

# 以計算流體動力學研析自然通風空間 空氣交換有效性與氣狀污染物排除效率

## CFD Investigation on Air Change Effectiveness and Gaseous Pollutant Removal Efficiency in a Naturally Ventilated Space

國立台灣大學生物環境系統工程學系  
助理教授

張 倉 榮

Tsang-Jung Chang

國立台灣大學生物環境系統工程學系  
碩士班研究生

游 家 信

Chia-Hsin Yu

### 摘 要

由於現代人從事室內活動時間的增加，使得室內空氣品質問題在近年來逐漸受到重視。由能源的節約及維護健康的觀點出發，應盡量減少對機械通風的依賴，並改用綠建築自然通風的手段使室內空氣得以交換，以幫助室內污染物之排除與稀釋，改善室內空氣品質。本研究以紊流大渦模擬(LES)模式配合 Navier-Stokes 控制方程式以及氣狀污染物擴散對流方程式，進行 CFD(計算流體動力學)數值模式的研究發展，並針對四種常見的建築物自然通風策略案例進行數值模擬測定，在得到各案例之速度場及濃度場後，藉空氣交換率(air change rate)及污染物排除效率因子(contaminant removal effectiveness)等參數的分析，比較各案例因開窗策略不同，而產生空氣交換有效性以及室內污染排除效率的差異，藉以研擬出理想的通風策略，改善室內空氣品質，並提供日後建築物通風設計之參考依據。模擬結果顯示，使用平行雙對流(parallel co-flow)通風案例在空氣交換及污染物的排除均有最好的表現，而採背風面單側(leeward sided)通風的案例則表現最差。另外，迎風面邊窗的開啟與否，對通風空間之空氣交換效率影響最大，而背風面邊窗的開啟則最有助於室內污染質之排除。

**關鍵詞：**室內空氣品質，自然通風，紊流大渦模擬，空氣交換有效性，污染物排除效率。

### ABSTRACT

In recent years, much attention has been paid to indoor air quality. For the purpose of improving indoor air quality, it is desirable to use natural ventilation from the viewpoint

of green building. The present research uses the computational fluid dynamics (CFD) technique to solve the Navier-Stokes equations and atmospheric convection diffusion equation together with the large eddy simulation (LES) turbulence model. A series of numerical simulations on four types of natural ventilation strategy are carried out. The air change effectiveness and gaseous pollutant removal efficiency have been emphasized. The parameters such as the air change rate and the contaminant removal effectiveness are used to evaluate the ventilation performance for each strategy. The simulation result shows that ventilation strategy like parallel co-flow has the greatest ventilation efficiency, and the worst is the case of leeward-sided ventilation. The openness of windward side vent has apparent effect on ventilation performance, whereas the leeward side vent is important for pollutant removal efficiency.

**Keywords:** Indoor air quality, Natural ventilation, LES, Air change effectiveness, Gaseous pollutant removal efficiency.

## 一、前言

隨著環境的變遷及人們生活型態的轉變，現代人從事室內活動的時間增長了許多，因此室內空氣品質成爲攸關人們健康的重要課題。造成室內空氣品質不良的因素有許多，也各有其改善之道，但對於既存之建築物的而言，透過對通風策略之擬定而改善室內空氣品質爲最經濟可行之做法。目前國內對於室內空氣品質之相關研究文獻，多以調查方式對室內外空氣品質作關聯性研究，對於採樣期間之氣流流動與污染物濃度分佈，僅用空間平均值代表，但欲探討室內空氣品質之良窳，必須藉由定量化分析(quantitative analysis)，取得室內氣流流況與污染物之分佈情形的詳細資料，才能針對通風不良的區域研擬改善策略，以得到良好的室內空氣品質。另一方面，由於近年來電腦科技的發展，使得個人電腦記憶儲存與計算能力因而大幅提升，以計算流體動力學(computational fluid dynamics, CFD)進行數值模擬之可行性大大地增加，使用 CFD 模擬較風洞試驗爲簡便，在 CFD 模式與實驗數據驗證成功後，即可依不同建築物之幾何形狀與污染源等進行數值模擬。因此，發展適當之數值模擬模式，用以量化分析建築物室內之流況與污染物之空間與時間分佈，應能符合

工程之實用性及經濟性之考量。

回顧以 CFD 探討室內空氣品質之相關文獻，一般可分爲流場及濃度場二部分，在流場數值研究部分，Okushima 等(1989)最早將 CFD 方法使用於建築物的通風研究。Short (1996)使用 CFD 預測雙複合式(double-poly)建築。Mistriotis 等(1997)爲探討不同尺度下建築通風效果的差異，而使用 CFD 模式進行地中海型溫室建築(Mediterranean-type greenhouse)之風場模擬。Kacira 等(1998)模擬在自然通風下，多跨度鋸齒型建築物因開窗方式不同，對於空氣交換率之影響。而 Ayad (1999)、Woodruff (1997)及 Lee 等(1998)皆曾使用 CFD 方法針對各種不同形式的自然通風低層建築物進行模擬。黃(2001)及郭(2001)亦使用計算流體動力學，配合大渦模擬模式進行低層建築物之數值模擬，其結果顯示大渦模擬足以做爲紊流環境流場模擬及探討學理之工具。而濃度場的數值研究部分，一般需先求得通風空間的速度場，進一步才由污染物之擴散對流方程式，解得濃度場。相關研究包括 Gerdes 及 Olivari (1999)對於街谷污染所做的模擬研究。Huang 等(2000)使用二維 CFD 模式對於街道空氣品質作模擬研究並針對模擬結果作敏感度分析。Yuan 等(1999)針對室內通風以三維 CFD 模式進行流場及濃度場模擬。Chung 等(2001)以

