



熱電致冷晶片致冷效果之數值模擬

A Numerical Simulation on the Effects of Peltier Cooling of Thermoelectric Modules

蔡錦山¹ 蔡杰儒²

Chin-Shan Tsai¹ Chieh-Ju Tsai²

南榮科技大學工程科技研究所副教授¹

國立成功大學電機工程系學生²

摘要

本研究主要是以二維之物理模型，探討容器不同寬高比及熱電致冷晶片安裝位置對容器內工作流體的溫度場及流場分佈之影響情形。本文所研究之容器內工作流體，模擬區域包括工作流體、熱電致冷晶片及容器三個部分。所使用之統御方程式包括質量守恆方程式、動量守恆方程式及能量守恆方程式。本文利用有限元素軟體COMSOL Multiphysics求數值解，經由數值模擬結果顯示，在容器左側之浮力導出流為順時針方向轉動，右側則為逆時針方向轉動。當熱電致冷晶片安裝在容器底部時，容器左右二側之浮力導出流的流場在冷卻過程中幾乎都保持對稱狀態；但當熱電致冷晶片安裝在容器頂部時，浮力導出流之流場會出現左右擺盪。當熱電致冷晶片安裝在容器底部及容器之寬高比越大，則可獲得較佳之冷卻效果及較大的工作流體平均速度。

關鍵字：寬高比、熱電致冷晶片、有限元素軟體、浮力導出流

一、前言

為追求人類生活之方便及舒適，且隨著科技的發展與進步，我們不得不消耗更多的能源。而目前人類所使用之能源，不論其是工業用的石化燃料、發電用的煤或天然氣、或是交通工具所需要的汽柴油，不僅蘊藏量逐漸減少，其所排放的廢氣亦產生嚴重之汙染及溫室效應。為了使地球與人類能長久延續、代代相傳，講求環保、節能的設計理念及使用替代能源，已是刻不容緩的課題。目前世界各國正在積極研究發展如何應用太陽能、風力能、地熱能及水力能等再生能源，以改善人類的生活環境品質及解決能源危機。熱電致冷晶片(thermoelectric cooler, TEC)因通電後可產生冷端、熱端，



可用於冷卻及加熱，且其具有重量輕、體積小、維修簡便及使用壽命長等優點，因此若能與太陽能結合應用，將可成為一環保且節能之冷卻或加熱設備。

傳統上提到太陽能，大家想到的都是太陽能熱水器或太陽能發電，至於應用在冷卻方面則較為少見。由於熱電致冷晶片通電後即可將熱量由冷端移往熱端，因此可將其應用在冷卻或加熱。以熱電致冷晶片替代其他致冷方式時，因其不需使用壓縮機或冷媒，因此運轉時將更為安靜且無冷媒破壞臭氧層之情況產生。

熱電偶(thermocouple)為一精確的溫度量測儀器，由二種不同的金屬導線所組成，若二端接點的溫度不同時，將產生一電動勢值，此為席貝克(Seebeck)效應；熱電致冷晶片由半導體所組成，當通電流時會產生冷端及熱端的效果，為席貝克效應之逆反應，稱為柏爾堤效應(Peltier effect)，可做為冷卻或加熱裝置(Goldsmid, 2009)。

潘建文(2013)將熱電致冷晶片放置在屋頂鐵皮之間，利用陽光照射鐵皮屋所造成的高溫，與室內溫度有所差異，因此產生電動勢而發電。柯鴻彬(2013)將市售之家庭用烘碗機加以改裝，將其熱源由線圈型式改為熱電致冷晶片(TEC1-12706)的熱面所產生的熱來取代，以探討其應用在烘碗機上的可行性。

陳永曆(2014)把溫差發電晶片架置在排氣管上，應用機車所排放的熱氣與空氣之間的溫度差異而發電，所產生之電能傳送至熱電致冷晶片，以驅動晶片冷面效果，讓行動冰箱能持續運作，以達到將廢熱回收再轉換成能源之目的。

胡原麟(2013)研究熱電致冷晶片的致冷、致熱功能，設計、製造出一冷熱風扇原型，並加以應用在日常生活中，以期達到人體因追求舒適感受、需要改變區域環境溫度的需求。因熱電致冷晶片體積小、重量輕，且可使用廢熱達到致冷、致熱之效果，因此可達節能減碳、攜帶便利與使用安全之目的。

陳斌豪等人(2013)以多重物理耦合軟體研究熱電致冷晶片用於CPU的冷卻行為，結果發現熱電致冷晶片模組的排列位置，對於CPU的溫度分佈有顯著的影響。隨著CPU消耗功率的增加，CPU的溫度分佈更為不均勻。

Jaegle (2008)以COMSOL Multiphysics軟體建立探討熱電致冷晶片熱效應之模組，模組可為任意形狀、其參數設定可為等向性(isotropy)或異向性(anisotropy)、常數或變數、穩態(steady state)或暫態(transient state)、是否考慮熱對流(heat convection)等





皆可輕易獲得數值解，且可同時進行模組之結構分析(structural analysis)。

Kuscu and Kahveci (2012)考慮熱電致冷晶片對二種不同寬高比(aspect ratio)之圓柱形容器致冷效果之影響，其結果顯示在圓柱形容器中將出現弱對流流(weak convection currents)，且熱傳面積越大、冷卻效果越好。在本研究中，將以COMSOL Multiphysics多重物理耦合軟體，針對以熱電致冷晶片進行冷卻之容器內工作流體，進行數值模擬，以探討熱電致冷晶片不同寬高比及安裝位置對其致冷效果之影響。

