

## 單平板集熱器氣動力行為基準驗證

徐子圭<sup>1</sup> 張克勤<sup>2</sup> 劉育政<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 空軍航空技術學院飛機工程學系

<sup>2</sup> 成功大學航空太空工程學系

### 摘要

由於太陽能熱水器安裝量在台灣大幅度的成長，而系統為求熱效率最佳化必須安置在無遮蔽處(如頂樓天台、屋頂)；此一限制導致太陽能集熱板必須承受環境風力；然而每年夏秋之際，台灣常有颱風過境，造成太陽能板許多因颱風而受損案件。

因此本研究以計算流體力學套裝軟體 FLUENT 探討平板於受風時板面壓力分佈狀況，並將模擬結果與風洞測試所得之數據做基準比對。透過數值流線圖可觀察到上板面產生兩個主要的渦流區，分別為從上游分離之渦流產生的尾流撞擊板面約 2/3 處後往上游回補而成的馬蹄形回流區以及下板面竄出之邊角渦流(Corner Vortex)區。板面壓力分佈圖部分，由於下板面正對風向使下板面形成正壓區。至於上板面可以發現上游之尾流區與再層流化區域皆較實驗值低；壓力差部分在  $Z/W=0.5$ 、 $0.6$  處比對可發現壓力差係數在量值方面最上游處有比實驗值低估的現象，下游再層流化區域也有此狀況，CFD 計算無法捕捉實驗數據之變化程度；唯在分離點之前量值符合程度較高， $Z/W=0.9$  處則發現趨勢雖然相同，但量值上卻有明顯差異；此一比對結果顯示 Realizable  $k-\varepsilon$  Model 較無法在複雜流場預測渦流行為。總體升阻力係數與實驗比對，誤差範圍在可接受之工程設計範圍內；以本研究探討的案例中發現 Realizable  $k-\varepsilon$  Model 搭配 Enhance Wall Function 在升阻力方面有較佳的預測結果。

**關鍵詞：**平板集熱器、紊流、RANS、壁面函數。

### 1. 前言

太陽熱能應用被成功應用在熱水器系統，熱水系統之集熱器可分為真空管與平板式，台灣以平板式集熱器較為常見。

然而台灣位於環太平洋亞熱帶，每年夏、秋季由赤道附近太平洋區域形成之颱風成了主要的天然災害，而太陽能熱水系統之安裝傾角必須與當地緯度相當，傾斜角度建議在  $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$  之間，此條件使系統必須承受環境風力，隨著太陽能熱水系統普及化，因颱風造成損壞案例也因而增加，輕者造成安裝戶金錢耗費，重者可能造成人員傷亡，因此不得不重視[1]。

因此本研究以 FLUENT[2]模擬單片平板，並搭配風洞所量測之數據[3]、[4]、[5]做比對與系統特性之探討，希望能提供系統設計

### 參考

### 2. 研究方法與步驟

#### 2.1 研究方法

本研究以 FLUENT 作為求解工具，流場基本假設(1)不可壓縮流(2)忽略熱傳，壁面為無滑移邊界(3)穩態流場，因此算則選用壓力基(pressure based)解算器，離散格式為二階上風法，並使用 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 演算法。

數學模式使用雷諾均值方程式(Reynolds- Averaged Navier-Stokes(RANS))方程式[6]，因不將熱傳導問題納入考量，所以統御方程式包含質量守恆方程式(Mass Conservation Equation)及動量守恆方程式(Momentum Conservation Equation)。

本研究之流場屬於紊流場，紊流模式方面選用 Realizable  $k-\varepsilon$  Model[7]，而壁面上流體必須符合無滑移邊界條件，因此在近壁面處黏性效應比慣性力大，因此必須採用近壁面處理，本研究之近壁處理採用兩種計算方法做比較分別是(1)標準壁面函數(Standard Wall Function)，(2)加強型壁面函數(Enhanced Wall Function)；其中，標準壁面函數之數值方法是直接使用邊界層對數法則(Log-Law)之速度分布，計算出近壁面點之速度，FLUENT 對格點要求為近壁面第一點必須落在緩衝層(Buffer Layer)附近( $y^+ \sim 30$ )[2]即可有較準確之結果；然而加強型壁面函數則須使  $y^+$  落在  $1 < y^+ < 5$  的範圍內，才能有較準確之結果，因此加強型壁面函數之計算需求將比標準型壁面函數來得大。

## 2.2 計算域與邊界條件設定

模型以尺寸為  $1.2(L) * 0.6(W) * 0.055(H)$  (m)之平板為探討對象(如圖 4. 1)，初步先探討台灣較常見之安裝角度  $30^\circ$  受力之影響，搭配 Chou 等人之實驗條件做模擬[8]、[9]，入口條件則選用紊流強度 11.7%，入口條件設定壓力入口(Pressure-inlet)，全壓給定 100000pa，靜壓 99925pa，出口條件則為壓力出口(Pressure-outlet)；靜壓給定 99925pa；入口速度約為 11m/s[10]，假設條件與風洞實驗一致；中間設定為對稱(Symmetry)邊界，以減少網格佈置，加快計算速度(如圖 4. 2)。

計算域則參考風洞尺寸，入口截面積為  $2.6(H)*4(W)$ (m)，但由於模擬採對稱邊界因此模擬之入口截面積設為  $2.6(H)*2(L)$ (m)；入口面至平板尾端 3L，板後端至出口距離經過數值驗證後設定為 8L(如圖 4. 3)。

## 3. 結果與討論

### 3.1 數值驗證

#### 3.1.1 計算域驗證

本研究中由於氣流經過板體後在後方形成尾流區，因此必須合理地將出口截面遠離模型後方以降低計算誤差；以下用標準型壁面函數做測試，計算域長度分別為板後 5L、8L、10L。可由圖 4. 4 發現當計算域長度距離板後 5L 時與 8L、10L 有差距，而 8L 與 10L