CFD 模擬室內風場與濃度場，並討論不同通風條件對於污染物分佈的影響及排除效率之影響。Chang (2002)則利用 CFD 模擬中的大渦模式，針對交通污染對室內空氣品質的影響，以多組不同開窗類型的案例進行模擬探討。

室內空氣品質之良窳可藉空氣交換有效性 (air change effectiveness) 及氣狀污染物排除效率 (gaseous pollutant removal efficiency) 兩項指標來評定。本研究即以紊流大渦模擬模式 (large eddy simulation, LES) 配合 Navier- Stokes 控制方程式及氣狀污染物擴散對流方程式，進行 CFD 數值模式的研究發展，藉由本模式模擬出多組不同自然通風案例之速度場與濃度場後，比較各案例空氣交換有效性與氣狀污染物排除效率之差異，以尋求良好的通風策略而改善室內空氣品質。因此，本研究之目的如下：

- (1) 發展數值模式，針對多組不同通風方式之自然通風研究案例進行模擬，而得到各案例之速度場與濃度場之定量資料 (quantitative data)，以取代過去使用之定性資料 (qualitative data)。
- (2) 針對數值模式模擬出之結果進行空氣交換有效性及氣狀污染物排除效率之量化比較分析，研擬最佳之通風策略，以增進通風效能，期能對室內空氣品質之改善有所裨益。

## 二、研究方法

以下介紹本研究於不可壓縮流場下，二維環境風場數值模式的理論，包含所使用的 CFD 基本控制方程式、自然通風空間風場之二維度 LES 模擬方程式、邊界與初始條件、數值方法等。

### 2-1 建築物室內流場

在針對自然通風空間之流場進行模擬探討時，由於流體流速遠小於 100 m/s (即 0.3 馬赫數) 之臨界值，故可將流體視為不可壓縮 (黃, 2001)。自然通風空間不可壓縮之紊流場可以連續方程式及運動方程式描述，但藉由雷諾分解 (Reynolds decomposition) 之觀念處理控制方程式時，會產生

紊流閉合的問題。本研究選擇使用目前工程界較常用的大渦模擬法，使控制方程式閉合並得以數值方法求解。大渦模擬法之原理是在模擬區域中藉由濾波函數將小渦流過濾出來，而只留下大尺度渦流，再計算其數值，至於被過濾的小渦流則會影響到亞格點應力 (subgrid stress) 的變化。令  $\bar{u}_i$  和  $\bar{p}$  為在  $x_i$  方向中之過濾速度及壓力 (filtered velocity and pressure)，其連續方程式和動量方程式可分別以下二式表示：

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu_{sgs} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中  $t$  為時間座標， $x_i$  表沿  $x, z$  方向之座標 ( $i=1,2$ )， $\nu$  為流體運動黏滯係數， $\rho$  為流體密度， $g$  為重力加速度， $\nu_{sgs}$  代表亞格子渦流黏滯係數。而  $\nu_{sgs}$  又可以(3)式表示之：

$$\nu_{sgs} = (Cs\Delta)^2 \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

其中  $\Delta$  為濾波特性寬度， $\Delta = (\Delta x_i \Delta x_j)^{1/2}$ 。當濾波特性寬度  $\Delta$  逼近於 0， $\nu_{sgs}$  亦趨近於 0，則(2)式即回復為原始動量方程式，即 Navier-Stokes 方程式。 $Cs$  為 Smagorinsky 常數，通常介於 0.1~0.2 之間，本模式採用的值為 0.14，為過去模式進行參數驗證之經驗值 (黃, 2001；郭, 2001)。

### 2-2 建築物室內濃度場

本研究所用氣狀污染物並不參與化學反應，故以擴散對流方程式即可描述，又因假設氣狀污染物的存在不影響流場，故可解出自然通風空間的速度場，再將值代入氣狀污染物擴散對流方程式(4)式中，而解得自然通風空間的濃度場。在(4)式中包含了氣狀污染物濃度對流項、擴散項以及氣狀污染物濃度來源項，說明如下：

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(U_i C_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(D_{mol} + D_{turb}) \frac{\partial C_i}{\partial x_j}] + S_\phi$$

.....(4)

其中  $C$  為擴散物質之濃度， $S_\phi$  為濃度來源項 (source term)， $D_{mol}$  為分子擴散係數， $D_{turb}$  為紊流擴散係數。紊流擴散係數  $D_{turb}$  與  $\nu_{sgs}$  之關係可以紊流許密士數 (turbulent Schmit number)  $Sc$  來表示，即  $Sc = \nu_{sgs} / D_{turb}$ 。通常紊流許密士數介於 0 與 1 之間，本研究使用之值則定為 0.5 (Chang, 2002)。