二、容器內工作流體物理模型

本研究主要是針對容器內工作流體，以物理耦合軟體 COMSOL Multiphysics 作為分析工具，探討不同寬高比及安裝位置對以熱電致冷晶片進行冷卻之容器內工作流體的溫度場及流場分佈情形。

(一) 幾何形狀與尺寸

本文所研究之容器內工作流體，為不考慮其深度方向變化的二維數值模型，模擬區域包括容器內之工作流體、熱電致冷晶片及容器三個部分，其中容器內之工作流體為水、容器材質為玻璃，熱電致冷晶片之型號為TEC1-12708，其規格為40mm×40mm×3.5mm、DC 15.5V、8A、77W（廣華電子商城商品目錄，2017）。本研究之物理模型如圖一所示，容器的寬/高比(W/H)分別為90mm/40mm、60mm/60mm及40mm/90mm。

(二) 基本假設

本文利用數值模擬之計算結果，探討容器不同寬高比及熱電致冷晶片安裝位置對容器內工作流體的溫度場及流場分佈情形之影響，為了簡化方程式的困難性，針對模型做了以下之假設：

1. 工作流體及容器為均質、等向之物質。
2. 忽略磁力場之影響。
3. 工作流體為不可壓縮之牛頓流體(Newtonian fluid)。



4. 工作流體的黏滯效應及熱輻射可忽略不計。
5. 工作流體之浮力以布氏近似法(Boussinesq approximation)加以計算。
6. 熱電致冷晶片之致冷效應以邊界條件表示。

(三) 統御方程式

本研究分析容器內工作流體之溫度場及流場分佈情形所使用的統御方程式，包括質量守恆方程式、動量守恆方程式及能量守恆方程式。式(1)~式(4)為工作流體之統御方程式；而式(5)則為容器之統御方程式(Incropera and DeWitt, 1997)：

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho(\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u} = \nabla \cdot \left[-p\bar{I} + \mu(\nabla\bar{u} + (\nabla\bar{u})^T) \right] + \bar{F} \quad (1)$$

$$F_y = \rho g \beta (T - T_\infty) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p \bar{u} \cdot \nabla T \quad (4)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (5)$$

式中 ρ 為密度(kg/m³)、 \bar{u} 為速度向量(m/s)、 t 為時間(sec)、 p 為流體壓力(Pa)、 μ 為動黏滯性係數(Pa·s)、 \bar{F} 為作用力(N)、 F_y 為 y (重力) 方向作用力(N)、 g 為重力加速度(m/s²)、 β 為體積熱膨脹係數(volumetric thermal expansion coefficient)(1/K)、 T 為溫度(K)、 T_∞ 為周圍環境溫度(K)、 C_p 為比熱(J/(kg·K))、 k 為熱傳導係數(W/(m·K))、 Q 為熱源項(W/m³)。

(四) 邊界條件

本研究之邊界條件主要包括流體及容器壁面交界處、容器壁面與周圍環境交界處及熱電致冷晶片安裝處之壁面。在流體及容器壁面交界處，其溫度及熱通量為連續，如式(6)-式(7)所示；在容器壁面與周圍環境交界處之熱通量以式(8)之牛頓冷卻定律計算；而熱電致冷晶片安裝處之熱通量，則如式(9)所示(Kuscu and Kahveci, 2012)：



$$\text{流體及容器壁面交界處：} T_f = T_g \quad (6)$$

$$\text{流體及容器壁面交界處：} \bar{n} \cdot (\bar{q}_f - \bar{q}_g) = 0 \quad (7)$$

$$\text{容器壁面與周圍環境交界處：} q = h(T - T_\infty) \quad (8)$$

$$\text{熱電致冷晶片安裝處之壁面：} q = -[17.078 - 0.4845 \times (25 - T)] \times 10^3 \quad (9)$$

式中下標 f 、 g 分別表示工作流體（水）及容器（玻璃）、 \bar{n} 為單位法向量、 q 為熱通量 (W/m^2)、 h 為熱對流係數 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)。

(五) 初始條件

本研究之工作流體及容器的起始溫度均為 20°C ，而流體之初始速度 V 為 0，如式 (10)-式(11)所示：

$$T(x, y, 0) = 20^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$V(x, y, 0) = 0 \quad (11)$$

本文以 COMSOL Multiphysics 軟體求數值解，經由選取模組、繪圖建模、設定參數、物理性質、邊界條件、建立網格、求解及後處理等步驟，可得到數值模擬之暫態解 (transient solution)，本文進行數值模擬時所使用之主要相關參數預設值如表一所示。使用 COMSOL Multiphysics 進行數值模擬時，其網格為三角元素 (triangular elements)，且所有參數之絕對誤差 (absolute error) 設為 10^{-5} 。

三、結果與討論

熱電致冷晶片致冷效果之優劣，主要以其工作流體之平均溫度作為判斷標準，而本文之工作流體平均溫度，定義為所有工作流體溫度之積分平均值。影響熱電致冷晶片致冷效果的因素相當多，諸如熱電致冷晶片之外加電壓或電流值、安裝位置、容器材質或寬高比及周圍環境因素，在本研究中則僅探討熱電致冷晶片之安裝位置及容器



