

以計算流體動力學分析自然通風低層建築物 之通風特性－以溫室建築為例

A CFD Evaluation on Ventilation Characteristics of Naturally Ventilated Low-Rise Buildings － Taking Greenhouse as Example

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

郭 鴻 興

Hong-Hsing Kuo

摘 要

本研究使用計算流體動力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 進行自然通風低層建築物通風效率之分析。首先，以紊流大渦模擬模式 (Large Eddy Simulation, LES)配合 Navier-Stokes 控制方程式，進行 CFD 數值環境風場模式的研究發展，繼而將數值模擬結果與前人風洞實驗資料進行比對分析，以驗證數值模式之參數，其相對誤差均在 10%以內。本研究再跟文獻中 CFD 最常見之紊流 k- ϵ 模式模擬結果比較，比較結果顯示 LES 模式具有非等向性渦旋模擬之優越性，優於紊流 k- ϵ 模式，尤其是在角隅及屋頂部位，k- ϵ 模式所得之結果與實驗值差距更大。最後，本研究對單區間雙斜式溫室，予以通風數值模擬測定，對不同位置及角度之開口做有效性之室內通風路徑組合，嘗試以既有之溫室通風控制模式作為基礎，尋求室內通風路徑之最佳化方式，以獲得有效率、可靠的通風設計資料，並作為工程師設計參考之依據。

關鍵詞：計算流體動力學，低層建築物，通風特性，自然通風效率，紊流大渦模擬模式，通風路徑。

ABSTRACT

A systematic analysis of the ventilation process in naturally ventilated low-rise buildings was performed with the use of computational fluid dynamics (CFD) to solve the Navier-Stokes equations together with the large eddy simulation (LES) turbulence model.

The validity of the model was verified by comparing the simulated numerical results with the published experimental data and the conventional k- ϵ turbulence model. A good agreement between the numerical data and the experimental measurements was found if a LES turbulence model is applied in CFD simulation, especially for the flow fields located in the corners and top of the buildings. The relative error between the measured data and the simulated result was within 10%. The influence of design characteristics, such as the opening angles and locations on the ventilation efficiency, was examined in the case of a typical Venlo greenhouse, which is a representative example of naturally ventilated low-rise buildings. It is demonstrated that CFD is a powerful tool for developing improved designs with respect to ventilation efficiency.

Keywords: Computational fluid dynamics, Low-rise buildings, Ventilation characteristics, Natural ventilation rate, Large eddy simulation, Ventilation path.

一、前言

低層建築物係指樓層在三至五層以下之建築物，其廣泛存在於台灣鄉村地區及都會區邊緣地帶，類別包括有居住用建築物（如一般集合式民宅、獨棟別墅）及農業用建築物（如溫室、畜舍、作物倉儲）等。相較於都會區高層辦公大樓大多屬密閉式結構，以機械通風及中央空調系統作為更新室內空氣的主要手段，低層建築物則是大多採用自然通風方式更新室內空氣，以避免室內空氣品質的惡化。近年來，由於地球環境破壞日趨嚴重，並已擴大至地球的尺度，使得人類的生存遭到嚴重的威脅，全世界正展開全面性的地球環保運動。在台灣，政府亦極力推動「綠建築」觀念，訂立以健康、生態、節約資源、減廢為最高導向的台灣國民居住水準，建築物採用自然通風較採用機械空調系統通風更能符合綠建築「省資源、低耗能、低污染」的施行目標。因此，現階段進行低層建築物在自然通風狀況下通風特性之研析，有其階段性意義。

對於研究低層建築物室內之自然通風與污染質傳輸，有巨觀之多區間氣流模式(macroscopic multi-zone flow model)(Feustel, 1999)與微觀之計算流體動力學室內氣流模式(microscopic CFD indoor-airflow model)(Mistriotis et al., 1997a,

1997b ; Kacira et al., 1998)。多區間氣流模式係將建築物依隔間或氣流通方向劃分為多個獨立的室內區間，以氣流質量守恆及污染物質守恆為理論基礎，計算室內各氣流開口的平均氣流量及各區間的平均室內污染濃度值，以判定室內空氣品質；而計算流體動力學室內氣流模式則是以紊流數值模式詳細模擬室內各時間各地點之氣流場和污染濃度值，藉以判定室內空氣品質指標。這兩模式各有其長處及限制，多區間氣流模式可模擬低層建築物多室內空間之氣流流況，惟每一室內區間採平均值計算，雖方便計算卻無法精密地描述一室內空間任何角落之氣流軌跡與污染濃度。而計算流體動力學室內氣流模式之優越性為能計算室內空間詳細的紊流氣流情形，但現階段限於電腦計算能力，對多區間建築物之詳細氣流場與污染濃度場的計算仍有其困難度。對於自然通風低層建築物而言，由於溫室內採光性佳、室內外風壓差、濕氣、空氣品質之控制管理，所引起之熱浮力、風壓力、濕度、空氣品質指標，具有代表性問題需要探討，因此本研究選用單一區間之雙斜式溫室作為低層建築物之表徵，以計算流體動力學分析自然通風在溫室室內空間之通風特性，以作為溫室內之自然通風與污染傳輸計算之工具。