### 2-3 數值方法與邊界條件

上述控制方程式無法直接以數學解析求得，須以數值方法先進行網格離散，再由網格系統中求解各網格點的速度及壓力。為減少引用差值方法以增進計算精度，故模式採非交錯網格分布，即流速及壓力在同一格點上，而後以有限差分法 (finite difference method) 將控制方程式離散以顯式法 (explicit scheme) 解之，控制方程式離散處理時，時間項採用前項差分，對於非線性之對流項則採用上風法 (upwind scheme) 及中央差分兩種混合方式進行離散處理，以減少數值解之震盪。在速度場求解過程部分，本研究運用映射 (mapping) 技巧將物理平面  $(x, z)$  座標轉換到計算平面  $(\xi, \eta)$  座標，透過給定壓力猜值先計算流速，並將壓力項化解為 Poisson 方程式，反覆迭代修正直至滿足質量守恆。濃度場求解部分則以所得之穩態速度場做為基本參數代入擴散對流方程式中求解。擴散對流方程式離散後以  $x$  方向及  $z$  方向分別求解，各佔 1/2 時階。在邊界條件已知的情況下，可直接以迭代法求出下一時階之濃度值。因本研究使用顯式法求解，故存在一數值穩定條件 (Courant-Friedrichs-Lewy condition)，以獲得收斂且穩定之模擬結果，但相較於隱式法 (implicit scheme) 需要求解矩陣而耗費電腦記憶空間，使用此法較為簡便。

本研究之初始條件有二，包括：(1) 流場之初始流速、壓力及初始濃度值為已知；(2) 入流初始風速分佈為  $C$  種地況之指數分佈。而在邊界條

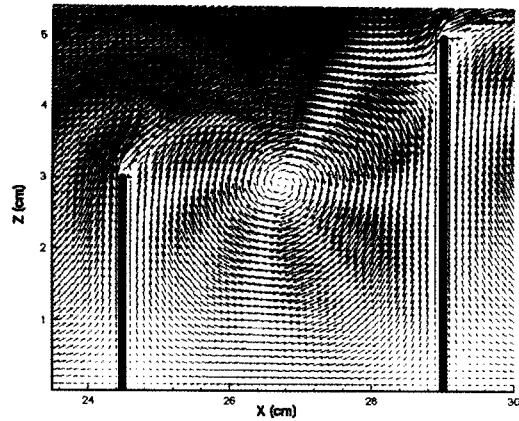


圖 1 模擬街谷速度場

件部分，則按邊界位置之不同又可分為開放邊界 (上游入流邊界、下游出流邊界及上邊界) 及固體與流體的接觸面邊界等兩種。開放邊界包括：(1) 上游入流處之風速依照指數律風速分佈；(2) 上邊界及出流處為零速度梯度、零濃度梯度。對於固體與流體接觸面邊界條件採固定邊界條件，即在邊界處無流體通過。本研究假設沿邊界法線方向之速度等於零，而對於沿邊界切線方向的速度值，則採用滑動邊界條件 (free slip)，使邊牆上之合速度上切於邊壁。另外對於自邊界反射的流體，則使用虛擬邊界法 (以一反射程序應用於邊牆邊界條件) 來處理，該法經測試後結果良好，亦得以此法處理邊牆之邊界條件。

### 2-4 模式驗證

本研究在使用模式之前先與風洞量測實驗 (Gerdes 及 Olivari, 1999) 數據進行驗證比較。該實驗利用長 2m，開口斷面積為 0.34m×0.34m 之風洞進行街道之流場與濃度場模擬實驗，實驗包含上游及下游兩面厚 2mm 之平行金屬牆，上游牆高  $H_u=0.03m$ ，下游牆高  $H_d=0.05m$ ，兩牆間距 0.045m，污染源置於距上游牆  $6.5H_u$  處，並以連續方式施放污染質。該實驗邊界層外之自由風速為 1.7m/s，當風場流速達到穩態時，風場的雷諾數大約為 3,400 (特性長度取最高建築物之高度)。圖 1 為本模式所模擬出的街谷速度場，由於下游牆的阻礙使得街谷中有一順時鐘方向的

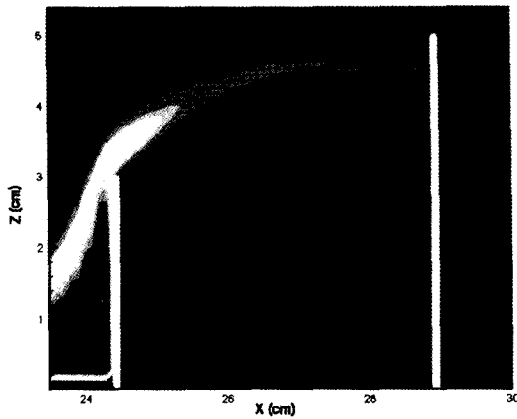


圖 2 模擬街谷濃度場

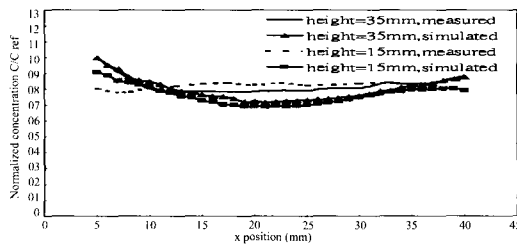


圖 3 模擬結果與實驗數據比較

漩渦產生，速度場的速度值最大約為 1m/s。將模擬出的速度場與 Gerdes 及 Olivari 的實驗測量數據比較可得到良好的一致性。圖 2 為模擬出的濃度場，把濃度場中離地高各為 15 和 35mm 的濃度值取出與實驗值比較如圖 3，發現數據相當吻合，可證明運用本模式所模擬出的濃度場具有一定的精確度。

### 三、數值境況模擬

#### 3-1 案例說明

本研究針對熱帶及亞熱帶地區常見之自然通風低層建築物，於一般氣候條件下進行數值模擬。圖 4 為研究案例通風示意圖，說明各通風口位置及名稱。表 1 中所列為所使用的氣候及建築物基本資料，表 2 所列則為所模擬之四種研究案例，各代表不同的自然通風策略，案例 1 為平行雙對流型通風(parallel co-flow)型通風，案例 2 為迎風面單側型(windward sided)通風，案例 3 為迎風面穿透型(windward cross-flow)通風，案例 4

