

太陽能熱水器架設於強風定常流升力影響之數值研究

Numerical Studies of the Uplift Effect over a Solar Water Heater in Strong Wind

徐子圭¹、張克勤^{2*}、田榮華²、王偉政²、劉育政³

¹ 空軍航空技術學院飛機工程系

² 國立成功大學航太工程學系

³ 成功大學南區太陽熱能檢測中心

*聯絡者, E-mail: kcchang@mail.ncku.edu.tw

Uzu-Kuei Hsu¹, Keh-Chin Chang^{2*}, Ron-Hwa Tyan², Wei-Cheng Wang², Yu-Cheng Liu³

¹ Department of Aircraft Engineering, Air Force Institute of Technology

² Institute of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University

³ Solar Thermal Inspect South Center, National Cheng Kung University

*corresponding author, E-mail: kcchang@mail.ncku.edu.tw

摘要

颱風侵襲為台灣主要的天然災害之一，太陽能熱水器系統安裝在住家頂，颱風入侵時造成的破壞最為嚴重，由於太陽能熱水器系統背面吹入，造成集熱板上、下板面承受強大風壓而使太陽能板受損；本研究以計算流體力學方法，探討貼地型及離地型太陽能熱水器系統於輕颱風速(30 m/s)之流場特性，同時比對風洞實驗量測結果為驗證；研究發現，本研究標的之三維效應影響顯著，無法以二維模擬方式探討，集熱板離地架設 10cm 可降低升力約 16.5%，水桶後方集熱板上表面有分離泡之形成，同時集熱板兩翼端產生之翼尖渦會與其相互耦合，產生渦流之三維翼展面延伸現象。

關鍵字：太陽能熱水器、集熱板、離地型、渦流、計算流力。

Abstract

Typhoon is one of the major natural disasters in Taiwan. The solar water heater system installed in the house roof has the most serious damage caused by typhoon invasion. Because the wind blows into the backward of the solar water heater system, the heat collector is damaged by the stronger wind pressure gradient induced between the upper and lower. This study uses CFD method to investigate the flowfield over a suspended and ground solar water heater during the wind speed about 30m/s, and compares the results with the experimental data for validation. The results show that the 3D flowfield effect is clear, and 2D model can not simulated the flowfield. The collector Erected 10cm away from the ground can be reduced to approximately 16.5% of the lift, and the separation bubbles are induced behind the bucket of the collector surface. The wingtip vortices generated and interacted from the collector-side, and the separation bubbles is extending in spanwise.

Keywords : solar water heater, heat collector, suspend, vortex, CFD

一、前言

綠色能源中，太陽能與風力發電為主，由於台灣屬海島型，架設風力發電機易受地形限制，而太陽能較不受地形限制，且不會耗盡自然資源，太陽能目前使用最為廣泛的為集熱板加熱產生熱水，以及光電板發電兩用途，現今以太陽能熱水系統的使用最為廣泛。

對於太陽能熱水系統往往大家焦點都是集中在熱效率的部份，如 Oliphant [1]及 Kalogirou [2]等人的研究主要致力於探討不同太陽能收集板之熱效率，並沒有探討太陽能收集板之結構分析。除此之外，目前國內對於太陽能熱水系統之推廣獎勵補助作業程序中，對於合格集熱器之規定，僅要求集熱效率，至於固定方式與集熱器本身的結構強度，目前仍無適當的施工規範與產品結構強度要求，致使長時間以來，大多數製造廠商僅將研發資源投入於更高集熱效率之產品開發。

台灣位於環太平洋亞熱帶地區，每年夏季在環太平洋靠近赤道區易生成颱風，颱風侵襲為台灣主要的天然災害之一，每年平均4.4次入侵台灣，多數颱風侵台路徑由台灣東部登入，東部地區首當其衝，所受破壞最為嚴重。太陽能熱水系統安裝在住家頂，颱風入侵時造成的破壞最為嚴重，所影響的原因，以由太陽能熱水系統背面吹入，造成集熱板上、下板面承受強大風壓而使太陽能板受損。李清安等人[3]的研究調查中可知以2005為例，台灣遭受四十年來罕見之連續三個強烈颱風(海棠、泰利、龍王)侵襲(，造成全台超過109件太陽能熱水系統受損，為了避免類似情形再度發生，具低風阻太陽能熱水系統之開發的確有其必要性。