自 1990 年代，以計算流體動力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析溫室自然通

風特性及預測換氣率，做為溫室流場、濕度及污染濃度評估之依據，已逐漸普遍(Awbi, 1991; Mistriotis et al., 1997a, 1997b; Stathopoulos, 1997; Kacira et al., 1998; Boulard et al., 1997, 1998, 1999)。以台灣夏熱冬濕之氣候，在其通風效率良好時，可防止作物礦物的流失及減少細菌之生長，亦可避免結露現象，使作物產量增加且可提昇其品質，並減少植物化學肥料的使用(王，1988)。對於因空氣交換率不足所產生之不良的室內空氣品質，進而造成生物不舒適或生長遲緩之情形，由 CFD 重複分析各項造成空氣惡化之因子，以作為溫室建築設計及修改設計之參考，較風洞實驗為經濟。在室內通風之行為中以自然通風方式最為常見，經由自然通風換氣來更新溫室室內空氣，避免空氣品質惡化，由來已久。再者由室內外溫度差亦可促使室內外環境因熱浮力作用而產生氣流質量交換，但若室外空氣流速在 0.5ms^{-1} 以上時，熱浮力效應可忽略(Mistriotis et al., 1997b)。本研究使用計算流體動力學室內氣流模式配合紊流大渦模擬模式，來分析自然通風在溫室之通風特性，其結果並與文獻之風洞實驗(Sase et al., 1984)資料及 k-ε 紊流數值模式(Mistriotis et al., 1997a)加以比對查驗與修正，使模擬結果更趨近於實際狀況。

計算流體動力學研究範圍非常廣闊，如以探討室內通風環境之課題，在模擬上則需有一套紊流數值模式，來作為流場分析之工具，而其結果之優劣亦影響研究室內通風之良窳。本研究以計算流體動力學之紊流大渦模擬模式 (Large Eddy Simulation, LES) 模擬多組單區間雙斜式溫室，對不同室外風速、不同開口位置及角度做室內通風路徑組合，以尋求室內通風路徑之最佳化方式。

本研究期望能達到以下之研究目的：(1)建構低層建築物室內通風紊流大渦模擬架構，模擬其氣流場狀況，並與風洞實驗資料及 k-ε 系列模式結果進行比對分析，(2)分析影響低層建築物開口有效性之控制，瞭解改進對策之操作，及(3)尋求低層建築物開口有效性與通風路徑分析設計及使用行為之建議。

二、研究方法

本研究之研究方法包含 CFD 基本控制方程式、紊流閉合模式、邊界條件、低層建築物環境風場之二維度 LES 模擬方程式及數值方法與網格點佈置等，茲介紹如下：

(一) CFD 基本控制方程式

風經過低層建築物之流場控制方程式，由於其流速一般小於 0.4 倍音速(Awbi, 1991)，可用不可壓縮黏性流體之連續方程式及運動方程式描述，以張量形式表示的話，連續方程式如(1)式所示，而 Navier-Stokes Equations 則如(2)式所示。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中， t ：為時間座標； x_i ： $i=1,2,3$ 表沿 x, y, z 方向之座標； ν ：流體運動黏滯係數(kinematic viscosity coefficient)； ρ ：流體密度； P ：流體壓力； u_i ： $i=1,2,3$ 表沿 x, y, z 方向之流速； g ：重力加速度。(1)及(2)式僅能使用於流速緩慢之層流流場(Laminar flow field)。

(二) 紊流閉合模式

紊流閉合模式之發展主要基於在有限的計算資源下，紊流現象無法完全被數值模擬所描述，故需透過模式之建立，估算出無法被數值方法所描述部份的影響。通常在工程上對於紊流之數值模擬，以直接模擬法 (Direct Numerical Simulation, DNS) 最為準確，此法對紊流中所有大大小小的漩渦均進行模擬，但現今的電腦由於受限於容量及速度，仍無法直接計算紊流場中所有的漩渦，僅能適用於較低雷諾數的紊流場(目前雷諾數約為 $O(1000)$ 左右)。

除了以直接模擬法外，在建立紊流模式上大致可分為二種方式，一為傳統之紊流模式，以 k-ε 模式為代表，此模式之基本架構是以對統計空間所建立的雷諾方程式(Reynolds equations)為主

體，將方程式中的雷諾應力給予數學模型描述，使得控制方程式成爲閉合系統，再以數值方法求解，此類模式多假設紊流所有大小尺度不同的渦流都是等向性的，引入的模式也不區別大小渦流運動的特點。另一種方式爲大尺度漩渦模擬法 (Large Eddy Simulation)，該法是以空間濾波方式，濾掉數值方法所無法計算之小尺度漩渦的影響，而小尺度漩渦則透過數學模型來估算，通常過濾波數會取在 Kolmogorov 慣性區內，如此可在可解析之數值網格點上，表現出較正確的結果。因此，大尺度漩渦模擬之漩渦具有非等向性，但小尺度漩渦則以等向性之假設代表。以一般低層建築物內外環境通風的角度而言，由於其流場的分佈具有高度的不等向性，在紊流產生的機制之中，雷諾應力與剪應力之變化有相當大之關係，剪應力在流場中過大的變化會造成漩渦之不等向性，故現今對環境風場的模擬，使用大尺度漩渦模擬法有逐漸增加的趨勢，而本研究亦將使用大尺度漩渦模擬法來進行防風設施紊流場的模擬分析。