所求得壓力分佈重和，因此後續模擬將以 8L 作為計算域長度。

#### 3.1.2 格點驗證

數值解之精準度會與網格解析度有很大關係，若網格布置過度稀疏則可能物理參數的變化量無法精準求得，但太過密集則會使得計算量龐大，耗費計算資源，因此必須在計算精確度與計算時間之間求得平衡，分別針對兩種壁面函數作個別之格點驗證。初始之總網格(Ad0)量為 8860522，由於本研究所關注的地方是版面上之壓力分佈，網格針對壁面作加密，因此網格增加率以壁面網格量為基數做比較；首先以加強型壁面函數經過加密三次(Ad3)後，其解與 Ad2 所求得之解重和(網格增加率分別為 64%、700%(因第三次加密為全板面加密)(表 4. 1))，達到格點獨立之要求(圖 4. 6、圖 4. 7)；標準壁面函數而言經過二次的加密後發現第二次加密與第一次加密解重和(網格增加量皆為 700%(全板面加密)(表 4. 2))，判定加密一次即可達到格點獨立(圖 4. 8、圖 4. 9)，因此求解時使用上述網格配置做為本研究之數值解。

### 3.2 參數分析

#### 3.2.1 可視化分析

由數值油流結果可發現上板面在板面 2/3 處(約往下游 48cm 處)有明顯之衝擊區，在此處渦流與板面撞擊後分成兩條路線，往上游回流形成渦流，打轉後往側邊流出(如圖 4. 24)；另一路則往板末端流出；而下板面之氣流則單純地衝擊板面後往兩側逸散(如圖 4. 25)。

觀察數值流線圖可知下板面受風直接衝擊，而靠兩側流線則因為側邊為開放空間，而促使流線往側邊流動(如圖 4. 19)。上板面在前端與側邊產生二個主要尾流區，首先，由平板上游分離而形成之渦流撞擊板面約 2/3 處後分兩部分流動，一是往上游回補並打轉產生回流區，另一部分則往下游移動形成再層流化區(如圖 4. 20、圖 4. 21)，第三個是由下板面流往上板面而形成之邊角渦流

(圖 4.22、圖 4.23)。

### 3.2.2 壓力分佈

就壓力分佈圖上來看，上板面壓力分佈趨勢與實驗量測相似(如圖 4.10~圖 4.12)，在量值方面最上游端有低估實驗值之狀況，但往下游走到分離點(渦流撞擊板面處)前，其分部量值則符合程度高，再往下游在層流化區後觀察，發現其壓力量值比實驗量測值低估許多，顯示 Realizable  $k-\epsilon$  Model 在複雜渦流場之預測效果較不足；下板面的壓力分佈計算值與實驗值大致相似(如圖 4.13~圖 4.15)壓力差係數比對方面， $Z/W=0.5$ 、 $0.6$ (無因次化位置如圖 4.5)的量值在上游處基本上一致，誤差不大，往下游再層流區計算數值的變化程度則較無法趕上實驗量測值， $Z/W=0.9$  處則誤差程度越大，推測可能是越靠平板側端會有邊角渦流產生，而 Realizable  $k-\epsilon$  Model 對複雜渦流處預測之結果較易失真，但總體趨勢上皆有合理預測壓力之變化。

### 3.2.3 受力分析

總體升阻力方面，升力的誤差(最大 8.8%)，阻力的誤差(最大 0.12%)，整體而言可在工程設計接受範圍內。

### 3.3 結論與未來工作

在本研究中使用的兩種壁面函數(1)函數標準型壁面函數(Standard Wall Function)和(2)加強型壁面函數(Enhance Wall Function)壓力差係數計算結果並無明顯差異，但壓力分佈上由於使用 Realizable  $k-\epsilon$  Model，其預測渦流行為較為不足，使得壓力分佈在上游尾流區與在層流化區後與實驗值有明顯落差，因此可嘗試使用其他數學模式計算此問題，以提升計算精準度；而升阻力之預測則以 Enhance Wall Function 預測結果較佳。