之寬高比的影響。

為驗證本研究數值模型之正確性，以圖二所示之熱電致冷晶片（型號為TEC1-12708）及容器（尺寸為60mm×60mm×30mm）進行實驗，並以紅外線熱像儀（型號為Fluke Ti20）拍攝流體之溫度場。比較圖三當熱電致冷晶片在容器頂部作動10min之數值模擬解（絕對溫度 $K = ^\circ C + 273.15$ ）與圖四之實驗結果（ $^\circ C$ ），發現二者極為吻合。

圖五～圖十所示為本研究熱電致冷晶片安裝在容器底部或頂部、容器寬高比分別為90mm/40mm、60mm/60mm及40mm/90mm，不同冷卻時間(10min～60min)其溫度場及速度場的數值模擬暫態解。當熱電致冷晶片開始冷卻工作流體後，在熱電致冷晶片處之工作流體溫度因冷卻效應因此會降低，使得在容器壁面處之工作流體溫度相對較高，因流體溫度之不同、工作流體密度發生變化及差異，因此產生浮力導出流(buoyancy-induced flow)。由於熱電致冷晶片安裝在容器正中央處，無論其裝在容器底部或頂部，中央處之工作流體溫度皆會低於容器壁面處。

在容器左側之浮力導出流為順時針方向轉動，右側則為逆時針方向轉動，且隨著冷卻時間之增加，浮力導出流之流場範圍及速度將隨之增加，如圖五～圖十所示。當熱電致冷晶片安裝在容器底部時，容器左右二側之浮力導出流的流場在冷卻過程中幾乎都保持對稱狀態；但當熱電致冷晶片安裝在容器頂部時，冷流體受重力之影響將大於熱電致冷晶片安裝在容器底部時，因此浮力導出流之流場會出現左右擺盪的現象，如圖八及圖十所示。

在圖十一中熱電致冷晶片安裝在容器底部（寬高比分別為90mm/40mm、60mm/60mm及40mm/90mm，在冷卻時間為60min時，工作流體平均溫度分別為282.86K、283.73K及285.92K）或頂部（寬高比分別為90mm/40mm、60mm/60mm及40mm/90mm，在冷卻時間為60min時，工作流體平均溫度分別為282.86K、282.29K及285.92K），對工作流體平均溫度之影響並不明顯；而圖十一之模擬結果顯示容器之寬高比越大，則冷卻效果越佳。

圖十二顯示當熱電致冷晶片安裝在容器底部、寬高比分別為90mm/40mm、60mm/60mm及40mm/90mm，在冷卻時間為60min時，工作流體平均速度分別為0.0286m/s、0.0090m/s及0.0019m/s；當熱電致冷晶片安裝在容器頂部、寬高比分別為





90mm/40mm、60mm/60mm及40mm/90mm，在冷卻時間為60min時，工作流體平均速度分別為0.0270m/s、0.0028m/s及0.0024m/s，由此可知當熱電致冷晶片安裝在容器底部、具有較大的寬高比，則其所產生浮力導出流將具有較大的工作流體平均速度。

圖十二及圖十三顯示當容器寬高比為60mm/60mm及60mm/30mm，在冷卻時間為10min時，工作流體平均速度可達到最高值，之後隨冷卻時間之增加而下降，此現象與其他寬高比的容器有明顯差異。其原因可能因容器之寬度與熱電致冷晶片之寬度相當、又無足夠之溫差及空間產生浮力導出流，以致造成工作流體平均速度隨冷卻時間的增加而下降。

四、結論

本研究以二維數值模型，探討容器不同寬高比及熱電致冷晶片安裝位置對容器內工作流體的溫度場及流場分佈之影響情形。經由分析模擬結果，可得到以下之結論：

1. 在容器左側之浮力導出流為順時針方向轉動，右側則為逆時針方向轉動，且隨著冷卻時間之增加，浮力導出流之流場範圍及流體速度將隨之增加。
2. 當熱電致冷晶片安裝在容器底部時，容器左右二側之浮力導出流的流場在冷卻過程中幾乎都保持對稱狀態；但當熱電致冷晶片安裝在容器頂部時，浮力導出流之流場會出現左右擺盪的現象。
3. 熱電致冷晶片安裝在容器底部或頂部，對工作流體平均溫度之影響並不明顯；而容器之寬高比越大，則冷卻效果越佳。
4. 當熱電致冷晶片安裝在容器底部、具有較大的寬高比，則其所產生浮力導出流將具有較大的工作流體平均速度。

參考文獻

1. 潘建文(2013)。屋頂溫差發電降溫裝置系統。國立虎尾科技大學碩士論文。
2. 柯鴻彬(2013)。熱電熱電致冷晶片在烘碗機上的應用。國立虎尾科技大學碩士論。