當氣流流場流經低層建築物時，其流場各質點間物理量之傳輸已非單純之運動黏滯性作用，而是以紊流狀態傳輸，故考慮空間濾波函數 $G(x_i, t)$ 如下，濾掉數值方法所無法計算之小尺度漩渦

$$\bar{u}(x_i, t) = \frac{1}{\Delta V} \int G(x_i, t) u(x_i, t) dV \dots\dots\dots(3)$$

而將瞬時速度 u_i 分成時間平均量 \bar{u}_i 與抖擾量 u'_i ，即 $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ，則(1)式及(2)式可寫爲

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_{sgs} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \dots\dots\dots(5)$$

其中 ν_{sgs} 爲亞格子漩渦黏滯係數(subgrid stress eddy viscosity)

表 1 數值模式邊界條件

| | 開放邊界 | | | 固定邊界 |
|----|---------|-------|-------|----------|
| | 入流處 | 上邊界 | 出流處 | 固體與流體接觸面 |
| 速度 | 指數律風速分佈 | 零速度梯度 | 零速度梯度 | 滑動或不滑動邊界 |

$$\nu_{sgs} = (Cs\Delta)^2 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots(6)$$

(6)式中 $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ 爲濾波特性寬度， Cs 爲 Smagorinsky 常數，通常由實驗決定。因此，大渦模擬之控制方程式，即(4)式及(5)式，係以求解 \bar{u} ，而不直接求解 u'_i 。

(三) 邊界條件

環境風場之模擬基本上爲無限域問題，以電腦有限之計算資源予以模擬環境風場，其困難度在於如何訂定計算範圍及邊界條件與起始條件，使邊界效應不致影響計算結果，故初始條件與邊界條件假設如下所示。初始條件採(1)流場之初始流速及壓力已知；及(2)入流初始風速分佈爲開闊之平原(即 C 種地況)。邊界條件則如表 1 所示，表中必須強調的是本研究所採用之固體與流體接觸面邊界條件爲固定邊界條件。固定邊界係指不可穿透之邊界，即在邊界處沒有流體通量通過，其邊界條件可分爲兩種，即

- (1)沿邊界法線方向之速度等於零。
- (2)沿邊界切線方向的速度，依流體的黏滯性可分爲滑動(free slip)與非滑動(no slip)兩種不同的條件，非滑動邊界條件則表示流體必須附著在邊界上，所以其切線方向之速度爲零。本研究係採用滑動邊界條件，即邊牆之邊界條件上之合速度應上切於邊壁。另外，本研究亦使用虛擬邊界法來處理流體自邊壁反射之狀況，該法以一反射程序應用於邊牆之邊界條件，且經測試結果良好，本研究即使用此法來處理邊壁之邊界條件。

(四) 低層建築物環境風場之二維度 LES 模擬方程式

若低層建築物側向流況變化甚小，則垂直平面二維之連續方程式可由(4)及(5)三式簡化而得：

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - g + \nu_t \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

其中， t ：為時間座標； x ：為橫向座標(水平方向)； z ：為縱向座標(垂直方向)； $\nu_t = \nu + \nu_{sgs}$ ：有效紊流黏滯係數(effective turbulent viscosity coefficient)； P ：壓力； $\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}$ ：為沿 x 或 y 方向之偏微分運算子； \bar{u} ：沿 x 方向之水平流速； \bar{v} ：沿 y 方向之垂直流速； g ：重力加速度；(7)、(8)及(9)式分別表示氣流之連續方程式、 x 及 y 方向之運動方程式。

(五) 數值方法及網格點佈置

本研究為使模擬結果更接近於低層建築物實際氣流場流動狀況，能準確地計算通風口氣流速度，以用最傳統之一階精度之上風法(upwind scheme)及中央差分兩種混合方式對非線性之對流項進行離散處理，來進行數值模式發展。此外，為使氣流流動之邊界條件在格點上求解之時，減少引用差值方法以增進計算精度，故模式採非交錯格網分布，即流速及壓力在同一格點上，以有限差分法(finite difference method)將控制方程式離散後以顯式法(explicit scheme)解之，求解過程中乃採每一格點之質量守恒之差值，作為該點壓力之修正參數，直至整個流場滿足質量守恒。

三、模式驗證

在 CFD 模式與實驗數據驗證成功，此一前

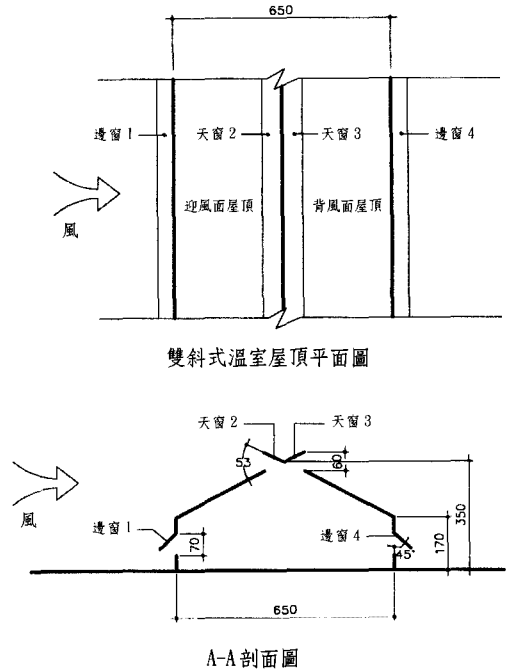


圖 1 雙斜式溫室屋頂平面及剖面圖 (單位：cm)