此驗證結果提升了數值計算之信心度，未來將持續驗證不同模型，若數值計算與風洞測試數據可在合理之誤差範圍內，將可節

省進行風洞試驗所投入之研發成本，並進一步模擬受限於風洞設備之狀況。

## 4.圖表

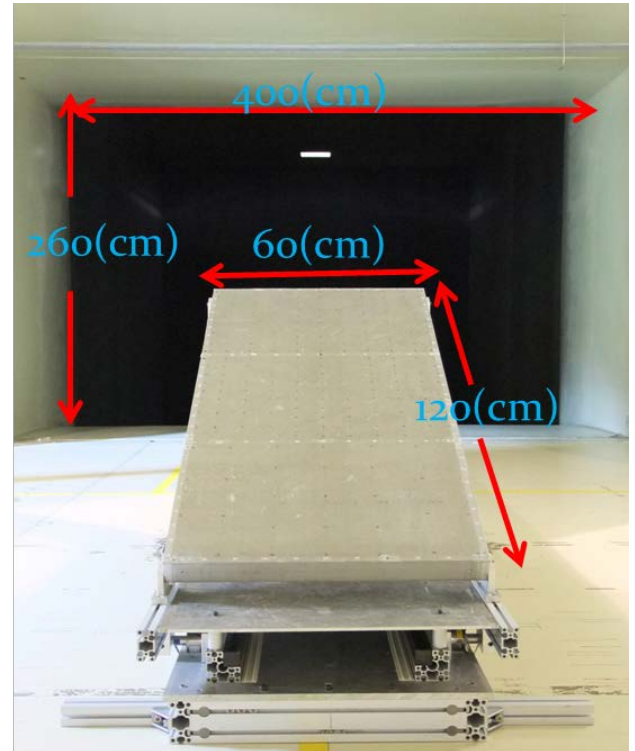


圖 4.1 風洞測試之實際模型

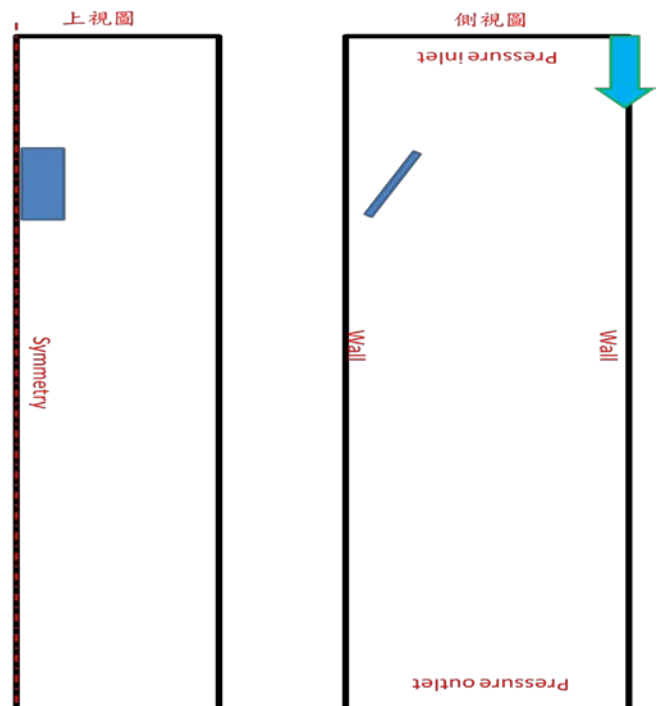


圖 4.2 邊界條件示意圖

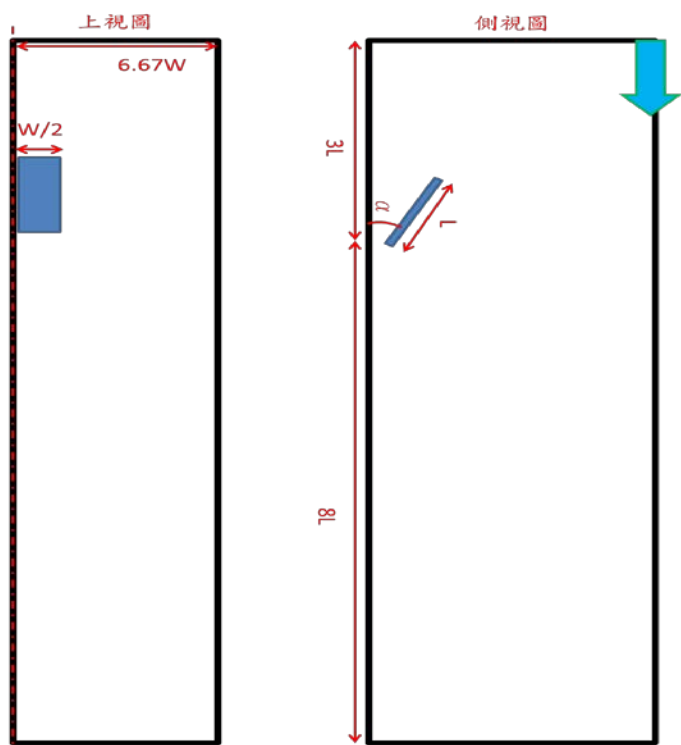


圖 4.3 計算域示意圖

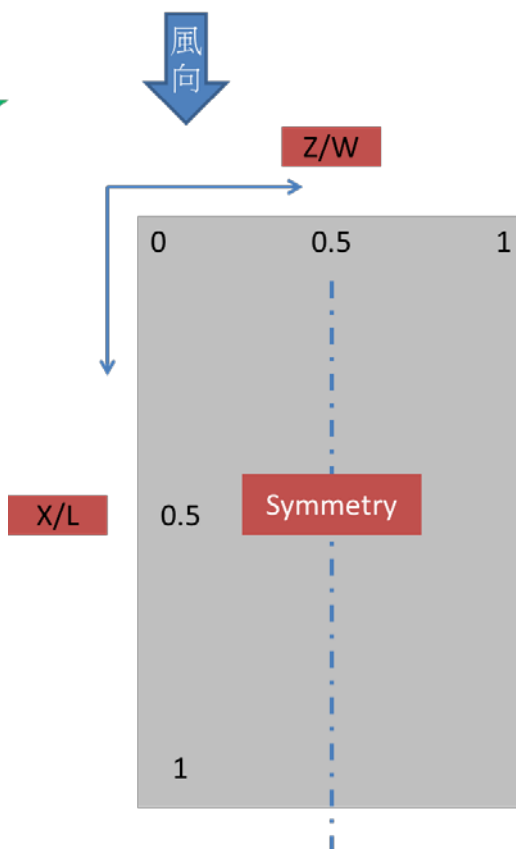


圖 4.5 無因次示意圖

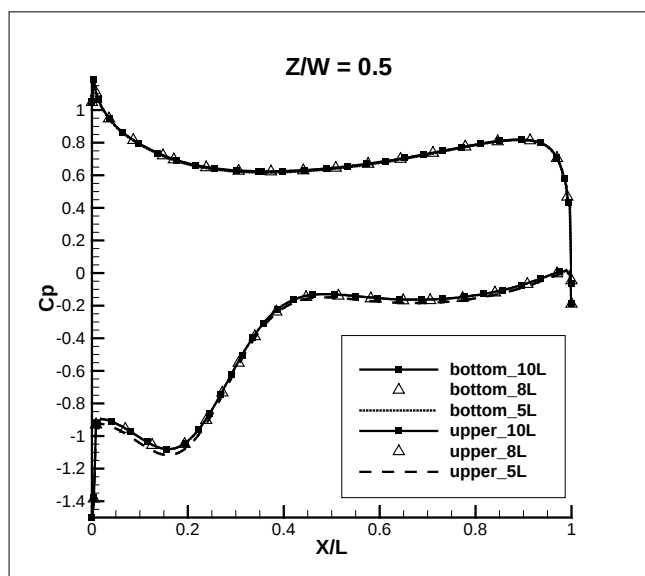


圖 4.4 計算域壓力分佈驗證(Standard wall function)