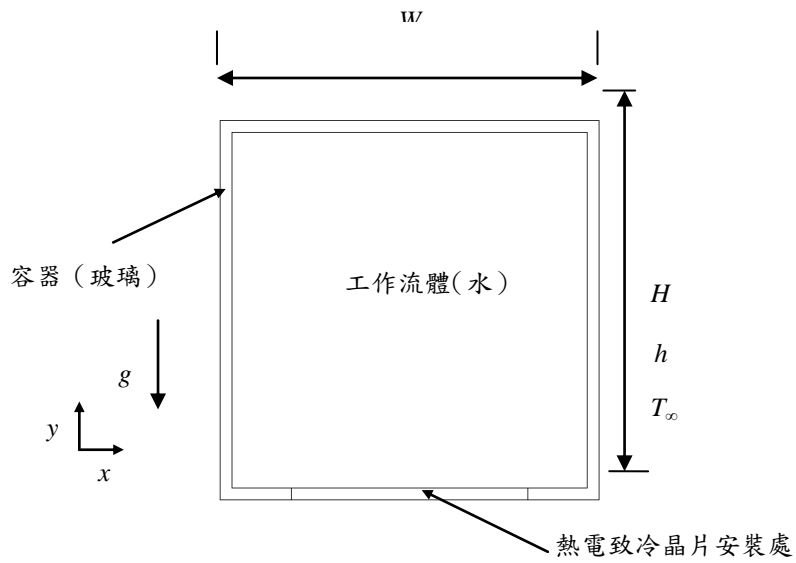


3. 陳永曆(2014)。TEG 晶片在機車排氣管廢熱發電之研究。國立虎尾科技大學碩士論文。
4. 胡原麟(2013)。致冷晶片在冷熱風扇之應用。國立虎尾科技大學碩士論文。
5. 陳斌豪、林育立、趙文軒、林政諺、許修豪、莊育賢(2013)。熱電模組之多重耦合現象分析。2013 綠色科技與工程應用研討會(GTEA)，論文編號：GT9-011，596-601，台灣台中市。
6. 廣華電子商城。商品目錄。網址：<http://shop.cpu.com.tw/product/50095/info/>，瀏覽日期：106年2月7日，。
7. Goldsmid, H. J. (2009). *Introduction to Thermoelectricity*. Springer Serier in Materials Science.
8. Incropera and DeWitt (1997). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (the fourth edition). John Wiley & Sons Incs., New Work, USA.
9. Jaegle, M. (2008). Multiphysics Simulation of Thermoelectric Systems-Modeling of Peltier-Cooling and Thermoelectric Generation. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008*, Hannover, Germany.
10. Kuscı, H. and Kahveci, K. (2012). Cooling Time of Water in a Glass on a Thermoelectric Cooler. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies*, 6, Part 1, 216-221.

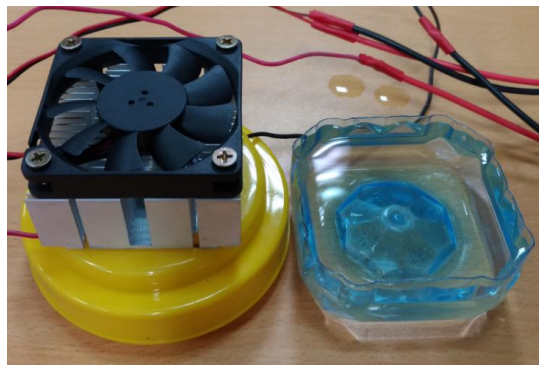
表一 數值模擬主要相關參數預設值

物理參數	符號	預設值	單位
工作流體(水)之密度	ρ_f	1000	kg/m ³
工作流體(水)之動黏滯性係數	μ_f	2.46×10^{-5}	Pa·s
工作流體(水)之比熱	$C_{p,f}$	4.2×10^3	J/(kg·K)
工作流體(水)之熱傳導係數	k_f	0.6	W/(m·K)
工作流體(水)之體積熱膨脹係數	β_f	1.8×10^{-4}	1/K
容器(玻璃)之密度	ρ_g	2500	kg/m ³
容器(玻璃)之比熱	$C_{p,g}$	835	J/(kg·K)
容器(玻璃)之熱傳導係數	k_g	14	W/(m·K)
熱對流係數	h	7	W/(m ² ·K)
周圍環境溫度	T_∞	293.15	K

