

計算流體力學 於農業溫室的應用

農試所農工組 姚銘輝 陳智霖 邱郁凱 洪福良

一、前言

全球氣候變遷造成氣候系統的混亂，在暖化的長期趨勢預測下，105年的“霸王寒流”讓我們驚覺，極端天氣的發生將是未來農業生產極大的威脅。由於極端天氣強度及發生頻度難以預測，唯有強化農作物栽培時對環境的調適能力，才能確保穩定生產。我國農作物的生產方式從早期露天栽培，逐漸轉型為建立溫室栽培(隧道式、網室、塑膠布或玻璃溫室)，除營造隔離環境以控制病蟲害生產安全蔬果外，對防範氣象災害以提供穩定生長環境也是設施農業盛行的主因之一。然而，精密性高的環控溫室多半在完全密閉的環境中，容易衍生一些氣象逆境，如夏季高溫高濕及冬季低光等，雖可透過外部設備加以改善，但如何在低成本及低耗能的前提下，規劃設計更具有競爭力之台灣溫室，是科研單位所需努力的目標。

台灣溫室產業甚具發展潛力，除本身良好工藝水準外，周邊設施資材生產，環控設備(或系統)研發及農耕技術精湛，整個設施農業之產業鏈完整，不僅在國內市場推廣，更可放眼熱帶/亞熱帶市場。但此產業仍有瓶頸需要突破，其中溫室設計是需要強化的區塊，如何透過氣象資源與環境熱流模擬技術，以提供先期設計評估，來降低錯誤設計機率與減少環境逆境發生，將是溫室設計的要項。計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是一種數值分析的電腦模擬軟體，它從基本物理定理出發，協助實體設計及所需評估流程，很大程度上替代了耗資巨大的流體實驗設備，而溫室設施不同種類、型態及規格，運用CFD可對溫室設施做分析具有快速簡便、低成本等優點，並且不需要耗費大量資源建造實體設施即可達到一定效果，對溫室設計乃至溫室產業有必要投入資源進行此方面之研究，並將此技術推廣於設施產業。

二、CFD基本學理

計算流體力學的基礎是整合流體動力方程(包括質量、動量與能量守恆定

作者：姚銘輝研究員
連絡電話：04-23317715

律)，對控制體積內之流體進行計算。計算流體力學包含三種定律的利用，(1)質量守恒：幾乎任何流體都必須滿足此定律，單位時間內流體元素質量的增加，等於流入該流體元素的淨值質量。(2)動量守恒：微元素流體動量對時間變化率等於外界作用於該元素上的各種力之和，亦為牛頓第二定律。(3)能量守恒：微元素流體中能量增加率等於進入微元素的淨熱流量加上體與面力對微元素所作的功，亦為熱力學第一定律。

CFD數值計算的形式與流體運動狀態有關，溫室自然通風下風速低，流動過程溫度改變不大，可以視為流體是不可壓縮的流體運動，在直角坐標下可表示為方程式(1)之質量守恒方程，其中， u ， v ， w 分別是空氣流速 V 在 x ， y ， z 方向的速度分量。方程式(2)為動量方程，其中， f_x ， f_y ， f_z 分別是單位質量力在 x ， y ， z 方向

的分量，空氣密度： ρ (kg m^{-3})；壓力： P (Pa)；空氣動力黏度： μ (Pa s)；方程式(3)為能量方程，單位質量流體之內能： e (J kg^{-1})；空氣溫度： T (K)；空氣導熱係數： ϕ_a ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)；單位質量流體在單位時間內的能量傳遞： q ($\text{J kg}^{-1}\text{s}^{-1}$)； τ 為應力張量。

CFD最主要工作就是數值求解控制流體流動的微分方程式，得出流場在連續區域上的離散化分佈，從而近似模擬流體流動情況。透過這種數值模擬技術，我們可以得到在複雜問題的流場內各空間位置上的基本物理量(如速度、壓力、溫度、濃度等)的分布。