提下，使用 CFD 模擬低層建築物環境風場較以風洞試驗的方式為便宜、簡便，模式並可依不同設施幾何形狀、氣象條件(風速、風向)、周遭環境之地形等進行數值境況模擬。因此，為了確保 CFD 模式的準確可靠，必須進行模式驗證。

本研究以雙斜式溫室，作為自然通風低層建築物之開口特性數值模擬之研究案例，在模式驗證部份，以 Sase et al.(1984)之二維 1/10 縮小比例溫室模型風洞實驗結果進行模式驗證，以了解模式模擬之正確性。該風洞實驗為以指數風速分佈 2.0m/s 垂直的吹向單跨度溫室屋脊，其屋頂、邊牆有通風口，縱向沿屋脊延伸且連續，屋脊高 3.5M、導水溝高 1.7 M、寬 6.5 M、屋頂及邊牆窗淨高 0.7 M 下，其邊窗旋轉點高為 1.17 M，雷諾數為 4.7×10^4 (如圖 1)。

在等溫條件下 Sase et al. (1984)使用二維熱線風力計和煙流量測氣流場，如圖 2 所示，其結果顯示一強烈的入氣流流入邊窗 1 後，第一個強勁氣流沿室內屋頂向天窗 3 流出；第二個相當清晰的強勁循環氣流順著室內形狀，也出現溫室空

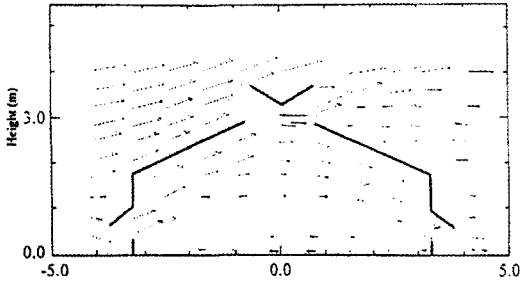


圖 2 雙斜式溫室風洞實驗所量測之速度向量場 (Sase et al., 1984)

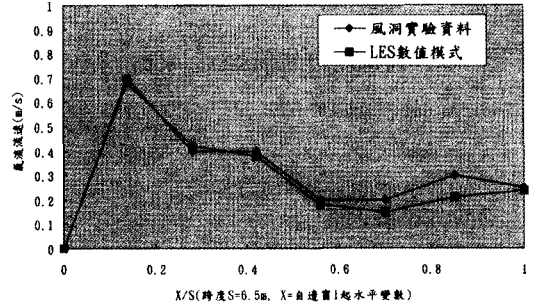


圖 5 風洞實驗量測風速值與 LES 數值模式之比較

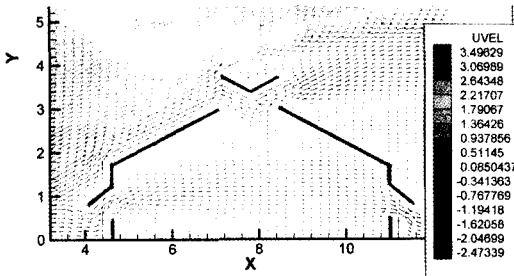


圖 3 LES 數值模擬速度向量場

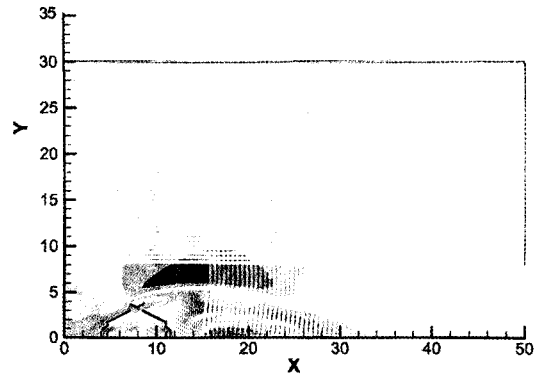


圖 6 風場模擬範圍示意圖

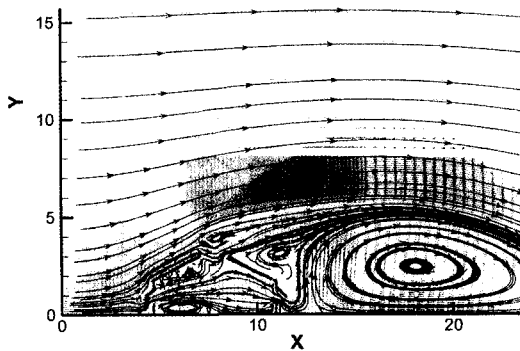


圖 4 LES 數值模擬流線場

間混合空氣氣流，另一部份亦在於循環氣流中從邊窗 4 流出，最後在背風面屋頂之外部表面出現一大渦流。

在相同溫室參數條件下，本 LES 模式模擬之速度向量場(velocity vector field)與流線場(streamline)如圖 3 及圖 4 所示，一強勁氣流自邊窗 1 流入，沿著室內屋頂產生抖動及小渦流向天窗 3 流出約 60% 氣流量；第二個相當清晰的強