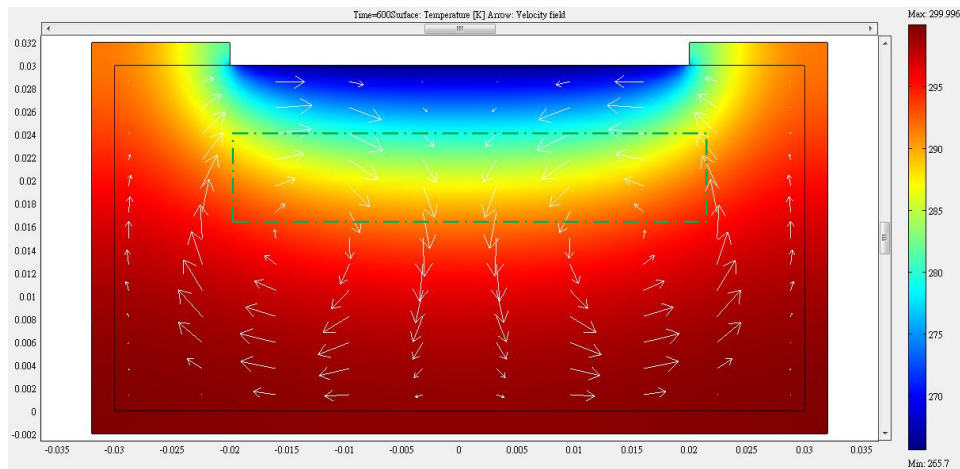




圖一 以熱電致冷晶片進行冷卻之容器內工作流體的物理模型圖

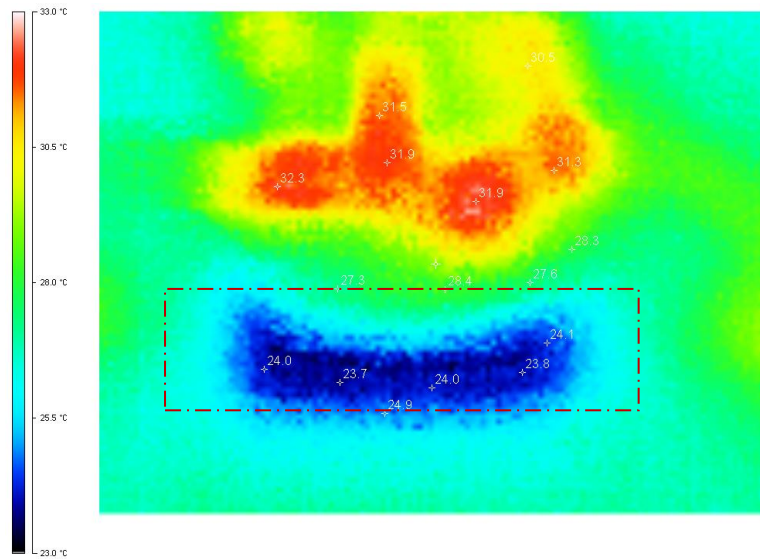


圖二 進行致冷效果實驗之熱電致冷晶片及容器 (工作流體)

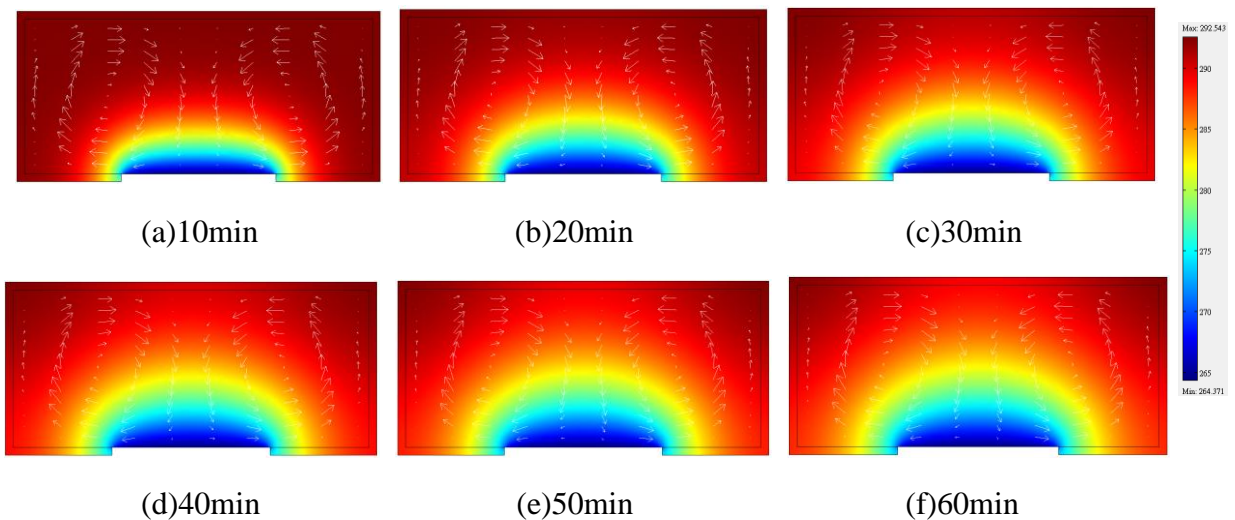


圖三 寬高比為60mm/30mm、熱電致冷晶片在容器頂部冷卻時間為10min之溫度場 (面) 及速度場 (箭頭)



