

高功率 LED 投射燈散熱器之熱傳分析

Thermal Analysis for High Power LED-Based Projection Light

吳邦彥

Bang-Yenn Wu

德霖技術學院機械工程系助理教授

Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering

De-Lin Institute of Technology

摘要

投射燈主要是用來做建築裝飾照明之用，此外還有用來勾勒大型建築的輪廓，目前主流的投射燈均採用高功率 LED 燈。本文將就一款 100W 高功率 LED 投射燈散熱器利用 ANSYS 軟體進行數值分析，除進行被動式熱傳分析外，熱輻射效應也一併考慮。結果顯示自然對流情況下，不考慮熱輻射，散熱基板最高溫為 77 °C，散熱器表面溫度為 53 °C。當有風造成強制對流熱傳及考慮熱輻射效應狀況，散熱基板最高溫與散熱器表面溫度將降至可以接受之範圍。

關鍵字：散熱器、高功率 LED 投射燈、ANSYS

壹、前言

傳統照明燈具之白熾燈泡價格最便宜，但是發光效率低、高耗電、壽命短、易碎。而日光燈雖然很省電但其廢棄物有汞(水銀)污染、易碎等問題[1-3]。相對而言，符合節能環保安全的白光 LED，因是屬於化合物半導體的一種，其特性為：壽命長 (可達 10 萬小時，日光燈的 10 倍)、低耗電量(約為白熾燈泡的 1/8，日光燈的 1/2)、低發熱量、光顏色純、高防震性，不易碎，安全、無污染、小型化，可平面封裝等等。同時，白光 LED 發光效率目前已達 49 lm/W，已超過白熾燈泡的 15 lm/W，其效率、亮度因科技進步在不斷地在提昇當中[4]，相信在不久的未來，白光 LED 燈將會成為照明燈具的主流產品。投射燈主要是用來做建築裝飾照明之用，此外還有用來勾勒大型建築的輪廓，目前主流的投射燈均採用高功率 LED 燈，常用有 8W、12W、24W、27W、36W 等功率形式。

LED 發光原理為對半導體內正負極兩個端子施加電壓，當電流通過，使半導體中電子與電洞(hole)相結合。電子與電洞結合時，能量以光與熱的形式釋放。依照半導體使用材料不同，產生不同能階，將使結合之光子能量產生不同波長的光[5,6]。

影響 LED 燈之壽命因素為：(1)、溫度因素：電子與電洞結合部分轉換成光，部分轉換成

熱。當環境溫度升高時，能量釋放量以指數型式減少[7]，相對亮度減小，壽命縮短。(2)、驅動電流因素：當電流輸入超過額定電流時，LED 之亮度下降一半。(3)、封裝材料因素：封裝不良，散熱不佳。如果使用於室外，還必須具備防水、抗潮、抗 UV 等功能。(4)、靜電因素：靜電會破壞晶片，所以製造、封裝、運送過程都要防止靜電。

使用散熱器作為 LED 燈之主要散熱機制在文獻上已經有諸多探討[8,9,10]，除了增加熱傳面積已增加熱傳效果外，熱輻射影響在 LED 燈的散熱中也是不可以忽視的一環[11]，如果增加表面輻射發射率(surface emissivity)，熱輻射散熱可以占全部 LED 燈散熱效果至 50%[12]。

本文將就一款 100W 高功率 LED 投射燈散熱器利用 ANSYS 軟體進行數值分析，除進行被動式熱傳分析(passive cooling)外，熱輻射效應也一併考慮。

貳、理論分析

LED 整體發熱量雖然不高，但換算成單位體積發熱量時，卻遠遠超過其他光源。熱量的傳遞路徑主要分為三種型態，分別為熱傳導傳遞(conduction heat transfer)、熱對流傳遞(convection heat transfer)、熱輻射傳遞(radiation heat transfer)[14]。

- 熱傳導(conduction)。以微觀尺度來看，一個熱的快速移動或震動的粒子撞擊鄰近粒子導致熱的傳遞。熱傳導遵循傅立葉定理(Fourier's Law)，

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

其中， q 為熱傳量， k 為熱傳導係數(heat conduction coefficient)， $\frac{dT}{dx}$ 是距離 dx 表面上的溫度梯度(temperature gradient)。

- 熱對流(convection)。是利用流體流動來達到熱傳遞。熱對流熱傳在流體存在的場合中為最主要的熱傳機制。熱對流利用牛頓冷卻定律(Newton Cooling Law)來描述，

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

式中 h 為對流熱傳係數(convection heat transfer coefficient)， A 是熱傳系統表面的面積， T_s 為表面溫度及 T_∞ 為室溫或流體溫度。空氣的自然熱對流係數大約介於 $1 \sim 25 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 。

- 熱輻射(radiation)。主要是利用電磁輻射進行熱量傳遞。熱輻射可利用史蒂芬-波茲曼定律(Stefan-Boltzmann Law)來描述，

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

其中 A 是表面面積， T 是物體溫度， σ 是史蒂芬-波茲曼常數($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)， ε 為輻射放射率。底標 1 與 2 代表表面 1 與表面 2。從輻射方程式(3)得知，如果分析包含熱輻射，則分析為高度非線性。