勁循環氣流順著室內形狀往邊窗 4 流出約 40% 氣流量，另一部份亦在窗台後形成渦流約 1/3 溫室高，於循環氣流中也出現溫室空間混合空氣氣流，最後在兩天窗間(屋脊)出現一渦流及背風面屋頂之外部表面出現一大渦流。圖 5 為溫室內水平地面上方 1.5 公尺處風洞實驗與 LES 數值模式之風速比較，其相對誤差約在 10% 以內，故數值模擬結果與風洞試驗十分吻合。

四、模擬結果與討論

本研究模仿台灣夏季之氣候條件，其風場溫度 33℃，風場相對濕度 75%。數值模式計算範圍以 8h 高、15h 長(h=3.5m 為雙斜式溫室之高度)為風場模擬範圍，在室內外均簡化為無干擾物及室內隔間，模擬邊界上游距離主建築物約 2h，(因迎風面邊牆僅高 1.7m，下切氣流受迎風水平氣流影響而不明顯，予以縮短)，模擬邊界下游離主建築物約 11h，如圖 6 所示。

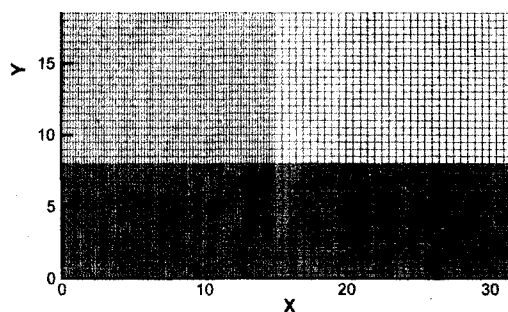


圖 7 數值模式格網圖 (最密至最疏計有四個區域)

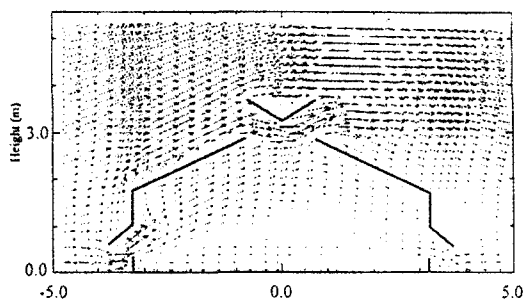


圖 8 紊流 k-ε 模式模擬之速度向量場 (Mistriotis et al., 1997a)

數值模式使用的格網由最密至最疏為 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ， $10\text{cm} \times 50\text{cm}$ ， $50\text{cm} \times 20\text{cm}$ ， $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 等四個區域，如圖 7 所示，其可變正交格網在溫室所在區域以最密格網進行計算，以得到最精密的計算結果，而其它三個區域採較疏格網，但格網點距離亦有所限制，以避免數值不穩定而造成誤差的擴大。在本研究，總格網點數設計在 20000 點以內，如此可不失準確性並可節省數值計算時間。

(一) 風經過二維低層建築物之室內環境流場

本模式再跟文獻中 CFD 之 k-ε 模式在相同狀況下所模擬的雙斜式溫室結果進行比較 (Mistriotis et al., 1997a)。如圖 8 所示，k-ε 模式所模擬之結果雖在室內有渦流氣流產生，但背風面屋頂之外部表面無渦流現象，故無法準確地描述紊流軌跡。比較圖 3 及圖 4 可知，本 LES 模式所模擬而得的結果在背風面屋頂及角隅處均

表 2 雙斜式溫室空氣交換率模擬案例

第 1 組

| Case | Left side vent | Roof vents | Right side vent | Span profiles |
|------|----------------|------------|-----------------|---------------|
| 1A | 0° | 53° · 53° | 45° | |
| 1B | 45° | 53° · 53° | 45° | |
| 1c | 90° | 53° · 53° | 45° | |

第 2 組

| Case | Left side vent | Roof vents | Right side vent | Span profiles |
|------|----------------|------------|-----------------|---------------|
| 2A | 45° | 53° · 53° | 0° | |
| 2B | 45° | 53° · 53° | 45° | |
| 2c | 45° | 53° · 53° | 90° | |

第 3 組

| Case | Left side vent | Roof vents | Right side vent | Span profiles |
|------|----------------|------------|-----------------|---------------|
| 3A | 45° | 0° · 53° | 45° | |
| 3B | 45° | 53° · 0° | 45° | |

第 4 組

| Case | Left side vent | Roof vents | Right side vent | Span profiles |
|------|----------------|------------|-----------------|---------------|
| 4A | 0° | 53° · 53° | 0° | |
| 4B | 45° | 0° · 0° | 45° | |

有渦流氣流產生，且與圖 2 之風洞實驗值相當接近。因此，綜合以上各圖可知，本 LES 模式模擬結果均優於 k-ε 模式，顯示 LES 模式具有非等向性渦流模擬之優越性。