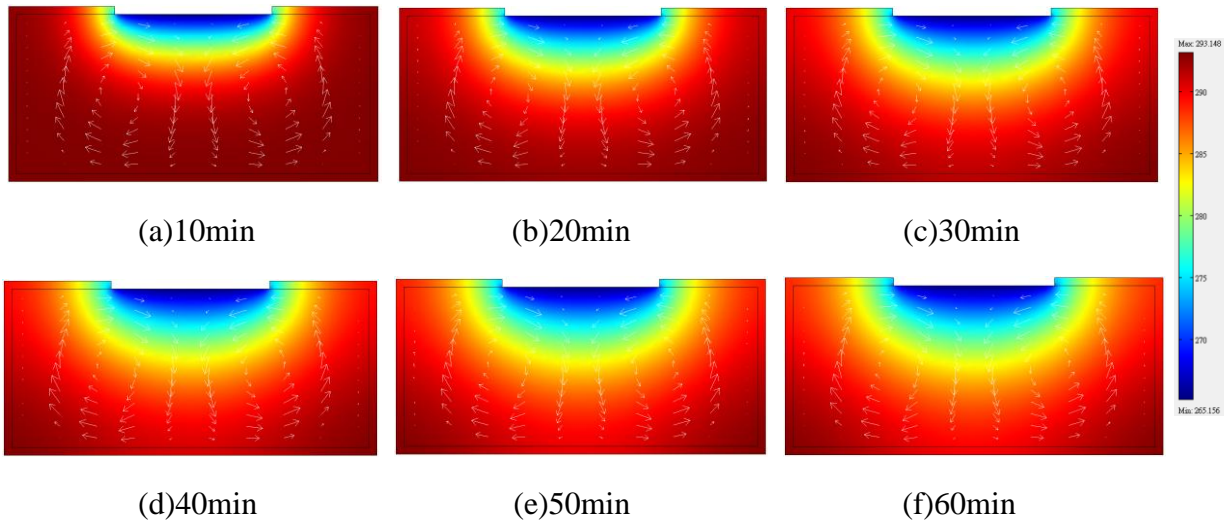


圖四 寬高比為60mm/30mm、熱電致冷晶片在容器頂部冷卻時間為10min利用紅外線熱像儀所拍攝之溫度場分佈圖

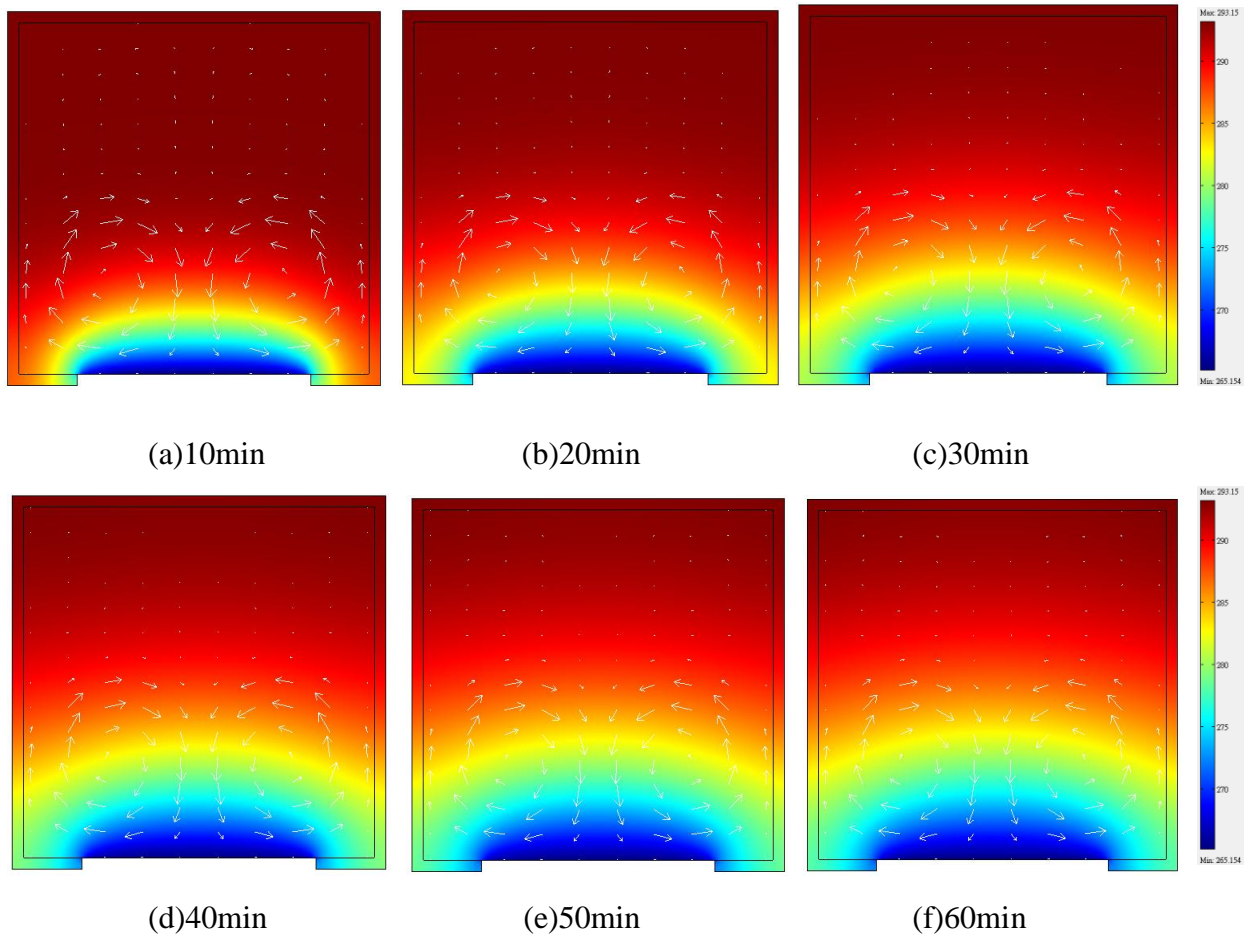


圖五 寬高比為90mm/40mm、熱電致冷晶片在容器底部不同冷卻時間之溫度場（面）及速度場（箭頭）



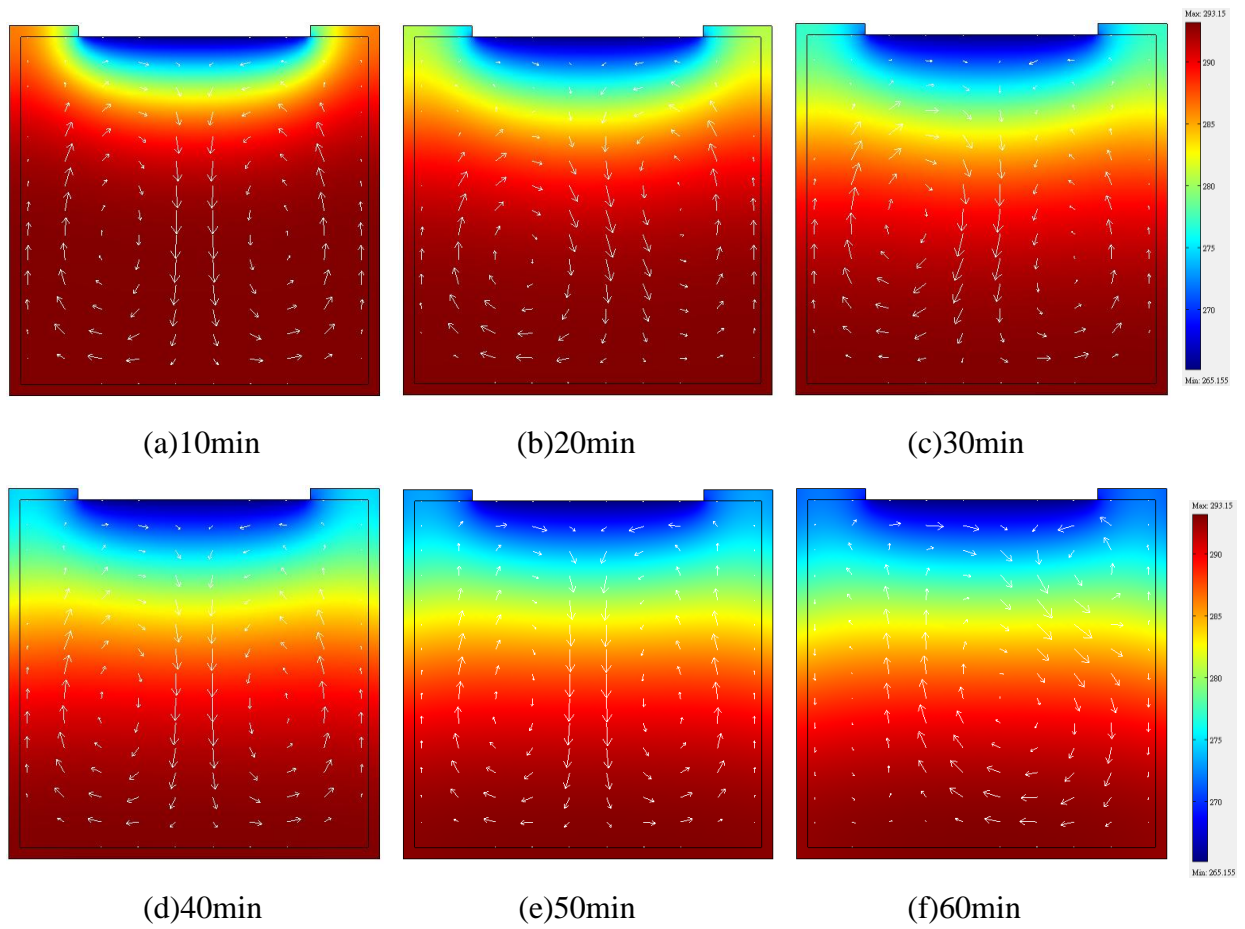


圖六 寬高比為90mm/40mm、熱電致冷晶片在容器頂部不同冷卻時間之溫度場（面）及速度場（箭頭）

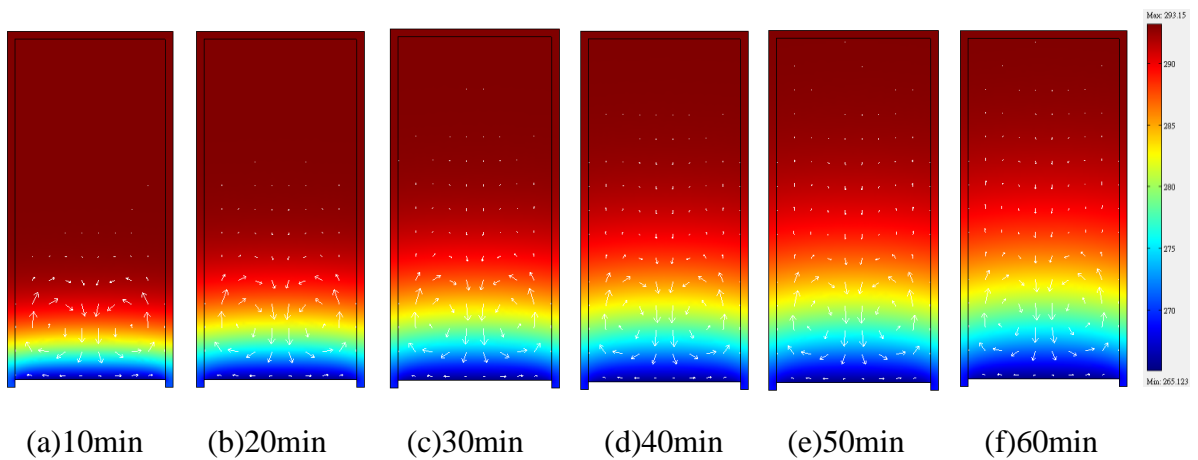