表 1 氣候及建物基本設定資料

風場溫度	20°C	兩側邊窗離地高	1.1m
風場相對濕度	75%	兩側天窗離地高	3.1 m
建物長度	10 m	天窗離地高度	3.1 m
建物高度	4.4 m	邊窗高	0.4 m
建物面積	31.5m <sup>2</sup>	天窗高	0.4 m

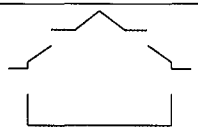
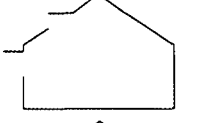
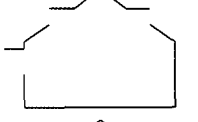
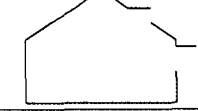


圖 4 研究案例示意圖

為背風面單側型(leeward sided)通風。若以直覺的定性判斷，一般皆認為如案例 1 的通風方式，能得到最好的空氣交換率以及最容易使污染物排除，而如案例 4 的通風方式會有較差的空氣交換率並且使污染物聚積。為確認以上觀點的正確性，並提供定量化預測(quantitative prediction)，本研究即研擬以上各種案例，於指數入流風速為 1m/s 及 2m/s 下，模擬各案例的速度場，以得知各案例內部之氣流流動情況，接著於各案例之底部連續施放污染物，藉以得到通風空間的濃度分佈及濃度隨時間的變化情形。由以上所得之結果再透過各種分析，比較其間空氣交換有效性及污染物排除效率之差別，找出以上各案例之量化差異性，以期找出良好的通風策略。

圖 5 為本研究所使用的網格點佈置圖，數值模式計算範圍以 6h 高、12h 長(h 為建築物之高度)為風場模擬範圍，模擬邊界上游距離主建築物約 4h，模擬邊界下游離主建築物約 6h。計算區間使用的格網由最密至最疏為 20cm×10cm、20cm×50cm 二個區域共 34,191 個網格點，速度場計算時距  $\Delta t=0.01$  秒，濃度場計算時距  $\Delta t=0.5$  秒。由於本研究使用顯式法求解，故計算過程需滿足 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)數值穩定條件。

表 2 研究案例說明

研究案例	通風口開窗形式				自然通風方式	圖 例
	左邊窗 開口角度	左天窗 開/關	右天窗 開/關	右邊窗 開口角度		
1	90°	開啟	開啟	90°	平行雙對流型通風 (parallel co-flow)	
2	90°	開啟	關閉	0°	迎風面單側型通風 (windward sided)	
3	90°	開啟	開啟	0°	迎風面穿透型通風 (windward cross-flow)	
4	0°	關閉	開啟	90°	背風面單側型通風 (leeward sided)	

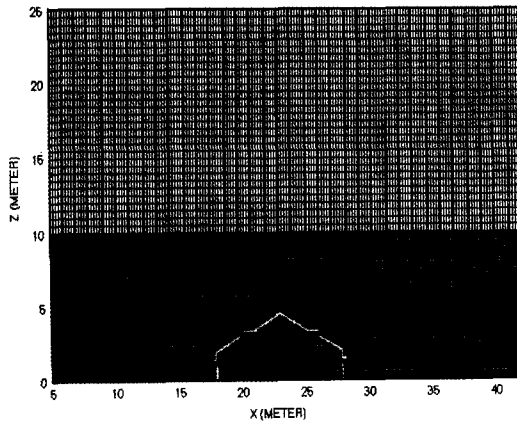


圖 5 數值模式網格點佈置圖

### 3-2 分析方法

在討論適當通風策略之前，應先界定空氣交換的方式，其形式一般可分為三種(Liddament, 1996) (為方便討論，本研究定義即將進入通風空間的外氣為「新空氣」，而原存於通風空間之空氣則為「舊空氣」)，說明如下：

(a)無混合(no mixing)的活塞流形式(piston flow pattern)：新空氣進入通風空間後，直接以取代(displace)方式使舊空氣排出，使通風空

間猶如活塞。

(b)完全混合的型式(perfect mixing)：新空氣與舊空氣先經充分混合後排出，使排出的空氣包含新舊空氣。

(c)綜合型式(variable mixing)：此種空氣交換型式最為複雜，在通風空間中有些氣流不易到達的區域，這些區域的舊空氣不易經由混合排出而呈現滯留狀態。

綜上所述並參照本研究各研究案例可知，本研究的空氣交換方式應為以上所述之最複雜的第三種，而不同的開窗策略會使滯留區域的位置及範圍改變，此種空氣交換形式最為多變，最適合以 CFD 數值模擬進行研究。在模擬出各通風案例之速度場與濃度場後，首先應對各案例作流速與濃度分佈分析，以初步瞭解通風空間的氣流及濃度分佈。本研究以空氣交換率(air change rate, AC)作為各案例通風交換有效性的指標，而對於氣狀污染物排除效率之分析，則透過污染物排除效率參數(contaminant removal effectiveness, CRE)等作為參考指標，最後依上述各項指標繪出對應的圖例，以實際瞭解通風空間中通風效能不良之區域，作為日後通風策略設計之參考。