(二) 自然通風效率--空氣交換率結果分析

雙斜式溫室在迎風面邊窗開口角度、天窗開口、背風面邊窗開口角度及入流風速變化下之空氣交換率，如表 2 共分成四組，在表中第一組 A 型即簡寫為「1A」，之後所述為該型簡稱。而各組依本 CFD 數值模式所模擬而得之空氣交換率 (min^{-1}) 則如表 3 所示，空氣交換率之計算係將建築物總入流量 (或出流量) 除上室內單位長度之體積，代表單位時間內外氣氣流所交換的室內空間體積，空氣交換效率值愈高表示自然通風效率愈好。同時本研究進一步分析各組之每一開口，在不同指數風速分佈作用下氣流體積流通量及其速度向量場與流線場，因限於章節篇幅，僅

表 3 雙斜式溫室模擬空氣交換率 (min^{-1})

| 第 1 組 | | | |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| 指數風速分佈 | Case 1A | Case 1B | Case 1C |
| 2.0 ms^{-1} | 1.84 | 3.18 | 4.16 |
| 1.0 ms^{-1} | 0.88 | 1.47 | 1.91 |
| 第 2 組 | | | |
| 指數風速分佈 | Case 2A | Case 2B | Case 2C |
| 2.0 ms^{-1} | 2.16 | 3.18 | 3.80 |
| 1.0 ms^{-1} | 1.04 | 1.47 | 1.81 |
| 第 3 組 | | | |
| 指數風速分佈 | Case 3A | Case 3B | |
| 2.0 ms^{-1} | 1.68 | 2.05 | |
| 1.0 ms^{-1} | 0.86 | 0.89 | |
| 第 4 組 | | | |
| 指數風速分佈 | Case 4A | Case 4B | |
| 2.0 ms^{-1} | 0.14 | 1.35 | |
| 1.0 ms^{-1} | 0.04 | 0.62 | |

表 4 雙斜式溫室第 1 組模擬之通風開口氣流量 (m^3s^{-1})與方向

| 指數風速分佈 | Vent no | Case A | Case B | Case C |
|-----------------------|---------|---------|---------|--------|
| 2.0 ms^{-1} | 邊窗 1 | 0(關閉) | +0.470a | +0.924 |
| 2.0 ms^{-1} | 天窗 2 | +0.528 | +0.443 | +0.271 |
| 2.0 ms^{-1} | 天窗 3 | -0.449b | -0.546 | -0.623 |
| 2.0 ms^{-1} | 邊窗 4 | -0.079 | -0.367 | -0.572 |
| 1.0 ms^{-1} | 邊窗 1 | 0(關閉) | +0.243 | +0.456 |
| 1.0 ms^{-1} | 天窗 2 | +0.254 | +0.181 | +0.092 |
| 1.0 ms^{-1} | 天窗 3 | -0.202 | -0.264 | -0.31 |
| 1.0 ms^{-1} | 邊窗 4 | -0.052 | -0.16 | -0.238 |

^a+ 表氣流自室外流入溫室內

^b- 表氣流自溫室內流出至室外

將第一組模擬結果示出，如表 4 及圖 9 至圖 14 所示。

如圖 9 至圖 14 所示，1A 迎風面邊旋轉窗關閉，主要氣流入天窗 2，隨即自天窗 3 流出，少部份氣流約 15% 往邊窗 4 流出，並在溫室內形成大渦旋。雖空氣交換率為 1.84 min^{-1} ，然而大部份氣流僅在天窗附近交換，使溫室內空氣滯留時間變長且少量往邊窗 4 流出，故實際影響溫室

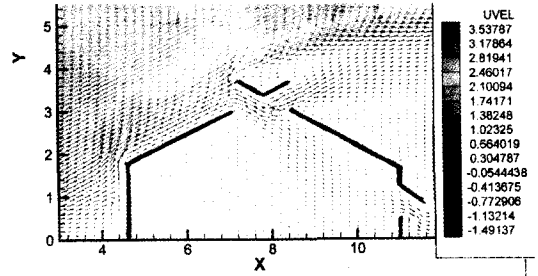


圖 9 指數風速分佈為 2.0 m/s 下之 LES 數值模擬速度向量場 (1A 組)

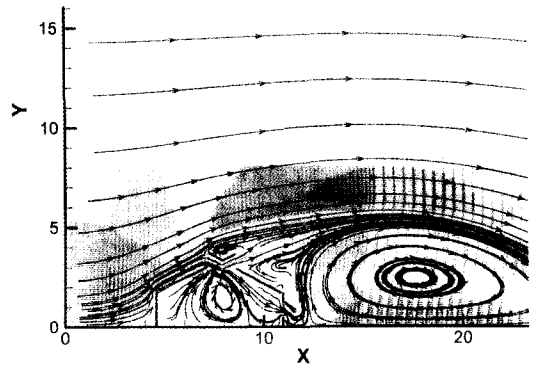


圖 10 指數風速分佈為 2.0 m/s 下之 LES 數值模擬流線場 (1A 組)

室內通風僅為 0.28 min^{-1} 。1B 迎風面邊旋轉窗開 45° ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成渦旋約溫室之 $1/3$ 高，其上氣流一部份往邊窗 4 流出，另一部份上流往天窗 3 流出。1C 迎風面邊旋轉窗開 90° ，主要氣流流入邊窗 1，約為 1B 邊窗 1 之 2 倍，也在窗台後形成渦旋約溫室之 $1/3$ 高，迎風面天花板下亦形成渦旋，其上氣流一部份往邊窗 4 流出，另一部份上流往天窗 3 流出。