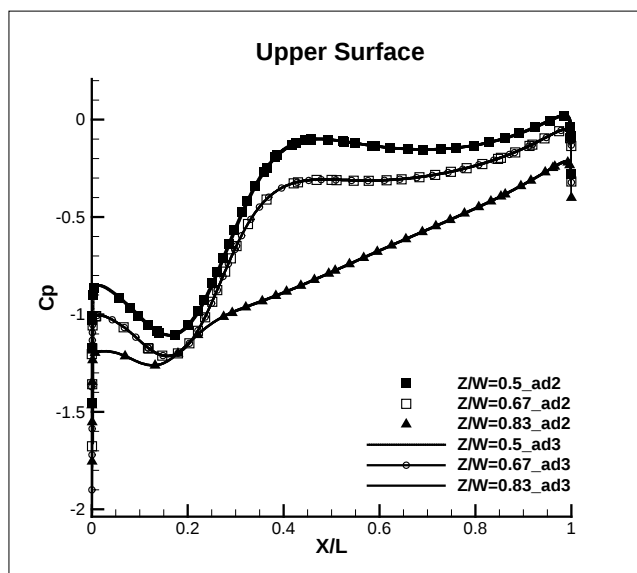


圖 4.6 Enhance wall function 格點獨立驗證 (上板主流向壓力)

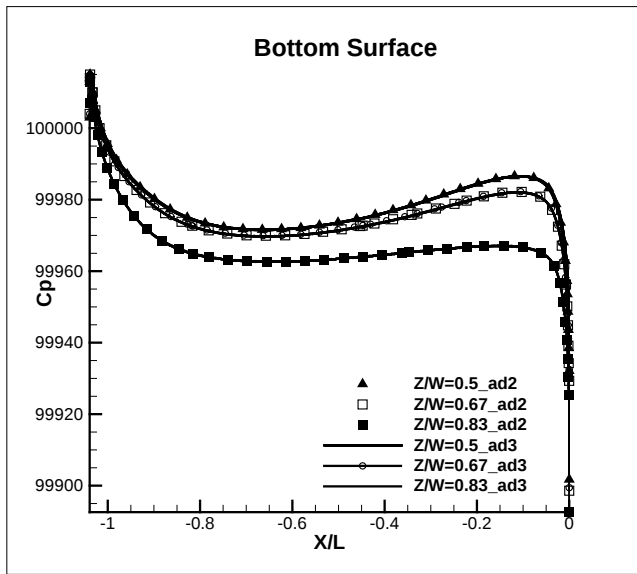


圖 4.7 Enhance wall function 格點獨立驗證  
(下板主流向壓力)

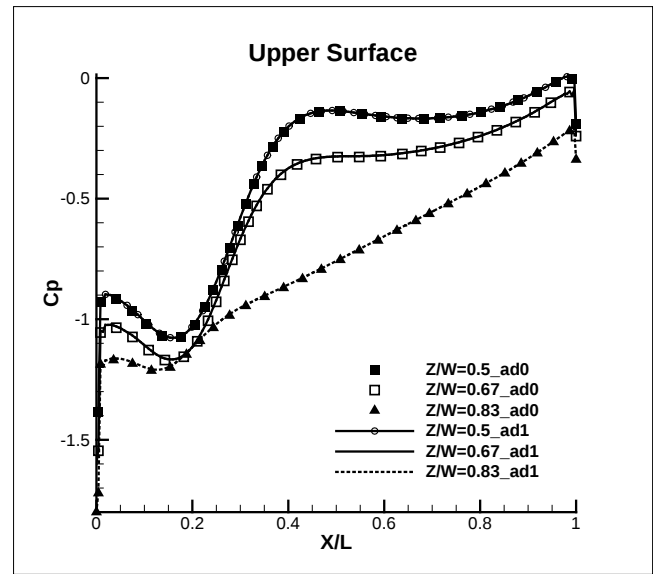


圖 4.9 Standard wall function 格點獨立驗證  
(下板面壓力分佈)

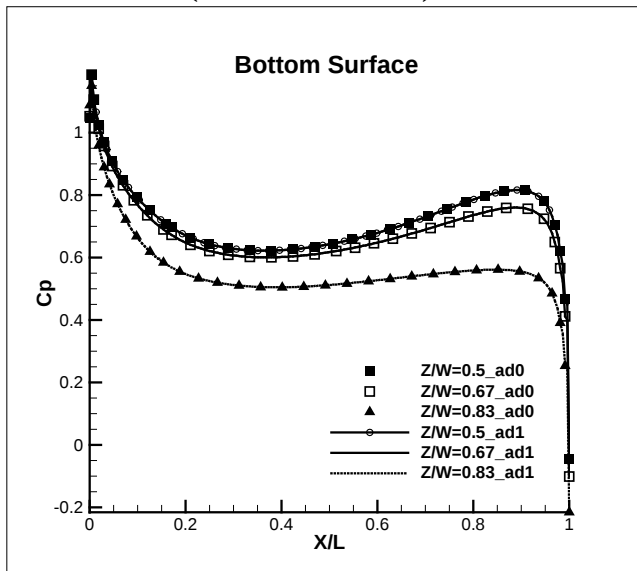


圖 4.8 Standard wall function 格點獨立驗證  
(上板面壓力分佈)

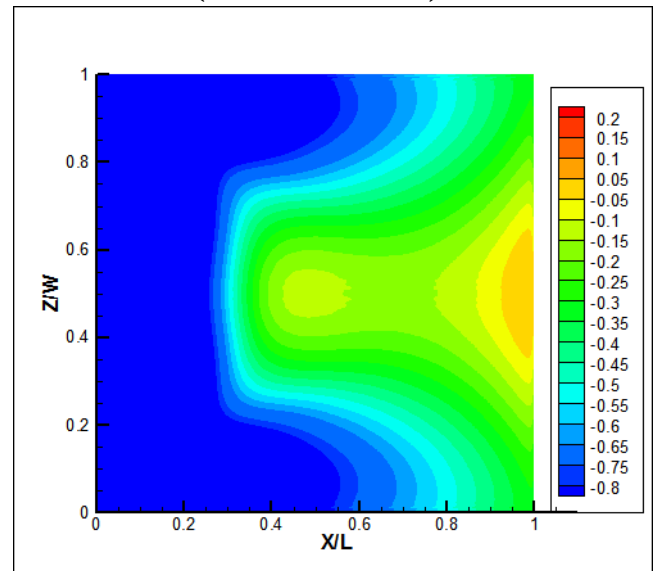


圖 4.10 上板面壓力分佈圖(Enhance Wall)

