, Dongtao Huang, ” Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method ” , Building and Environment, Vol. 39, pp.1-8, 2004
- [13] Zhou Dugao, Zhou Jiang, and Song Juan, ” Optimization design of an axial-flow fan used for mining local-ventilation ” , Computers & Industrial Engineering , vol.31, no.3-4,pp.691-696,1996



- [14] 葉時行, 「散熱基座的熱傳性能分析」, 國立交通大學, 碩士論文, 2001
- [15] H. F. Richard PAO, Fluid Dynamics, Charles E. Merrill Books, Inc., April 1973
- [16] S. Ergun, " Fluid flow through packed columns ", Chem. Eng. Prog 48, ppt 89-94, 1952
- [17] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer And Fluid Flow chapter 6, McGRAW-Hill book company, 1980
- [18] CD adapco Group, Methodology STAR-CD version 3.10, Computational Dynamics Limited Corp., 1999
- [19] CD adapco Group, User Guide STAR-CD version 3.10, Computational Dynamics Limited Corp., 1999