2A 迎風面邊旋轉窗開 45° ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦旋，而邊窗 4 關閉致使順流而上往天窗 3 流出有 50%，當愈靠近邊窗 4 時，則有死域形成，讓溫室內空氣停留時間變長，即使忽略天窗 2 入流量其實際空氣交換率僅為 1.07 及 0.62 min^{-1} 。2B 之溫室室內通風物理情況同 1B。最後，2C 迎風面邊旋轉窗開 45° ，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦旋，但 2C 之空氣交換率較 2B 為佳。

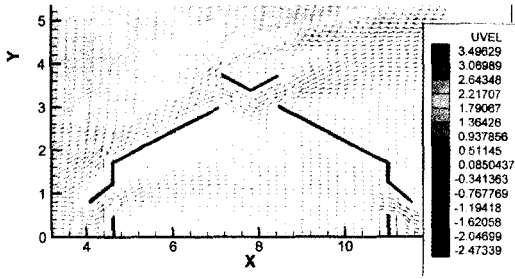


圖 11 指數風速分佈為 2.0m/s 下之 LES 數值模擬速度向量場 (1B 組)

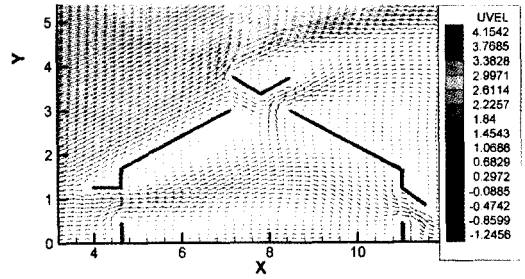


圖 13 指數風速分佈為 2.0m/s 下之 LES 數值模擬速度向量場 (1C 組)

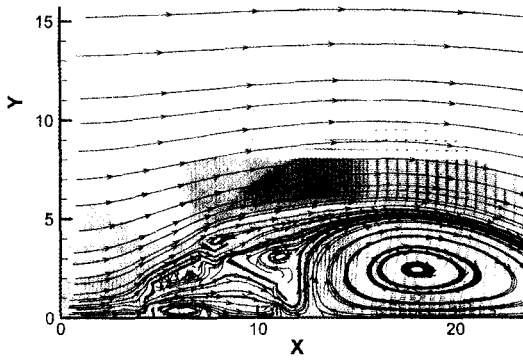


圖 12 指數風速分佈為 2.0m/s 下之 LES 數值模擬流線場 (1B 組)

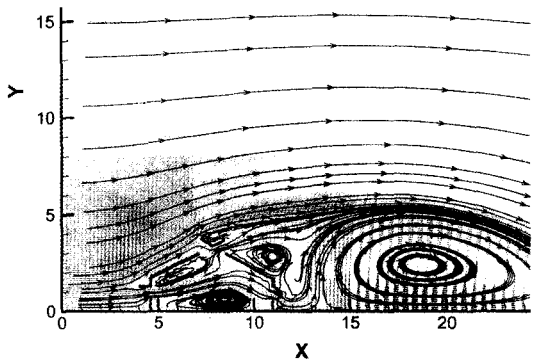


圖 14 指數風速分佈為 2.0m/s 下之 LES 數值模擬流線場 (1C 組)

3A 迎風面邊旋轉窗開 45°，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成大渦旋，其主要氣流往邊窗 3 流出(約 80%)，另一部份氣流往邊窗 4 流出。3B 迎風面邊旋轉窗開 45°，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦旋，又因氣流流入邊窗 2，使得迎風面天花板下有較大紊流產生。3B 型之空氣交換率為 2.05 min⁻¹ 較佳，惟當指數風速分佈為 1.0ms⁻¹ 時，則 3A 與 3B 兩型之空氣交換率為 0.89 及 0.86 min⁻¹ 甚為接近，表示在低入流風速時，開啟迎風面或背風面天窗的差別並不大。

4A 迎風面、背風面邊旋轉窗關閉，主要氣流流入天窗 2，隨即自天窗 3 流出，少部份氣流約 8% 流入溫室內。並在溫室內形成大渦旋，影響溫室室內通風而使得實際空氣交換率僅 0.14 及 0.04 min⁻¹。4B 迎風面邊旋轉窗開 45°，主要氣流流入邊窗 1，在窗台後形成小渦旋，又在迎

風面天花板下有較小渦旋產生；因天窗全關閉，故氣流由邊窗 4 流出，其空氣交換率為 1.35 及 0.62 min⁻¹。

低層建築物之環境風場，大都位於郊外、坡地，且為寬廣地域居多，因此，低層建築物周遭會影響自然通風參數為基地所在位置、建築物幾何外形、建物周遭環境、基地氣象(風速、風向)、開口大小等。其中參數以迎風面開口角度(開 90° 時空氣交換最佳)最為重要，而控制室內大多數通風體積的邊牆開口又優於僅控制室內上方通風體積的天窗。

(三) 通風路徑分析

低層建築物因環境風場產生自然通風空氣對流現象，迎風面風壓形成正壓，背風面風壓形成負壓，氣流由迎風面之邊窗、天窗吹入溫室內，形成紊流，紊流分佈位置將視開口位置與角

度而定。其通風路徑一部份往背風面天窗，另一部份往背風面邊窗流出，對室內空氣污染物產生稀釋和置換作用。對於開口位置不同，而形成不同通風路徑，如能將通風路徑流經污染氣懸微粒區或空氣污染產生與聚集處，則對改善室內空氣品質將有很大幫助。