### 1. 流場與濃度場之基本分析

模擬出穩態下各研究案例之速度場及濃度場後，首先可繪出各研究案例於不同入流風速下之速度場，以各研究案例中各點的速度值，除以上游入流邊界初始風速值，可得各研究案例之無因次流速分佈圖，而以各研究案例之通風空間各點的污染質濃度除以污染源濃度則可得到各研究案例之無因次濃度分佈圖。而對各研究案例之流速做空間平均，則可得到各研究案例的平均流速值；其次對研究案例中各點濃度值做空間平均，則可得到各研究案例的平均濃度值。透過以上的分析，可瞭解自然通風研究案例之流況及濃度分布。透過以上的分析，可瞭解自然通風研究案例之流況及濃度分佈，而上述各項之計算式及符號說明如下：

$$U_i = \frac{u_i}{U_0} \dots\dots\dots(5)$$

$$C_i = \frac{c_i}{C_0} \dots\dots\dots(6)$$

$$\langle \bar{U} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} \dots\dots\dots(7)$$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{N} \dots\dots\dots(8)$$

(5)式及(6)式代表各研究案例之速度及濃度無因次計算式，其中  $U_i$ 、 $C_i$ 、 $u_i$ 、 $c_i(i=1,2,\dots,N)$ 、 $U_0$  及  $C_0$  各代表通風空間中之無因次速度、無因次濃度、第  $i$  點速度、第  $i$  點濃度、上游邊界初始風速值及污染源之濃度值。(7)式及(8)式則代表各研究案例之流速與濃度之空間平均計算式，其中  $\langle \bar{U} \rangle$ 、 $\langle \bar{C} \rangle$  及  $N$  各代表研究案例之速度空間平均值、濃度空間平均值及通風空間中包含的格點數。

### 2. 空氣交換有效性分析

空氣交換率之定義為「單位時間置換相當室積空氣量之次數」，目前較常以每分鐘空氣交換率(Air Change Per Minute, ACM)作為計算單位，透過各研究案例 ACM 值的比較，可幫助瞭解有利於通風的開窗策略。由於本研究使用之案例皆

為單區間模型(one-compartment models)，按質量守恆定律，於穩態下將通風口風速  $u$ (m/s)乘以通風口面積  $A$ (m<sup>2</sup>/m)，可得單位長度之通風量  $Q$  (m<sup>3</sup>/m/s)，再將通風空間體積  $V$  除上  $Q$  後，換算成以分鐘為時間單位，可得每分鐘空氣交換率，其計算式如下：

$$ACM = (60 \cdot Q) / V \dots\dots\dots(9)$$

其中  $V$  為建築物室內單位長度體積(m<sup>3</sup>/m)空氣交換率其值愈高表示自然通風效率愈好。

### 3. 污染物排除效率分析

Yaglou 及 Witheridge (1937)曾定義污染物排除效率因子(contaminant removal effectiveness, CRE)如下：

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{C_e - C_s}{\langle C \rangle - C_s} \times 100\% \dots\dots\dots(10)$$

其中  $\langle C \rangle$ 、 $C_e$ 、 $C_s$  各代表為通風空間之平均濃度、出風口及入風口之濃度值。當通風空間 CRE 值等於 100% 時，表示整個通風空間濃度為完全混合(complete mixing)，使出風口之濃度值等於整個空間的空間平均濃度值。若通風空間的 CRE 值小於 100%，則代表該通風空間中的污染物混合不良，部份區域呈現停滯(stagnation)現象，表示此類型之建築物易使污染物困於其中(locked in)，而使污染質之排除效率不佳。一般而言，CRE 值愈小代表通風空間中污染質之排除效率愈差。當 CRE 值趨近於 0%時，表示通風空間毫無排除污染質之能力。

## 四、模擬結果與討論

### 4-1 各案例之流場與濃度場

圖 6 與圖 7 為各模擬案例於入流風速為 1 m/s 及 2 m/s 下，達到穩態之模擬速度場。參照二圖可發現不同開窗策略會使室內流況產生明顯之差異，而各案例在不同入流風速下之室內流況差異不大，以上可見開窗的型態影響室內流況甚鉅。案例 1 為平行雙對流型通風(parallel co-flow)型通風，主要氣流流入迎風面邊窗，約為迎

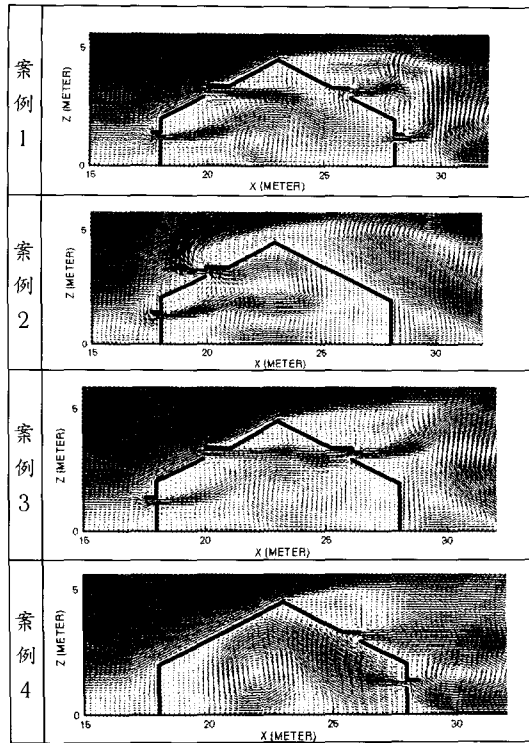


圖 6 入流風速為 1 m/s 下之模擬速度場( $t=100$  秒)