2006年，劉怡眉[4]以水柱壓力計量測集熱板上、下表面壓力分布情況，並以2個荷重元擷取系統結構所受升力分布情況。同年陳俊谷[5]以四個荷重元及水柱式壓力計，配合流場可視式化的方式觀察表面流線

軌跡，研究太陽能熱水器系統的結構承受氣流的空氣動力特性。在集熱板上塗抹二氧化鈦粉末、煤油、油酸混合成流體可視化吹試劑進行吹試，氣流通過模型之集熱板時清楚分辨出流場分離線(separation line)、再接觸區(reattachment region)、回流區(reverse-flow region)等流場特性。另一方面，模型安裝三種導流板，在四種風速下試吹模型。鍾光民等人[6]在加裝不同高度擾流板情況下，使導流板與風的流場之間產生不同攻角情況時，相較與導流板與風向相互垂直所產生之升力係數最大可減少62%。2007年修治平[7]探討集熱板四種角度下安裝三種尺寸導流板所產生的空氣動力效應，實驗結果可知，模型集熱板傾斜角度增加，氣流通過水桶與集熱板的後方尾流流場中產生較強負壓區，集熱板靠近水桶區域壓力差隨之傾斜角度提高而增加，當集熱板傾斜角度增加，對於阻擋氣流之投影面積增大，由荷重元實驗測得升力亦也提高。2008年，周晉成[8]探討集熱板上無安裝水桶所產生不同空氣效應，量測模型所受的升力與阻力，更清楚了解改變集熱板傾斜角度與改變集熱板安裝導流板投影面積大小時模型所受升力與阻力之間關係。整理上述文獻可知太陽能熱水系統空氣動力效應特性如下：

1. 鈍型體空氣動力效應：太陽能集熱板本身是一鈍型體，氣流通過模型會在模型後方產生尾流，形成低壓區。
2. 攻角效應：當集熱板傾斜角越大，遮蔽流場截面積增加，模型上板面產生低壓範圍越大，集熱板上、下板面壓差越大，集熱板安裝角度提升容易造成板面損壞。
3. 地面效應：集熱板抬高距離地面有一高度，氣流從模型板底部通過，有效減低模型板中心至下游風壓。
4. 改變風速雷諾數效應不明顯，往後只針對單一風速下做探討。
5. 導流板投影面積越大，有效降低模型升力。
6. 阻力隨導流板截面積增加而變大。

本研究以文獻5之實驗模型為比對參數(如圖1及表1)，利用計算流體力學之方法，討論典型太陽能熱水器於輕風速下之流場特性及離地架設之優劣評估。

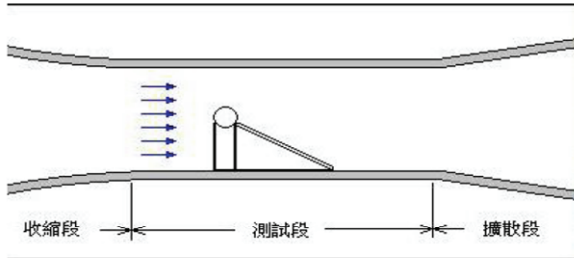


圖1 風洞架設示意圖

表1 太陽能熱水器之原型與縮小 60%之尺寸

項目	原始尺寸 (cm)	縮小 60 %	備註
集熱板 (長×寬×高)	200 × 100 × 6	120 × 60 × 4	裝置角 25°
集水桶 (直徑×長)	53 × 110	27 × 69.5	裝置角 25°

二、格點系統

本研究太陽能熱水器之格點系統均採用多區塊結構性網格建構，其幾何外型尺寸、邊界條件及網格示意圖如圖2至圖4及表1所示。研究的目標著重在太陽能熱水器於輕度颱風風速下所產生的氣動力參數為依據，比對風洞實驗之結果，進而探討其流場特性，並比較分析貼地及離地架設下兩者之差異。