圖七 寬高比為60mm/60mm、熱電致冷晶片在容器底部不同冷卻時間之溫度場（面）及速度場（箭頭）

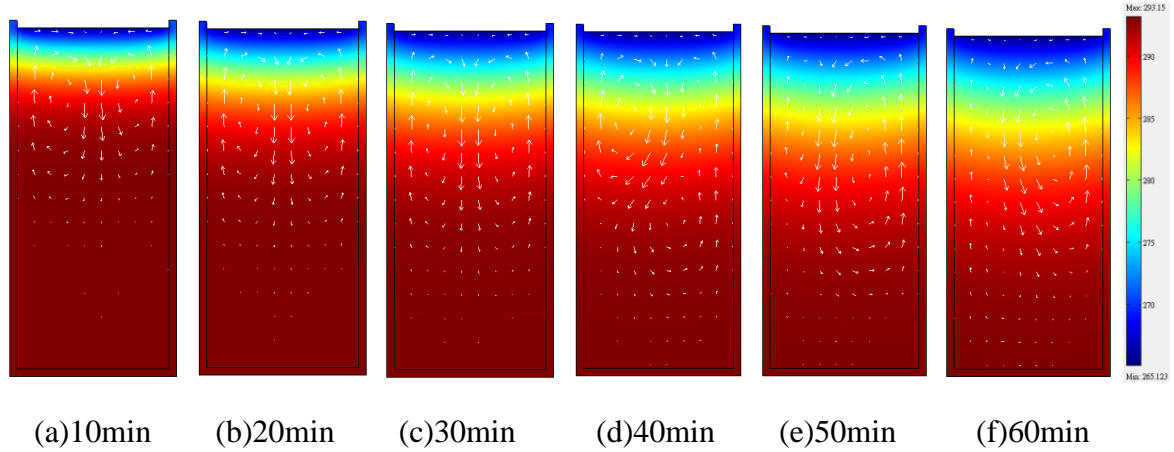




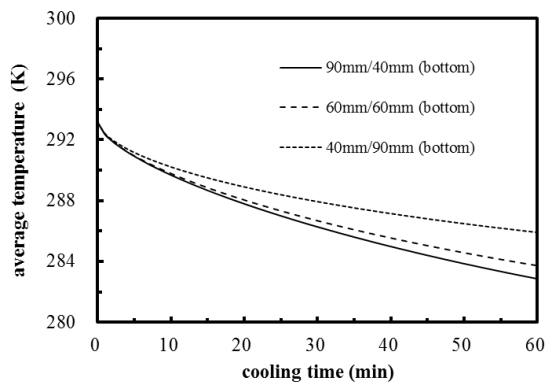
圖八 寬高比為60mm/60mm、熱電致冷晶片在容器頂部不同冷卻時間之溫度場（面）及速度場（箭頭）



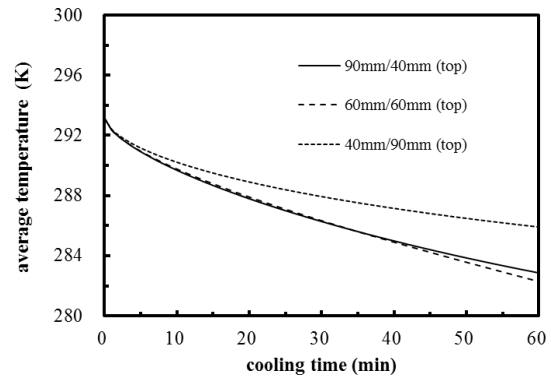
圖九 寬高比為40mm/90mm、熱電致冷晶片在容器底部不同冷卻時間之溫度場（面）及速度場（箭頭）



圖十 寬高比為40mm/90mm、熱電致冷晶片在容器頂部不同冷卻時間之溫度場（面）及速度場（箭頭）