以通風路徑分析自然通風效率，能更進一步了解室內通風之效果，從路徑分析更能得知室外氣流如何被引導至工作人員或任何污染源所在位置。以 1A 型開口配置為例，主要氣流自天窗 2 流入，隨即自天窗 3 流出，造成室內左側形成一大渦流，若污染源位於本區，則污染源質會在區內流動盤旋，室外氣流將無法有效稀釋污染物質；反之，若污染源位於室內右上側，則室外氣流可輕易將污染物質吹出室外。

低層建築物如為溫室之空間型態，由於使用機能及高經濟作物要求，可選擇溫室外形、開口有效性之各種不同設計需求，如能多加利用通風路徑，則可容易選擇最佳化空間對流方式，達到減少污染源境界。若進出溫室內外氣流被隔間牆、家具等物品阻礙，則可修正進氣口位置、構架造型及隔間牆、家具擺設之位置，如此一來，經由路徑分析亦可得知室內污染源是否能夠有效地去除至室外。

由本研究之紊流數值模式模擬氣流場，其結果可有效地作為通風路徑分析資料。研究結果經由整合歸納則可得出最佳開口有效性之位置、換氣量與隔間牆、家具擺設位置。

五、結 論

- (1) 本研究以數值模擬結果比較風洞實驗資料，結果發現以 LES 紊流模式具非等向性渦流，優於紊流 k- ϵ 模式。另外，在角隅或屋頂部位，k- ϵ 模式所得之結果與實驗值差距更大。
- (2) 第一組至第四組自然通風率綜合結果以邊窗及天窗全開(1C 型)之空氣交換率 4.16 min^{-1} 為最佳，而以邊窗全關天窗全開之 4A 型效果最差，其空氣交換率僅 0.14 min^{-1} ，故邊窗開口之有效性對室內通風效率好

壞，具有重要影響。

- (3) 從第四組模擬結果加以比較，不難發現 4A 型僅開啟迎風面天窗，而 4B 型僅開迎風面邊窗，在不同入流風速條件下，4B 型空氣交換率為 1.35 及 0.62 min^{-1} ，約為 4A 型空氣交換率 0.14 及 0.04 min^{-1} 之 10 倍，顯示控制室內大多數通風體積的迎風面邊窗對室內通風效率的重要性。
- (4) 通風路徑流經污染氣懸微粒區或空氣污染產生與聚集處，則對改善溫室內空氣品質將有很大幫助，其結果分析可有效地作為通風路徑分析資料，經由整合歸納出開口之位置、換氣量與隔間牆擺設位置。
- (5) 建築物內部結構及植物均會影響內部氣流，故未來研究 CFD 模擬，將以內邊界方式予以考量，使實際情況與模式能更精緻地吻合。
- (6) 未來在 CFD 研究必須包含熱力效果，因熱浮力驅動通風在低風速 0.5 ms^{-1} 以下時是不可忽略的。
- (7) 以 CFD 進行三維度計算因氣壓差及熱浮力所引起在低層建築物群之自然通風，可獲得建築物配置之最佳化設計。

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

- 王鼎盛，1988，“設施園藝設計手冊”，台灣大學農業工程學系農業設施研究室。
- Awbi, H. B., 1991, *Ventilation in Buildings*, E and FN Spon, London, UK.
- Boulard T., Meneses, J. F., Mermier, M., and Papadakis, G., 1997, “The Mechanisms Involved in the Natural Ventilation of Greenhouse,” *Agricultural and Forest Meteorology*, 79, 61-70.
- Boulard, T., Lamrani, M. A., Roy, J. C., Jaffrin, A., and Bouirden, L., 1998, “Natural Ventilation by

- Thermal Effect in a One-Half Scale Model Mono-Span Greenhouse,” Transactions of the ASAE, 41(3), 773-781.
- Boulard, T., Haxaire, R., Lamrani, M. A., Roy, J. C., and Jaffrin, A., 1999, “Characterization and Modelling of the Air Fluxes induced by Natural Ventilation in a Greenhouse,” Journal of Agricultural Engineering Research, 74, 135-144.
- Feustel, H. E., 1999, “COMIS-an international multizone air-flow and contaminant transport model,” Energy and Building, 30, 3-18.
- Kacira, M., Short, T. H., and Stowell, R. R., 1998, “A CFD Evaluation of Naturally Ventilated, Multi-span, Sawtooth Greenhouses,” Transactions of the ASAE , 41(3), 833-836.
- 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, G.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.
- Sase, S., Takakura, T., and Nara, M., 1984, “Wind Tunnel Testing on Airflow and Temperature Distribution of a Naturally Ventilation Greenhouse,” Acta Horticulture, 148(1), 329-336.
- Stathopoulos, T., 1997, “Computational Wind Past Achievements and Future Challenges,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67 & 68, 509-532.

收稿日期：民國 90 年 8 月 14 日

修正日期：民國 90 年 9 月 27 日

接受日期：民國 90 年 10 月 29 日