架高模型

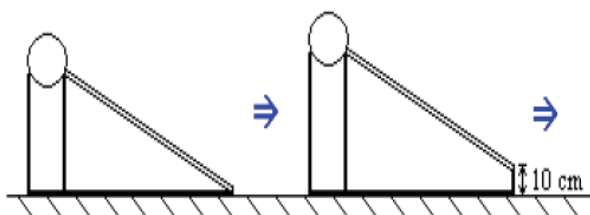


圖2 測試模型

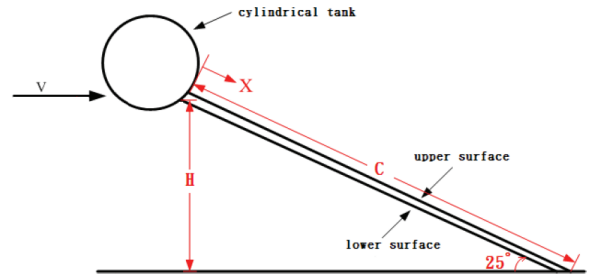


圖3 模型幾何尺寸定義

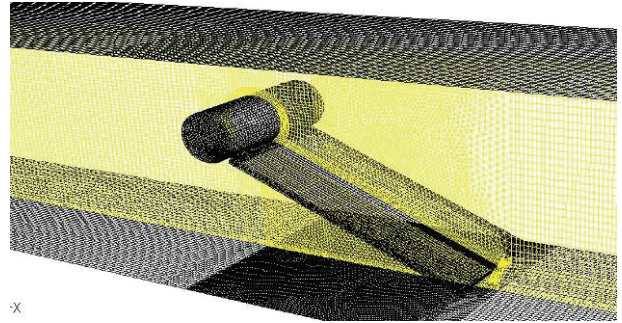


圖4 表面網格系統分佈圖(cells=1,053,357)

三、數學模式

本研究的流場解算器為 CFD 有限體積算則，基本假設為三維黏性不可壓縮流場，不考慮能量方程式，故其統御方程式(Governing Equation)如下：

1. 連續方程式：

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_i} = 0$$

2. 動量方程式： (1)

$$\frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

3. k-ε 紊流模式[7]

紊流動能方程式：

$$\frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \rho P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

紊流動能消散率方程式：

$$\frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \rho P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$$

standard k-ε model 使用 Boussinesq 假說來求解雷諾應力，如下：

$$\overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

四、數值方法

本研究使用有限體積法(Finite Volume Method)離散統御方程式，採用壓力基(Pressure Based Scheme)運算法則處理壓力速度耦合運算問題(Pressure-Velocity Coupling)求解壓力方程式，統御方程式之空間離散在對流項界面(Control Surface)上的物理量採用二階上風法來計算，擴散項皆則採用中央差分法離散，而時間之步階採用隱式法(Implicit Method)計算；同時為避免不正交網格造成數值誤差過大，故採用的是同位網格(collocated grid) [8] 之 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)演算法[9-11]，亦即以動量插值法(Momentum Interpolation Method/ MIM)方式處理[8]。

五、結果與討論

4.1 二維與三維數值分析比較

一般實際物理問題均為三維問題，但為求快速獲得初步結果或三維效應不明顯之問題，大多以二維模擬方探討問題。為驗證本研究是否可利用二維模擬方式建構外型及分析，分析以二維及三維數值分析結果與實驗值比對，二維模型之建構以三維模型之中心對稱面計算域，上風計算域為 2 倍風洞測試段高度，下風計算域為 10 倍風洞測試段高度。圖 5 為二維與三維數值結果與實驗集熱板上下表面壓力係數差比較，發現二維模擬結果明顯高估，且曲線變化之空氣動力特性均無法獲得；三維模擬結果顯示，X=0~0.34 為一高壓差區，原因為集熱板上表面位於水桶後方，此區域為一背風面，上游氣流流經水桶後形成分離泡，於水桶後方造成一渦流區。