三、計算流體力學在溫室設計上的利用

計算流體力學為工程界常用的模擬評估技術，適用於工程建造前與現有設施改善之評估，其運用範圍極為廣泛，如目前全球的氣候預測模型也是由CFD所建立。1989年日本學者Okushima開始將計算流體力學引進至溫室研究，隨著理論基礎及運算能力的增進，有許多利用計算流體力學評估溫室環境的研究報告，但如何將此技術運用於台灣溫設施產業？

連續性方程(Continuity equation)：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{.....(1)}$$

納維爾－斯托克斯方程式(Navier-Stokes momentum equation)：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho f_y \quad \text{.....(2)}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho f_z$$

能量方程(Energy equation)：

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] = \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\phi_a \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(uP)}{\partial x} - \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(wP)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} +$$

$$\frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \quad \text{..... (3)}$$

1. 夏季高溫是台灣溫室栽培所面臨最大問題，在成本考量下，加大通氣面積以增加自然對流，包括溫室開頂及四周帷幕設計，即需導入CFD工程分析技術。溫度及風速流場分布是溫室環境的關鍵性因子，溫室環境內溫降效果與流場均勻分布對提高作物產量具有重要意義。因此，建立CFD技術來模擬溫室內熱流場，再藉由改變溫室通風口大小與位置、溫室大小、高度、跨距、體積比、太陽輻射等條件參數，分析溫室內微氣候環境變化，進行分析溫室現況及各項調控措施(如增大溫室通氣面積或增設擾流風扇)之效益。然這些需求應由CFD技術建立不同溫室的氣候環境模擬分析與資料庫，供溫室設計初期作為栽培環境評估工具，後期則可作為設計改善與通盤檢視的案例整合工具。
2. 多數精密溫室的降溫手段通常為水牆風扇或噴霧等，這樣的強制通風系統在設施內氣候環境變化是相當複雜的，尤其是蒸發降溫及能量轉換效能，利用CFD分析技術時，須建立這些設施的關鍵參數(水牆效率、風扇位置與大小、噴霧降溫系統)等環控因子，才能針對降溫設備進行評估。
3. 現有溫室樣式多、跨距也不同，各地氣候條件變化也大，再者通風方式也有自然對流及強制對流兩種方式，因此，目前需建構一套不同溫室型態的CFD分析資料庫與溫室設計評估手冊，在解決不同溫室設計問題時，縮短數值模擬過程所需時間，提高分析結果精確度。溫室栽培越來越為農民接受，但礙於溫室工程技術的諮詢管道相當缺乏，造成許多溫室不是有效率的利用甚至停擺，且通風設施的規劃不良也造成能源上的浪費。因此，可藉由CFD技術組成一個環境監控與溫室設計分析的團隊，以現場分析並提出即時改善方案來輔導設施農業生產者。
4. 目前無線網路(TCP / IP)和互聯網技術的進步，除了可以即時回傳佈點之感測器數據，也可結合CFD模擬技術呈現整體溫室內的環境參數，最終制定出最佳化栽培環境策略，並使用遠端控制作物生長環境。Pontikakos *et al.* (2005)使用三維CFD技術與web-based估算模型評估雙跨距溫室的自然通風效率，首先讓使用者定義邊界條件(外部的溫度、風速及風向)與結果輸出介面(溫室內部平均溫度的2D資料格式)，再透過網路連結適合的CFD模組進行計算與內插處理，最後輸出報表，這種評估模式，在用戶端需要的技術門檻低，容易上手，並且可即時快速預測溫室環境溫度和空氣流速。Stavrakakis *et al.* (2010)的研究報告則加上人工類神經網絡與CFD模型結合，結論是可作為評估各種建築設計節能的工具。
5. CFD模擬與作物生長模式的結合是一種跨領域的合作，以作物生長需求為控制環境條件的依據，將使溫室控制更為精準。目前國際上有多個研究團隊正在開發即時性的整合平台。依據

現有大氣環境資料與溫室基礎尺寸，去推算溫室設施內的網格點氣象資料，再輸入作物模式以估算作物光合作用速率及蒸散作用速率，也可作為作物生長預測之用，另由估算數值回饋控制溫室氣象環境，以營造作物生長之最佳環境。