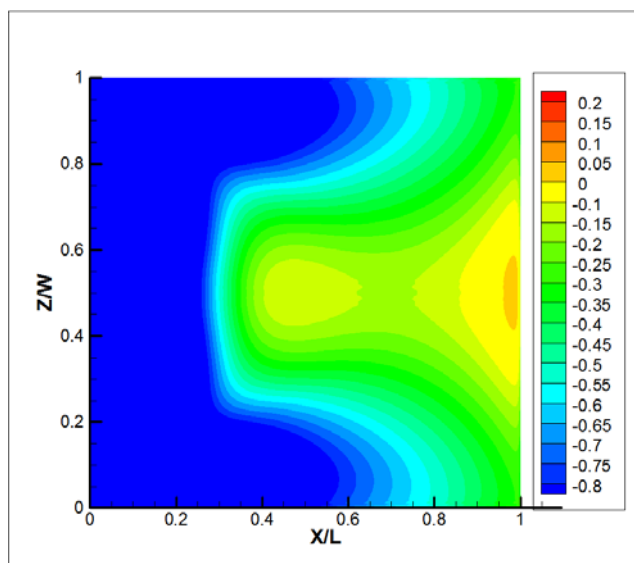


圖 4.11 上板面壓力分佈圖(Enhance Wall)

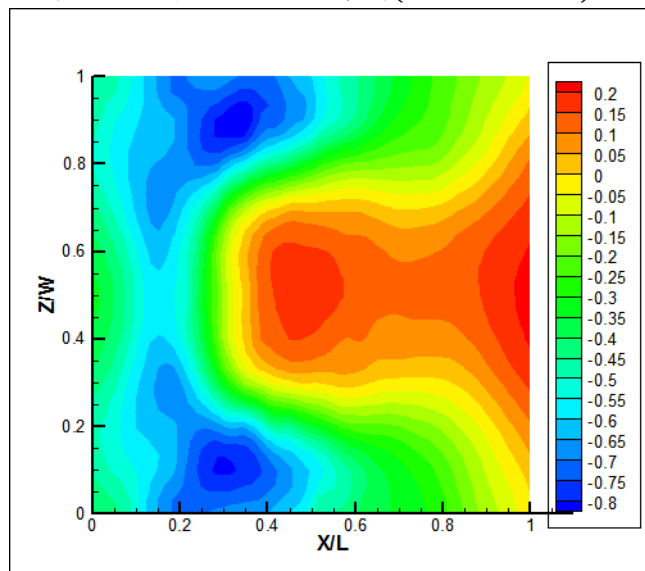


圖 4.12 上板面壓力分佈圖(EXP.)

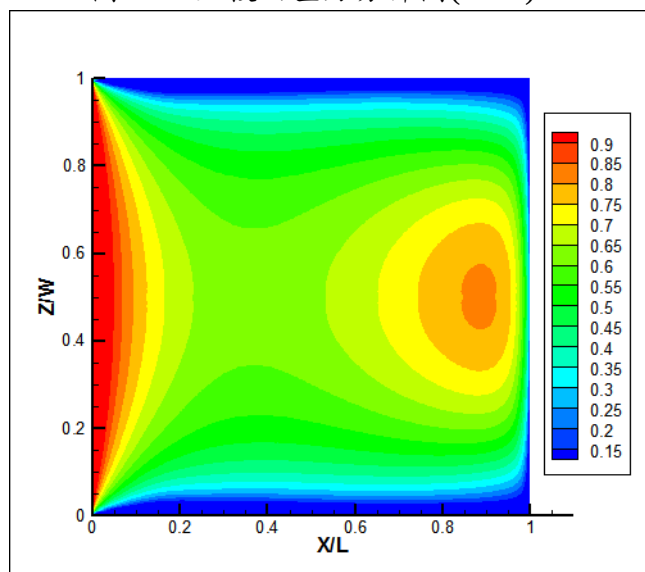


圖 4.13 下板面壓力分佈圖(Standard Wall)

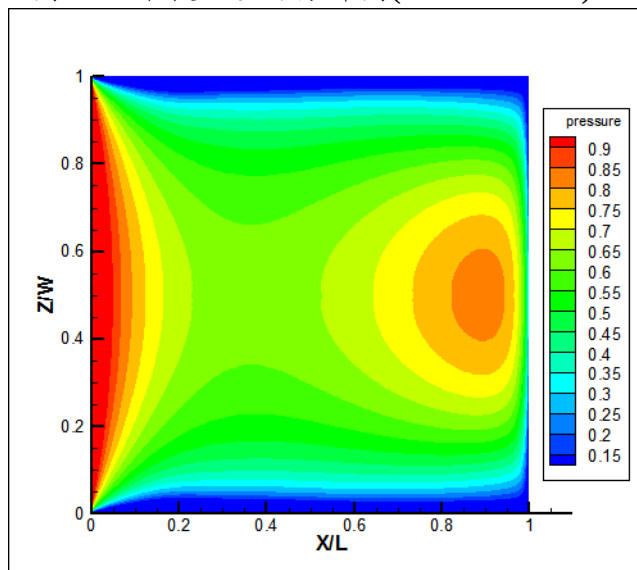


圖 4.14 下板面壓力分佈圖(Enhance Wall)

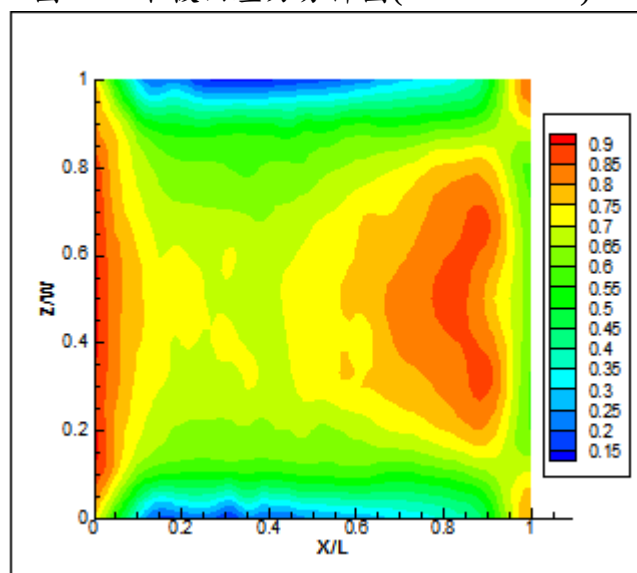


圖 4.15 下板面壓力分佈圖(EXP.)