風面天窗之 2 倍，並在建築物中間形成約建物 1/3 高之順時針渦漩，其上氣流一部份往背風面邊窗流出，迎風面天花板下亦形成一逆時針渦漩，其下氣流則往背風面天窗流出。案例 2 為迎風面單側型(windward sided)通風，由於背風面窗戶完全關閉，氣流主要自迎風面邊窗流入，隨即自迎風面天窗流出，在建築物內形成兩個大渦漩。案例 3 為迎風面穿透型(windward cross-flow)通風，氣流自迎風面邊窗及天窗同時流入，而背風面邊窗關閉致使氣流順流而上往背風面天窗流出，在背風面邊窗前區域形成大渦漩死域，讓建築物室內空氣停留時間變長。案例 4 為背風面單側型(leeward sided)通風，迎風面窗戶完全關閉，氣流自背風面邊窗流入，隨即自天窗流出，極少部份氣流流入建物室內，使得室內形成死域，影響空氣交換。圖 8 與圖 9 則為各模擬案例於入流風速為 1 m/s 及 2 m/s 下之無因次速度等高線圖，圖中可發現各案例於邊角處之速度值均低，而靠近通風口處之風速會較高。

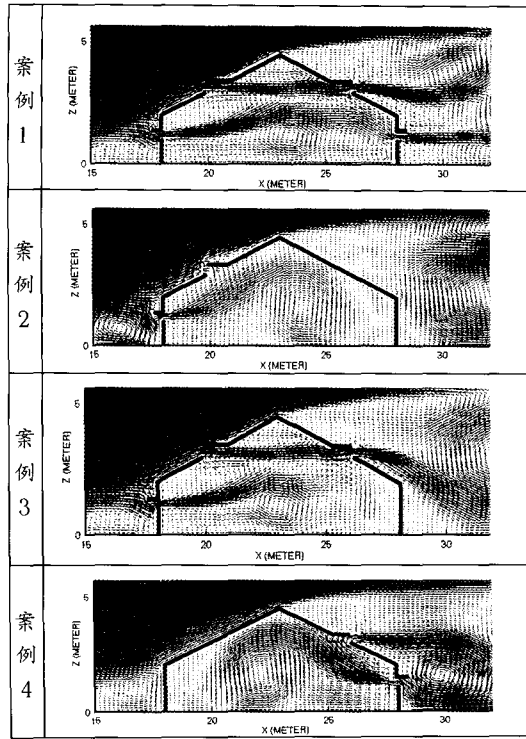


圖 7 入流風速為 2 m/s 下之模擬速度場( $t=60$  秒)

圖 10 與圖 11 描述各研究案例於入流風速為 1 m/s 及 2 m/s 下，達穩態之無因次濃度等高線圖，因本研究之污染源置於通風空間底部，故各研究案例於底部均有較高的濃度值。由於氣狀污染物以擴散與對流雙重方式運動，因此其分佈會受室內氣流的影響，由此二圖可明顯發現此一特性。透過以上各圖的觀察，可初步了解研究案例大略的流況及濃度分佈情形，而在穩態的前提下，經由以下各項分析，則可以定量方式對各案例作更深入之探討。

表 3 及表 4 為各研究案例於入流風速為 1 m/s 及 2 m/s 下之各項模擬結果。為方便分析，本研究以案例 1 作為比較基準，而將各項分析結果除以案例 1 的值，所得結果如二表中括號內的值所示，以了解各案例間之相對關係。比較表 3 及表 4 中各案例的空間平均流速值，最高至最低之順序均為案例 1、3、2、4，而空間平均無因次濃度值由最高至最低之順序則為案例 2、4、3、1。值得注意的是，由於某些案例內部存在氣流



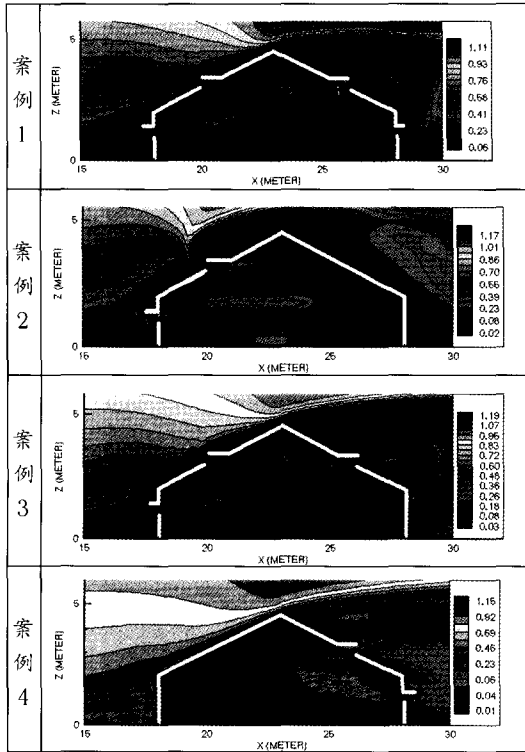


圖 8 入流風速為 1 m/s 下之無因次速度場等速度圖 ( $t=100$  秒)

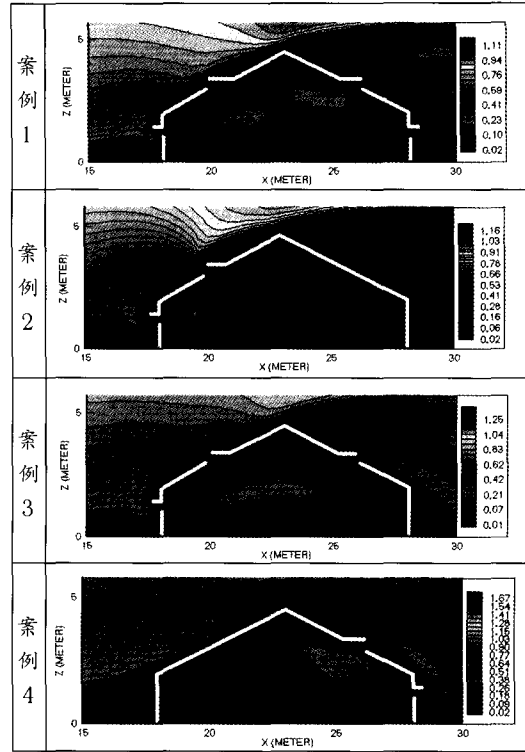


圖 9 入流風速為 2 m/s 下之無因次速度場等速度圖 ( $t=60$  秒)