4.2 貼地型與離地型分析比較

圖 6 為貼地型離地型集熱板上下表面壓力係數差比較，分離泡範圍內之流場特性相

似，但於分離泡後，離地型之架設可明顯降低升力，於實驗值之量測與模擬結果比較結果均為相似(如表 2)。圖 7 為其表面壓力分析及迎風流線圖，兩者均於翼端產生翼尖渦流，而貼地型之渦流結構發展半徑較大，且上表面於分離泡後產生之壓力較離地型高，探討其原因可能為離地型架設之集熱板與面間距會有構成一方形匣道孔，藉以下表面氣流流經產生匣道射流，使得上表面之氣流離開時加速混合達到平衡，而貼地型下表面氣流受阻，致使產生高壓；另集熱板兩翼端產生之翼尖渦亦會與分離泡相互耦合，產生渦流之三維翼展面延伸現象。圖 8 及 9 為集熱板上、下表面油流分佈數值結果與實驗比對，發現兩者下表面之結果均相似，而上表面於下緣處結果略有差異，可能為數值模型為減化原故，亦或實驗角架影響所致，有待進一步釐清。

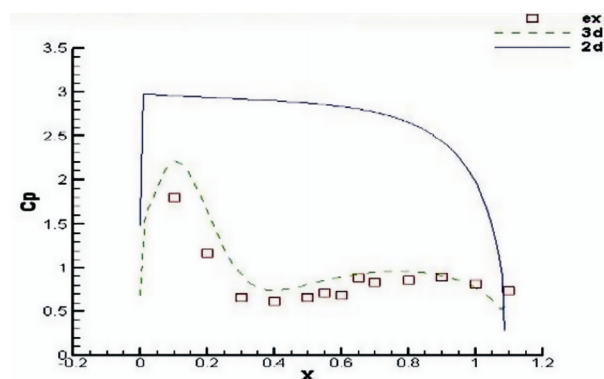


圖 5 2D 與 3D 數值結果與實驗集熱板上下表面壓力係數差比較圖

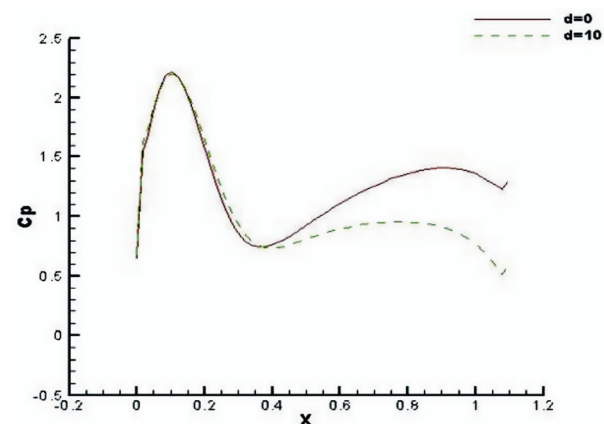
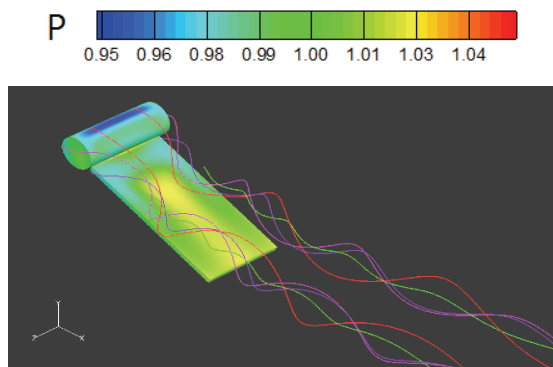


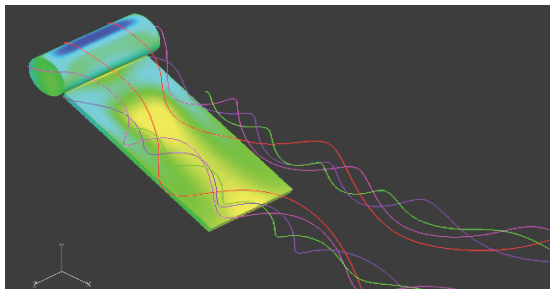
圖 6 貼地型離地型集熱板上下表面壓力係數差比較圖

表 2 實驗與數值量測值

離地距離	Lift(N/L)	CL	備註
D= 0cm	770.71	1.16	計算值
D=10cm	643.73	0.97	計算值
D= 0cm	661.49	0.99	實驗值
D=10cm	542.94	0.82	實驗值