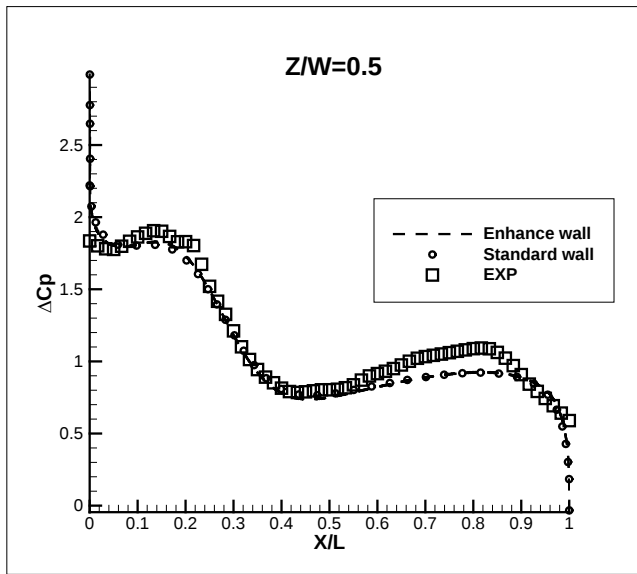


圖 4.16  $Z/W=0.5$   $\Delta C_p$  模擬與實驗比對

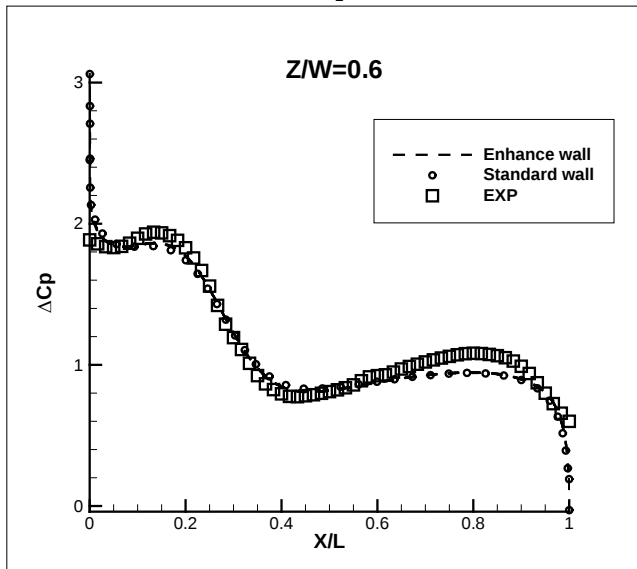


圖 4.17  $Z/W=0.6$   $\Delta C_p$  模擬與實驗比對

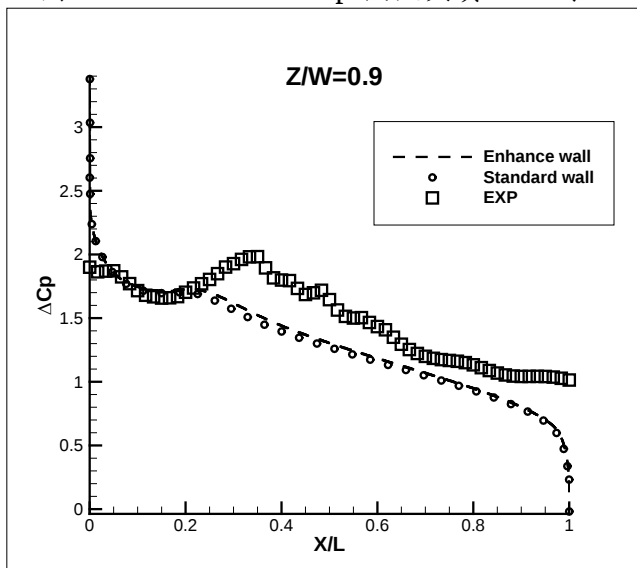


圖 4.18  $Z/W=0.9$   $\Delta C_p$  模擬與實驗比對

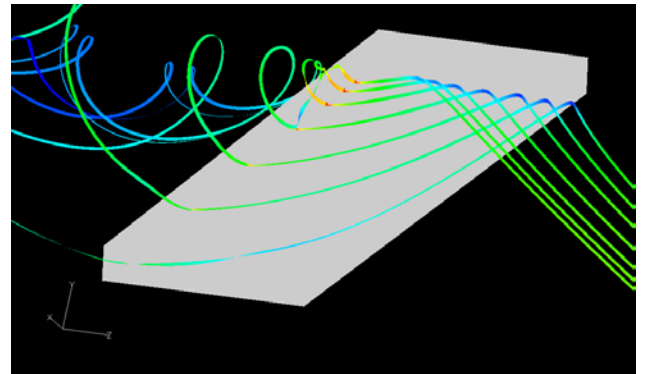


圖 4.19 氣流流經下板面(後視圖)