四、計算流體力學應用在溫室設施的研究案例

本所使用CFD進行溫室設施環境流場的研究，使用工具為Fluent軟體及其內建之太陽輻射模組，模擬溫室內熱流變化情形，並參考實測氣象資料去修正模式以符合現地實況，以下有三項研究成果：

1. 溫室設施外流場的風速影響溫室內部溫度及風場變化。本研究原是評估預計建於中東阿聯之魚菜共生溫室設計，其原始通風設計在兩側牆面與屋頂分別配置有百葉窗通風口及自然通風筒，參照了阿聯當地全年測站資料並假設幾種情況，全年平均風向以北風、西北風為主，平均風速在2.5~4 m/s之間，大氣平均溫度在30℃與43℃(7~8月)，我們配合氣象測站資料去推估溫室在自然通風下內外熱流場剖面的分佈情形。評估結果顯示，(圖一)為外界不同風速下0.1、2.5、4m s⁻¹之下，CFD模擬溫室內之熱流場及風速場分布剖面圖，其環境條件是在外氣43℃下，由風速流場可看出，當外界風速越強時，通風口造成溫室內擾動的影響範圍越大，且溫室內渦流

停滯區域減少，將可使溫室內溫度降低；另外，靠近通風口附近的溫度，因引入外氣而呈現較低的溫度。

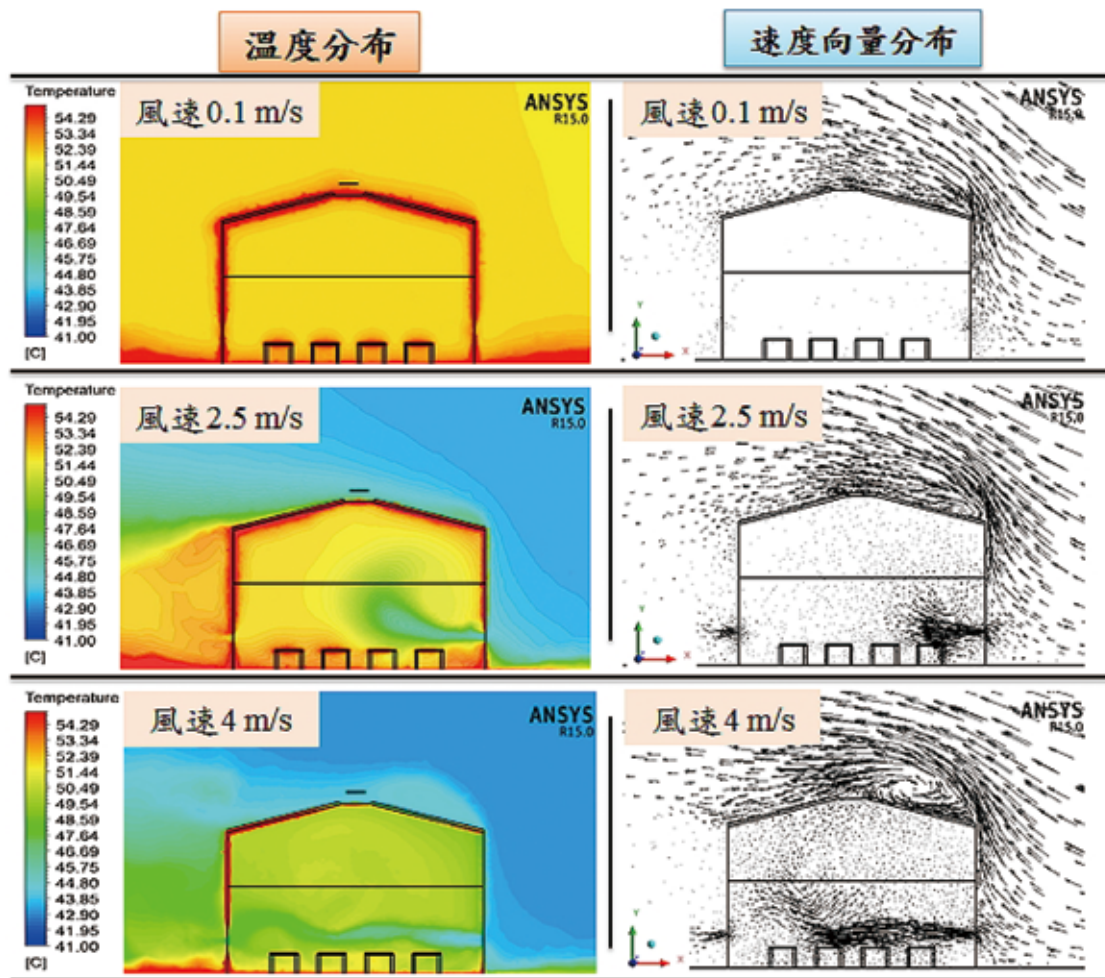
2. 農民常詢問溫室搭建在何種高度最適合？這是一個實務性的問題，本所建立一套模式以描述設施高度對內部溫度的影響，並且實際搭建高度分別為2.5m、3.5m及4.5m之三間溫室，溫室高度每隔1m架設一支E-type熱電偶溫度計，由實測值與CFD模擬之結果進行比較與分析。(圖二)上圖溫室高度3.5m時，利用CFD模擬外氣不同溫度時，實測值與CFD模擬值之相關性。下圖為利用CFD模擬不同溫室高度之溫度數值。基本上，模擬值與實際量測結果是相當一致，說明CFD的分析及解析能力是可用於溫室設計及環境監控。
3. 當設施業者受農民委託進行溫室設計及搭建時，利用CFD去評估溫室內部氣流場與輻射熱傳效應，藉此作為溫室的通風設計與栽培模式提供精確參考依據。如(圖三)所示為利用CFD分析溫室單棟與多連棟時溫室之熱流場案例。(圖四)則為研究中東地區氣候下溫室設計之案例，由建立溫室設施CFD分析模型資料庫，幾何尺寸繪圖、溫室內外部邊界條件設定、參數條件敏感度、及模擬結果後處理等流程，建模分析外銷溫室設計的案例，並以此建議原規劃之溫室設計需注意幾個要點：(1)溫室建造方位，使通風口盡可能面向迎風面。(2)溫室通風口面積需增加，以獲取更多通風量來降