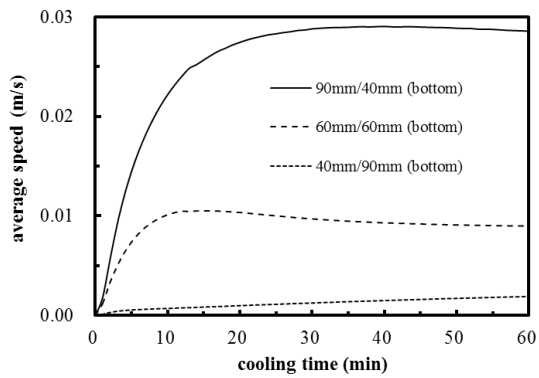
(a)熱電致冷晶片安裝在容器底部



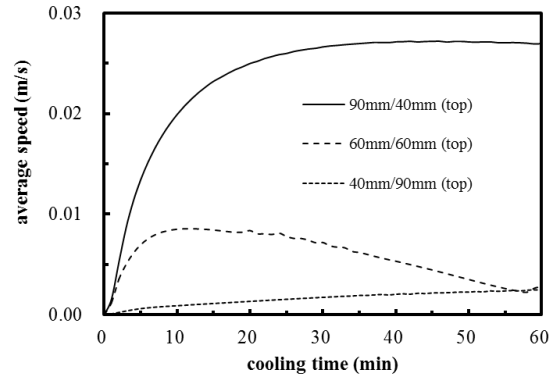
(b)熱電致冷晶片安裝在容器頂部

圖十一 熱電致冷晶片安裝在容器不同位置寬高比對工作流體平均溫度之影響



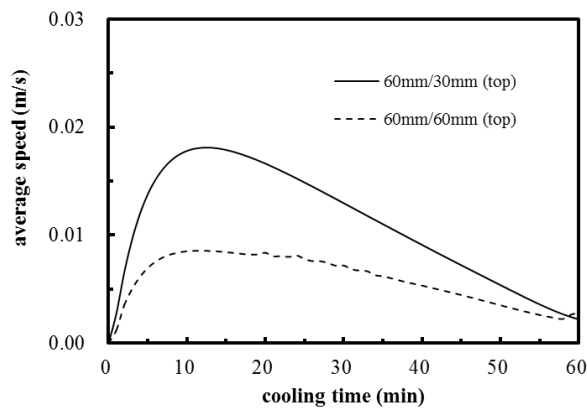


(a)熱電致冷晶片安裝在容器底部



(b)熱電致冷晶片安裝在容器頂部

圖十二 熱電致冷晶片安裝在容器不同位置寬高比對工作流體平均速度之影響



圖十三 熱電致冷晶片安裝在容器頂部、寬高比分別為60mm/60mm及60mm/30mm、不同冷卻時間對工作流體平均速度之影響