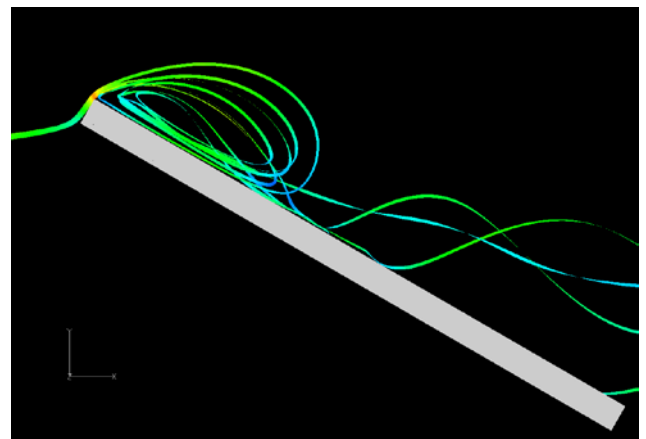


圖 4.20 上游分離之尾流(側視圖)

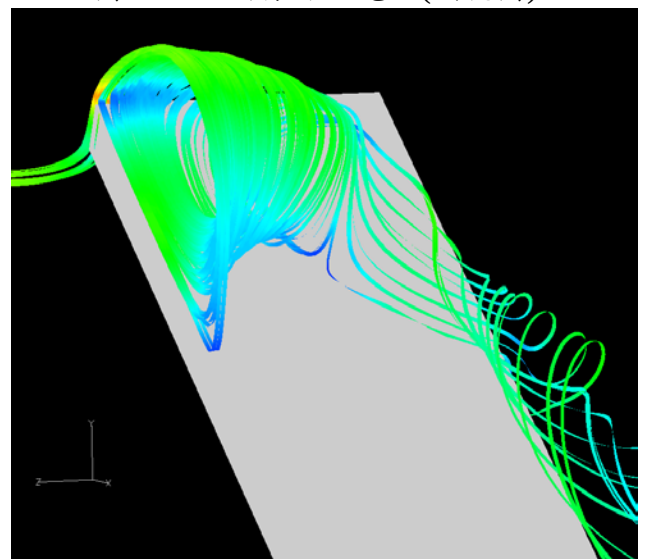


圖 4.21 尾流衝擊板面情況(前視圖)

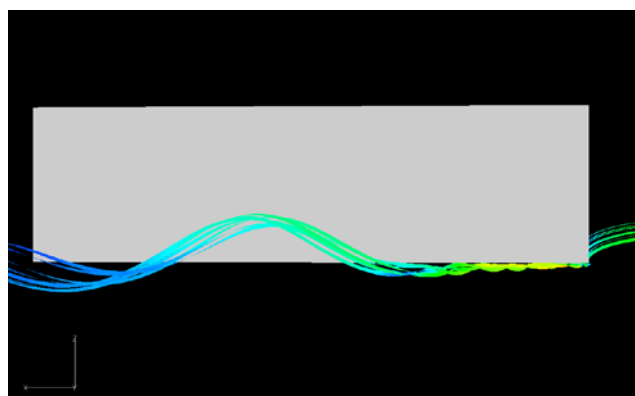


圖 4.22 邊角渦流流線圖(上視圖)

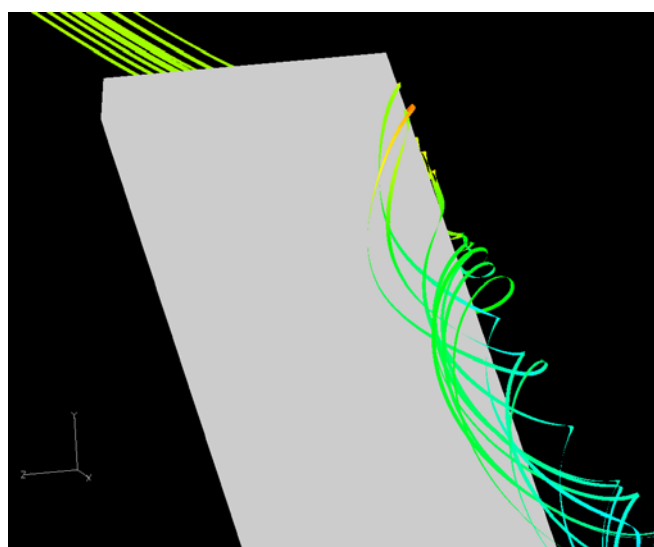


圖 4.23 邊角渦流流線圖(前視圖)