表 3 各研究案例於入流風速為 1m/s 下之模擬結果

研究案例	空間平均速度(m/s)	空間平均無因次濃度	空氣交換率( $\text{min}^{-1}$ )	氣狀污染物移除效率(%)
1	0.15 (1.00)	1.29 (1.00)	0.33 (1.00)	5.2 (1.00)
2	0.08 (0.52)	5.13 (3.98)	0.05 (0.16)	0.9 (0.17)
3	0.10 (0.69)	2.22 (1.72)	0.23 (0.69)	2.2 (0.42)
4	0.02 (0.12)	4.46 (3.46)	0.01 (0.02)	0.3 (0.06)

表 4 各研究案例於入流風速為 2m/s 下之模擬結果

研究案例	空間平均速度(m/s)	空間平均無因次濃度	空氣交換率( $\text{min}^{-1}$ )	氣狀污染物移除效率(%)
1	0.25 (1.00)	1.03 (1.00)	0.63 (1.00)	5.7 (1.00)
2	0.11 (0.46)	5.27 (5.12)	0.09 (0.14)	0.2 (0.04)
3	0.21 (0.82)	2.44 (2.37)	0.49 (0.78)	2.6 (0.46)
4	0.06 (0.23)	4.32 (4.19)	0.01 (0.02)	0.51 (0.09)

無法到達的滯留區，而由地板釋放的污染質也無法到達該區，使得空間中的濃度分佈極為不均，在考慮空間平均的情況下，就會使得平均值下降。另外，在不同入流風速下，各案例之空間平均流速值與平均濃度值的排序均無變化，代表其通風及污染物傳輸物理特性不隨入流風速而變。

#### 4-2 各案例之空氣交換率及污染物排除效率

比較表 3 及表 4 中各案例之空氣交換率值，由最高至最低之順序為案例 1、3、2、4，與各案例的空間平均流速值之順序一致，皆以案例 1 為最高，案例 4 為最低，足見平行雙對流型對於室內空氣交換率之提昇幫助甚大。案例 3 之迎風面穿透型通風，空氣交換率尚可達到案例 1 之

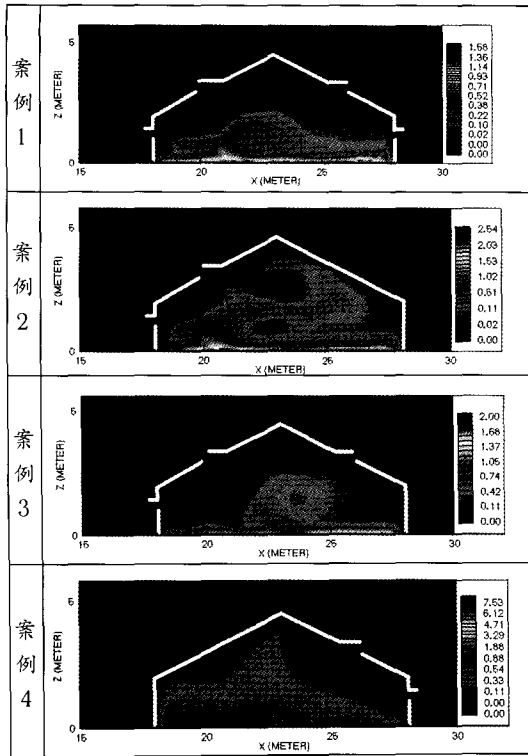


圖 10 入流風速為 1 m/s 下之無因次濃度場等濃度 (t=1500 秒)

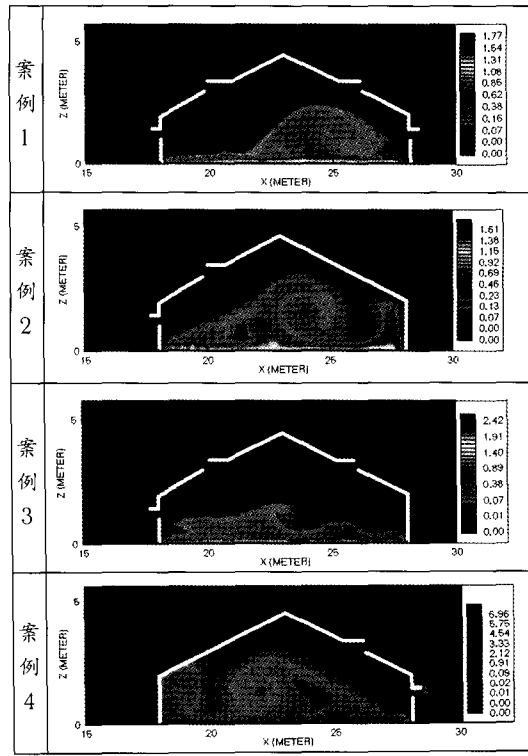


圖 11 入流風速為 2 m/s 下之無因次濃度場等濃度 (t=1500 秒)