溫。(3)溫室開頂與側邊捲揚的環控策略，來達到最佳的氣流交換率，當溫室內部溫度逐漸升高時，第一優先為開啟側邊捲揚，若仍無法降溫時再開啟頂部。預期這些技術成果可減少溫室初期建造成本10%，並縮短溫室在設計開發或改善的時程50%。

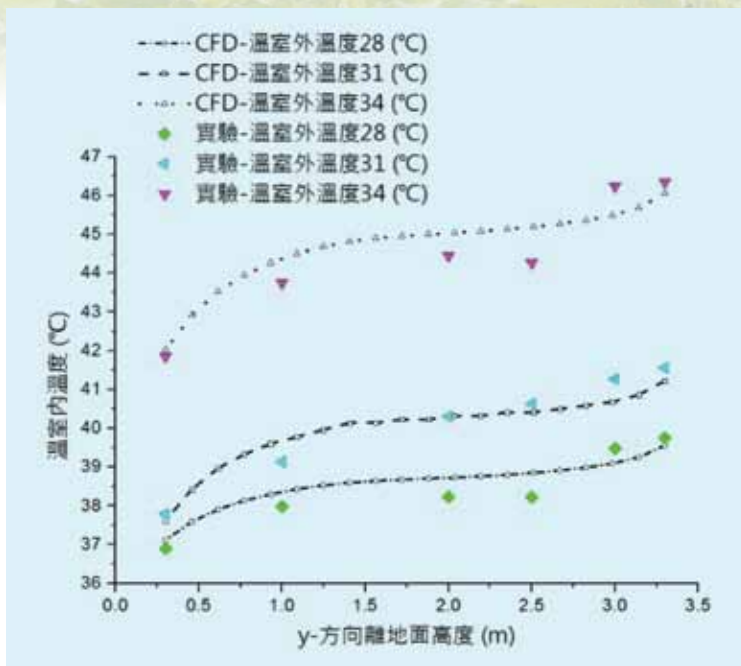
五、結語

在期待台灣發展為熱帶/亞熱帶國家溫室產業領先者的目標下，應加快溫

室設計及評估之能力建構，運用CFD技術對溫室設施做分析具有快速簡便、低成本等優點，不需要耗費大量資源建造實體設施即可達到一定效果。因此，本文介紹了CFD在溫室設計上的應用觀點與未來展望，並簡要說明幾項研究案例的成果，闡述國內外相關研究論文的发展趨勢，期望未來持續建構各種溫室案例的CFD分析資料庫與溫室設計評估手冊，及組成一個環境監控與溫室設計分析團隊，以現場分析並提出即時的改善



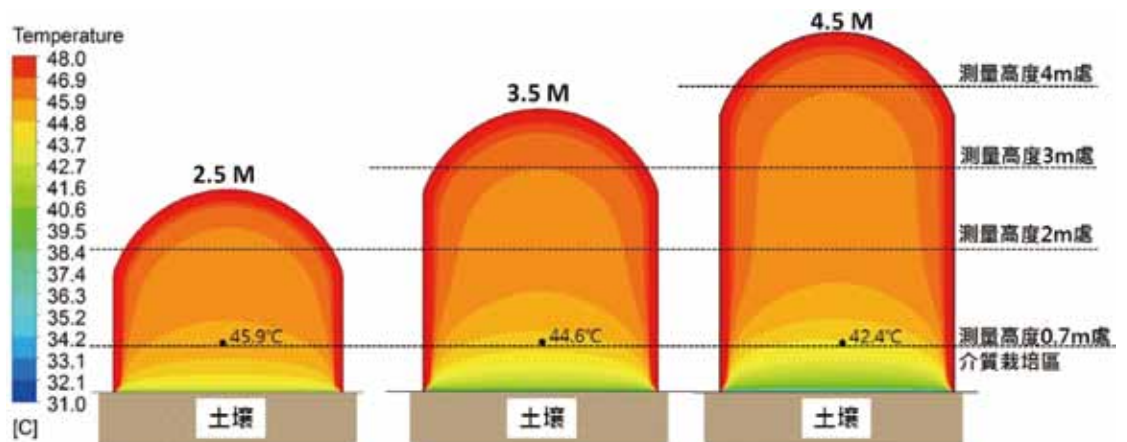
圖一、模擬環境為大氣溫度是43°C時，不同風速0.1、2.5、4 ms^{-1} 下，利用CFD分析溫室內之溫度與風速向量分布剖面圖。