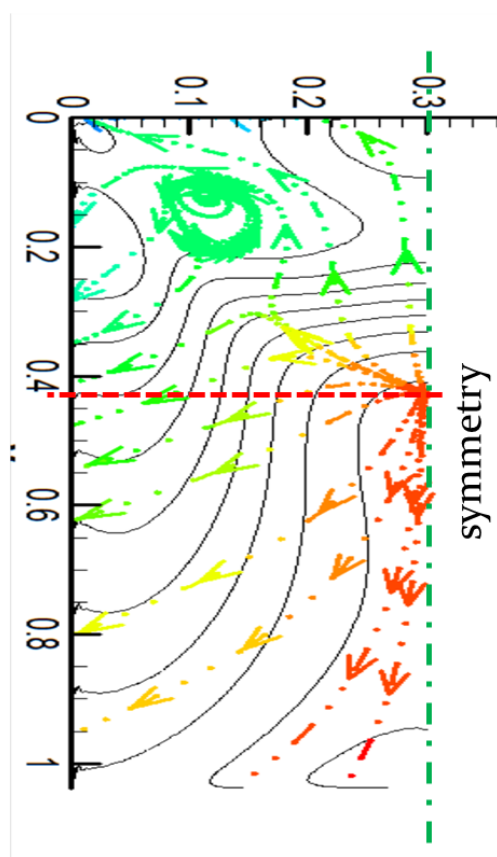


圖 4.24 上板面數值油流圖

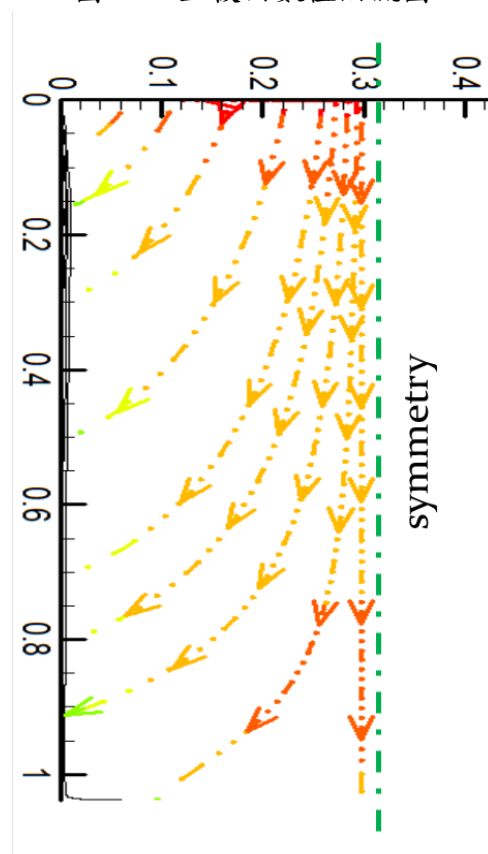


圖 4.25 下板面數值油流圖

| 加密次數 | 網格數      | 增加量(%)       |
|------|----------|--------------|
| Ad0  | 8860522  | --           |
| Ad1  | 8939749  | Y+未達標準       |
| Ad2  | 9046905  | 107156(64)   |
| Ad3  | 10541510 | 1494605(700) |

表 4.1 Enhance Wall Function 加密格點增加量

| 加密次數 | 網格數      | 增加量(%)       |
|------|----------|--------------|
| Ad0  | 8668352  | --           |
| Ad1  | 9027298  | 358946(700)  |
| Ad2  | 10463082 | 1435784(700) |

表 4.2 Standard Wall Function 加密格點增加量

|                  | Lift<br>coef. | Err.(%) | Drag<br>Coef. | Err.(%) |
|------------------|---------------|---------|---------------|---------|
| Enhance<br>wall  | 1.026         | -0.075  | 0.6414        | 0.0012  |
| Standard<br>wall | 1.013         | -0.088  | 0.6414        | 0.0012  |
| EXP              | 1.1097        | --      | 0.6406        | --      |

表 4.3 總體升阻力與實驗值比對

#### 誌謝

本研究承經濟部能源局對 101-D0101 計畫經費補助，使本研究得以順利進行，僅此誌謝。

#### 參考文獻

- [1] 李清安、張克勤、李聰盛、鐘光民，“颱風對國內太陽能熱水系統之損壞探討”，*工程*，卷 80,第 4 期,8 月 2007,pp.134-142.
- [2] FLUENT Inc., “FLUENT User’s guide”, *FLUENT Inc.*, 2006.
- [3] 陳俊谷，“降低太陽能熱水風損之實驗研究”，*國立成功大學 航空太空研究所碩士論文*，2006.
- [4] 修治平，“導流板對不同角度集熱板之空氣動力特性研究”，*國立成功大學航空太空研究所碩士論文*，2007.
- [5] 周晉成，“儲水桶對太陽能板空氣動力效應分析”，*國立成功大學航空太空研究所碩士論文*，2009
- [6] P. Spalart and S. Allmaras. “A one-equation turbulence model for aerodynamic flows.”, 1992,*Technical Report AIAA-92-0439*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [7] T.H. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir, Z. G. Yang, J. Zhu, “A new k- $\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulence flows.”, *Computers & Fluids*, Vol.24, Issue 3, March 1995, pp.227-238
- [8] C.C. Chou, K.C. Chang, K.M., “Wind loading on Solar collector Models: Turbulent Intensity Effect”, *The 21st International Symposium on Transport Phenomena*, 2-5 November, 2010.
- [9] C.C. Chou, K.C. Chang, K.M. Chung, “Wind loads on residential and large-scale solar collector models”, *Journal of Wind Engineering Industry Aerodynamics*, January 2011, Vol 99, Issue 1, pp.59 – 64.
- [10] 王偉政，“太陽能熱水器之升力與阻力數值模擬分析研究”，*國立成功大學航空太空工程研究所碩士論文*，2010.

Benchmark Work:  
Aerodynamic Behavior of Single Flat Plate Heat Collector

Uzu-Kuei Hsu<sup>1</sup>, Keh-Chin Chang<sup>2</sup>, Yu-Zheng Liu<sup>2</sup>

Department of Aircraft Engineering, Air Force Institute of Technology<sup>1</sup>  
Department of Aeronautics and Astronautics, NCKU<sup>2</sup>

ABSTRACT

The count of solar water heater(SWH)-Installation is growing up in Taiwan, in order to optimize the system Thermal efficiency, SWH must be installed at the place without shielding(ex: top-floor ,roof), the limitation lead to an result— Solar Collector(SC) is under environmental wind force; however, typhoon come through Taiwan between summer and autumn, it causes many cases of SWH breakage. Therefore, this study investigate the force on the flat plate SC result from wind flow by using computational fluid dynamic commercial (CFD) software – FLUENT, comparison is done by CFD result and wind-tunnel measurement data. It can observe two main vortex regions on the upper surface from numerical stream-line diagrams, one is the wake region separated from upstream, the wake cover back upstream to generate a horseshoe type vortex region after hitting the surface about 2<sup>nd</sup>-three from upstream ,another is the corner vortex at side generated from bottom surface. To observe the pressure distribution diagrams , we can know that bottom surface is positive pressure since normal to stream-wise direction, As for upper surface, we can know that pressure values of upstream wake region and re-laminar region are lower than experimental data; from pressure difference diagram we can find out that  $Z/W=0.5, 0.6$  are lower estimate at upstream wake region, the re-laminar region is similar, CFD result can't catch the change of experimental measurement, only high Conformity before separation point. Although the trend is similar at  $Z/W=0.9$ , there is obviously different value; for the comparison conclude that Realizable  $k-\epsilon$  Model is not good at predict complex vortex behavior. The error of total lift and drag force is acceptable for engineering design; for this case we find out that good prediction for lift and drag force is done by Realizable  $k-\epsilon$  Model collocate with Enhance Wall Function.

*Keywords: Flat Plate Heat Collector · Turbulence · RANS · Near-Wall Function*