69%-78%，但單側通風不管是在迎封面(案例 2)或在背風面(案例 4)，其空氣交換率約僅有案例 1 之 15%與 2%，足見迎風面邊窗之開啟對於室內空氣交換率之提昇幫助最大。

另一方面，比較各案例之污染物排除效率值 (CRE)，在入流風速為 1 m/s 時，由最高至最低依序為案例 1、3、2、4；而在入流風速為 2 m/s 時，則為為案例 1、3、4、2，雖皆以案例 1 為最高，但次序稍有不同，可見污染物排除效率較為複雜，會隨入流風速而變。案例 2 之迎風面單側通風與案例 4 之背風面單側通風，其 CRE 值僅有案例 1 之 4%-17%與 6%-9%，顯示此二種通風策略，由於室內外空氣交換效率較差，故幾無排除室內污染質之能力。

除此之外，比較各案例之污染物排除效率排序與上節之空氣交換率排序，可發現二者各案例之排序大多雷同，此現象顯示通風空間空氣交換率與污染物排除效率相關性甚高。必須提及的

是，案例 3 之污染物排除效率值僅可達到案例 1 之 42%-46%，相較其空氣交換率為案例 1 之 69%-78%，足見背風面邊窗的開啟對於污染物排除的助益幫助甚大。

## 五、結 論

綜合以上模擬結果有以下結論：

1. 空氣交換率良好的通風空間通常有較好的污染物排除效率，由此可知若欲改善室內空氣品質，則應該從改善室內流場，盡量降低室內氣流停滯現象的產生機會。
2. 不同的入流風速會造成室內流速的重新分佈，連帶影響室內污染質的分佈，但入流風速較高普遍有較良好的污染物排除效率及較低的室內平均空氣年齡，顯示污染物較易排除。
3. 迎風面邊窗之開啟對於室內空氣交換率之提昇幫助最大，而背風面邊窗的開啟則對

- 於污染物排除的助益最多。
4. 用量化的觀點透過模擬結果評定各案例通風效能的優劣可發現，使用平行雙對流方式通風之建築物，如案例 1，在空氣交換率或氣狀污染物排除效率的表現均為最佳，因此使用此種通風策略最能有效改善室內空氣品質。而使用背風面單側通風之建築物，如案例 4，在各評定參數之表現均為最差，顯然最不利於室內空氣品質之改善，應盡量避免使用此種方式通風。
  5. 若通風空間中的滯留區域發生於污染物釋放處，則污染物會因無法稀釋而出而造成污染，但若污染源不在該區，通風空間反而因污染物不易進入該區而隨氣流流出，如此反而能使空氣品質較佳，因此在做通風設計時，調查污染源發生地點或渦旋產生處是重要的。而透過模擬出的速度場可確切了解渦旋位置，確切標定滯留區域，對於通風設計有極大的幫助。

### 謝 誌

本文研究期間承蒙行政院國家科學委員會計畫(NSC89-2313-B-002-249)經費補助，使得研究得以順利完成，僅致謝忱。

### 參考文獻

- Ayad, S. S., 1999, "Computational study of natural ventilation", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 82, 49-68.
- Chang, T. J., 2002, "Numerical evaluation of the effect of traffic pollution on indoor air quality of a naturally ventilated building", *J. of the Air & Waste Management Association*, Vol. 52, 1163-1174.
- Chung, C. C., and Hsu, S. P., 2001, "Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution", *Building and Environment*, 36, 989-998.
- Gerdes, F., and Olivari, D., 1999, "Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon", *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82, 105-124.
- Huang, H., Akustu, Y., Arai, M., and Tamura, M., 2000, "A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis", *Atmospheric Environment*, 34, 689-698.
- Kacira, M., Short, T. H., and Stowell, R. R., 1998, "A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses", *Trans. ASAE*, 41 (3), 833-836.
- Lee, I. B., 1998, "Fluid dynamic simulation and validation of a naturally ventilated multi-span greenhouse", Department of Food, Agricultural and Biological Eng., Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- Liddament, M. W., 1996, "A guide to energy efficient ventilation", Air infiltration and ventilation center, UK.
- Mistriotis, A., Bot, G. P. A., Picuno, P., and Scarascia Mugnozza, G., 1997a, "Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics", *Agricultural and Forest Meteorology*, 85, 217-228.
- Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, P. A., and Scarascia Mugnozza, G., 1997b, "Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero and low wind speeds", *Agricultural and Forest Meteorology*, 88, 121-135.
- Okushima, L., Sase, S., and Nara, M., 1989, "A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics", *Acta Hort.*, 248, 129-136.
- Sase, S., Takakura, T., and Nara, M., 1984, "Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of naturally ventilated greenhouse". *Acta Hort.*, 148, 329-336.
- Woodruff, V. I. 1997, "Analysis of vent designs for naturally ventilated greenhouses", M. S. thesis, Department of Food, Agricultural and Bio-

- logical Eng., Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- Yaglou, C. P., and Witheridge, W. N., 1937, "Ventilation requirements-Part 2", ASHRAE Trans., 42, 423-436.
- Yuan, X., Chen, Q., and Leon, R., 1999, "Measurements and computations of room airflow with displacement ventilation", Trans. ASHRAE, 4265 (RP- 949), 340-352.
- 黃俊強，2001，「低層建築物環境風場與風載之數值研究」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。
- 郭鴻興，2001，「以計算流體力學分析自然通風低層建築物之通風特性」，國立台灣大學農業工程學研究所碩士論文。

收稿日期：民國 91 年 8 月 14 日

修正日期：民國 91 年 9 月 13 日

接受日期：民國 91 年 9 月 24 日