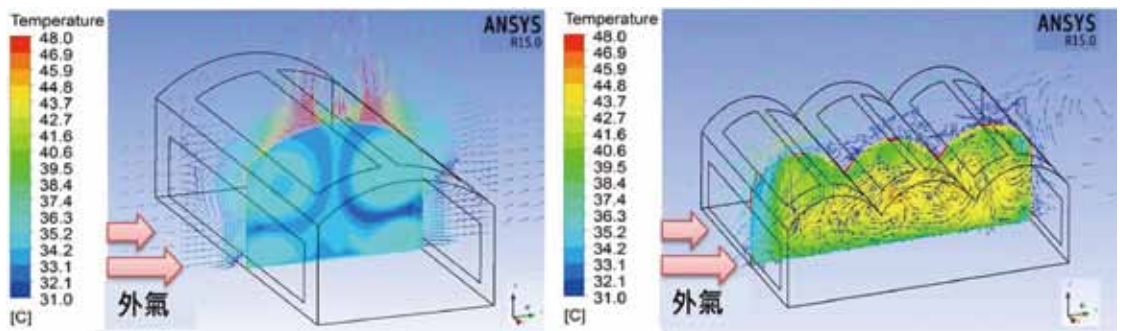
方案來輔導農業生產者，以期使設施農業升級與產業加值，提升國際競爭力。

六、參考文獻

Fatnassi H., Boulard T. and Bouirden L. 2013. Development, validation and use of a dynamic model for simulate the climate conditions in a large scale greenhouse



圖二、上圖為溫室高度3.5m時，CFD模擬外氣不同溫度(28、31、43°C)時，實測值與CFD模擬值之相關性。下圖為利用CFD模擬不同溫室高度(2.5、3.5、4.5公尺)之溫度垂直剖面數值。



圖三、利用CFD分析單棟及多連棟溫室之熱流場剖面。

equipped with insect-proof nets. Computers and Electronics in Agriculture 98:54–61.