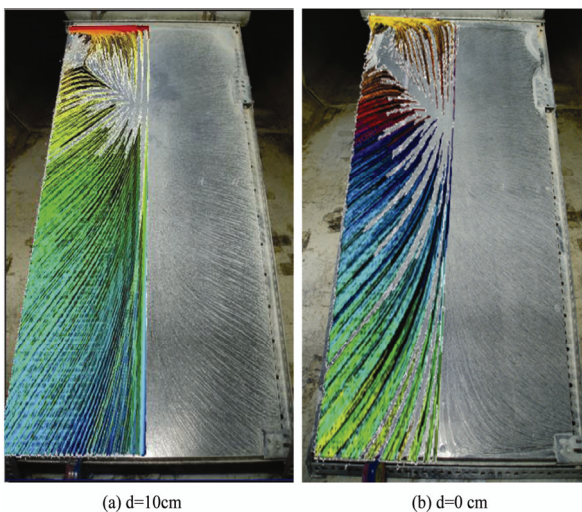


(a)離地型



(b)貼地型

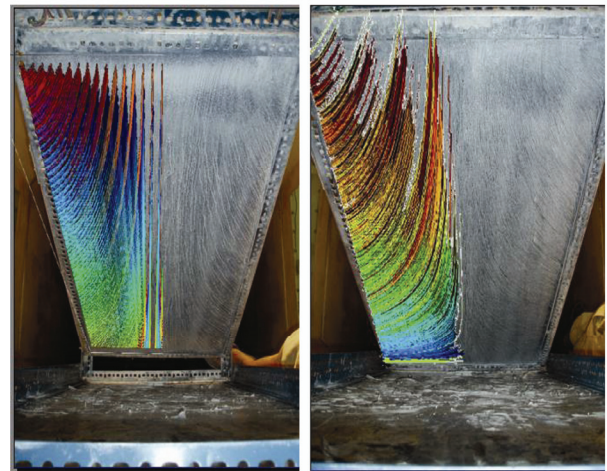
圖 7 表面壓力分析及迎風流線圖



(a) d=10cm

(b) d=0 cm

圖 8 集熱板上表面油流分佈數值結果與實驗比對($V=30 \text{ m/s}$, $\alpha=25^\circ$)

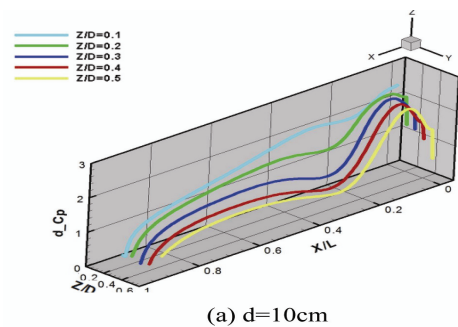


(a) d=10cm

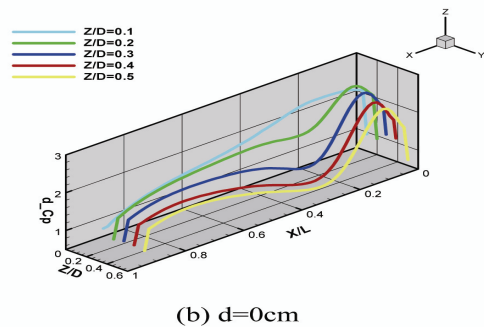
(b) d=0cm

圖 9 下表面油流分佈數值結果與實驗比對($V=30 \text{ m/s}$, $\alpha=25^\circ$)

圖 10 表示貼地/離地模型集熱板上下之 ΔC_p 值曲線，以 $Z/D=0.1\sim 0.5$ 四剖面比較，僅端面($Z/D=0.1$)曲線值有明顯變化，由圖 11(a)及 11(b)之壓力分佈得知，離地型因與地面形成空隙，下方流體形成一射流，對上方流體構成牽引作用貼地型之上板面流場未受干擾，於水筒後方之分離泡較完整，形成較大低壓區，致使整體升力較大。