Kurowski, K., Kulczewski M. and Dobski M., 2011. Parallel and GPU based strategies for selected CFD and climate modelling models. Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE) 2011: 735-747

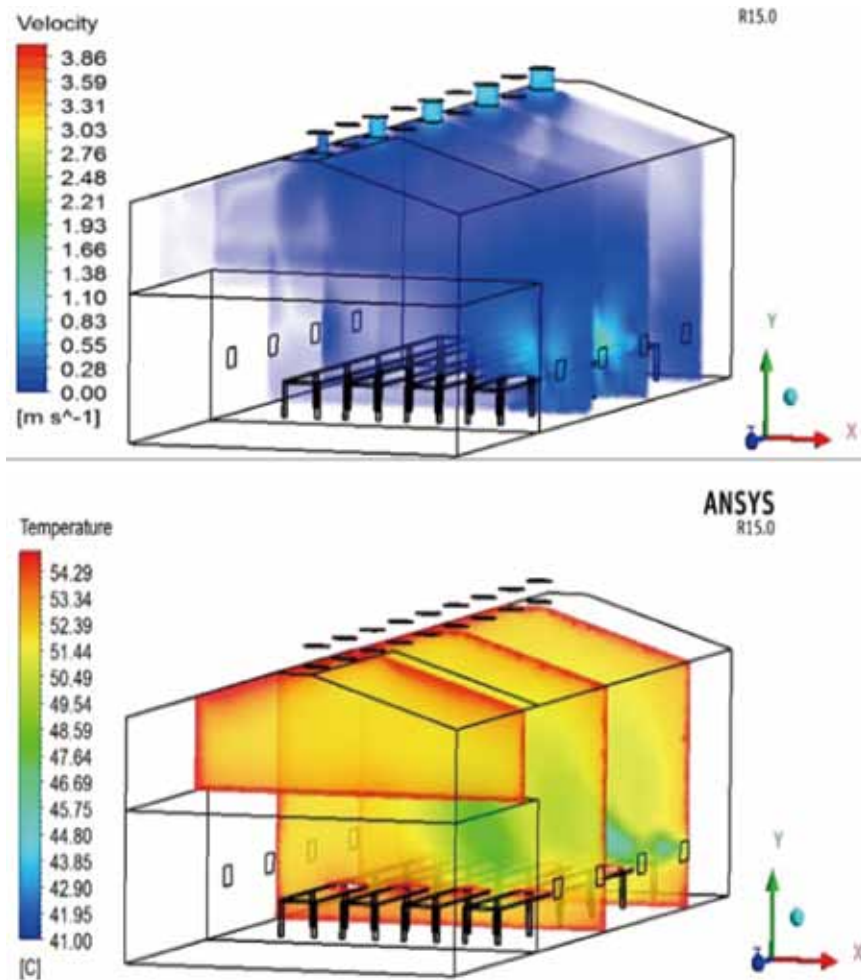
Okushima L., Sase S. and Nara M. 1989.

A support system for natural ventilation design of greenhouse : Based on computational aerodynamics. Acta Horticulturae, 284, pp. 129-136.

Pontikakos C., Ferentinis K.P. and Tsiligridis T.A. 2005. Web-based estimation model of natural ventilation efficiency in greenhouses using 3D Computational Fluid Dynamics. In Proc. of the International Congress on Information

Technologies in Agriculture, Food and Environment. pp. 12-14.

Stavrakakis G.M., Koukou M. K. , Vrachopoulos M. and Markatos N.C. 2008. Natural cross ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. Energy and Buildings. 40:1666-1681.



圖四、中東地區氣候下溫室設計之研究案例，三維CFD分析溫室內之風速場與溫度場分布圖。