(a) d=10cm



(b) d=0cm

圖 10 貼地模型集熱板 ΔC_p 值曲線($V=30 \text{ m/s}$, $\alpha=25^\circ$)

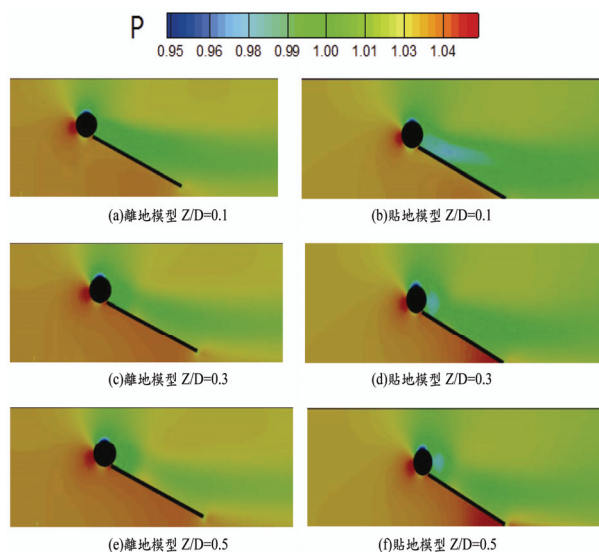


圖 11 壓力分佈剖面圖($V=30 \text{ m/s}$, $\alpha=25^\circ$)

六、結論

本研究標的之三維效應影響顯著，無法以二維模擬方式探討，集熱板離地架設 10cm 可降低升力約 16.5%，水桶後方集熱板上表面有分離泡之形成，同時集熱板兩翼端產生之翼尖渦會與其相互耦合，產生渦流之三維翼展面延伸現象。

七、誌謝

本研究感謝經濟部能源局計畫編號 100-D0101 經費支持。

八、參考文獻

1. Oliphant M.V., "Measurement of Wind Speed across a Solar Collector, Solar Energy," Vol.24, No.4, pp.403-405, 1980.
2. Kalogirou S.A., "Solar Thermal Collectors and Applications, Progress in Energy and Combustion Science," Vol.30, No.3, pp.231-328, 2004.
3. 李清安、張克勤、李聰盛、鍾光民、"颱風對太陽能熱水系統裝置損壞調查剖析：海棠颱風案例"，太陽能及新能源學刊，第 10 卷，第 2 期，pp.2-5, 2005.
4. 劉怡眉、林怡君、張克勤、鍾光民，"降低太陽能熱水器風阻之探討及測試，" J.

Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series B, Vol.38, No.1, pp.49-54, 2006.

5. 陳俊谷，降低太陽能熱水器風損之實驗研究，成功大學碩士論文，2006.
6. Chung, K. M., Chang, K. C., Liu, Y. M., and Lin, Y. C., "Reduction of Wind Load of a Solar Collector Model," CD ROM of 17th International Symposium on Transport Phenomena, Toyama, Japan, Sept. 4-8, 2006.
7. 修治平，導流板對不同角度集熱板之空氣動力特性研究，成功大學碩士論文，2007.
8. 周晉成，儲水桶對太陽能熱水器空氣動力之效應分析研究，成功大學碩士論文，2009.
9. Launder, B. E., Spalding, D. B., "The numerical computation of turbulent flow," Comput. Methods Appl. Mech. Eng. Vol. 3, pp. 269-289, 1974.
10. Rhie CM, Chow WL, "Numerical Study of the Turbulent Flow Pass an Airfoil with Trailing Edge Separation," AIAA Journal, Vol.21, pp.1525-1532, 1983.
11. Patankar SV and Spalding DB, "A Calculation Procedure for Heat, Mass, and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, 1972, pp. 1787-1806.
12. Patankar SV, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
13. Versteeg HK and Malalasekera W, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method," LONGMAN, 1999.