- 穩態熱傳(steady-state heat transfer)代表系統的淨熱傳量為 0。換言之，傳入系統的熱傳量加上系統自己所產生的熱量等於流出系統的熱傳量。以數學式表示為，

$$q_{in} + q_{gen} - q_{out} = 0 \quad (4)$$

底標 in 代表傳入系統熱量，gen 代表系統產生熱量，out 代表傳出系統熱量。當系統滿足方程式

(4)，則系統達到穩態。在穩態熱傳分析中，節點的溫度不隨著時間變化。穩態熱力分析的能量平衡方程式可以寫成，

$$Q = \Delta E = 0 \quad (5)$$

以矩陣形式表示為，

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (6)$$

其中[K]為傳導矩陣，包含熱傳導係數、熱對流係數、熱輻射率(emissivity)和形狀因素(shape factor)，{T}為節點(node)溫度向量，{Q}為節點熱傳量，包含了系統產生的熱量。

叁、ANSYS 分析

ANSYS 分析基本步驟為：[15]

1. 建立有限元模型，設置材料特性。
2. 添加熱負荷與邊界條件。
3. 定義接觸區域。
4. 定義網格控制並劃分網格。
5. 對問題進行求解。
6. 進行結果評估與分析。

本研究利用ANSYS Workbench中mechanical模組進行熱分析(thermal analysis)，此分析模組有其限制。一般而言，在基本熱傳分析中，熱傳導(conduction)是熱分析之基礎，所有的熱傳元素皆提供熱傳導之分析，但對於加入熱對流或熱輻射之物理性質考量時，便需有額外有限元素模型之建立技巧。由於ANSYS並不提供在同一元素同時存在熱通量(heat flux)及熱對流(heat convection)做為邊界條件之作用，因此對於解決此種分析問題時便需利用表面作用元素(surface effect element)，以便協助處理熱對流時的情形。此外，利用ANSYS基本熱傳模組處理熱對流分析時，必須了解物體表面之對流熱傳係數(convection heat transfer coefficient)，這一係數在ANSYS之mechanical熱分析模組並無法計算得知，ANSYS只能將它當成邊界條件輸入。因此熱對流係數之獲得必須在熱分析前完成，否則便須透過計算流體力學之分析模式來完成分析。一般而言，自然對流熱傳係數為PrnadtI與Grashof數的函數，Nusselt數滿足方程式 $Nu = c(Gr*Pr)^n$ 。在層流(laminar flow)情況下n=0.33，在紊流(turbulent flow)情況下n= 0.25。強制對流之對流熱傳係數則為PrnadtI與雷諾數(Reynolds)的函數，可以寫成 $Nu=f(Re, Pr)$ 。本研究不計算對流熱傳係數，只將它當成邊界條件輸入。另外，在考量到熱輻射之影響時，本分析使用ANSYS/Mechanical模組，其熱輻射使用輻射矩陣法來處理面與面之間的輻射問題[15]。ANSYS 熱輻射的分析限制僅能分析屬於表面發射之問題，對於穿透式的物體輻射ANSYS無法分析。

肆、問題分析

本文分析所使用的散熱片如圖1所示，散熱器與光罩及上蓋組合圖如圖2所示，LED晶粒均

勻分布於核心面積為 $60*60\text{mm}^2$ 之陶瓷(ceramic)散熱基板上，如圖3所示，陶瓷散熱基板之熱傳導係數為 $4.5\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 。鰭片數目共30 組，鰭片厚度為 2.65mm ，詳細尺寸如圖4所示。散熱片材料為鋁合金(aluminum alloy)，其熱傳導係數如表1。環境溫度為 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。本研究使用達梭公司(Dassault)之3D 繪圖軟體SolidWorks 2014版本繪製散熱器。

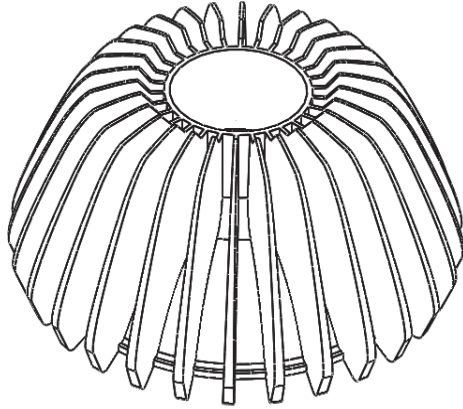


圖1 LED投射燈的散熱器

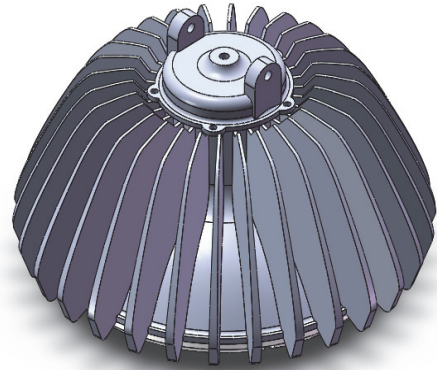


圖2 LED投射燈的散熱器與燈具組合

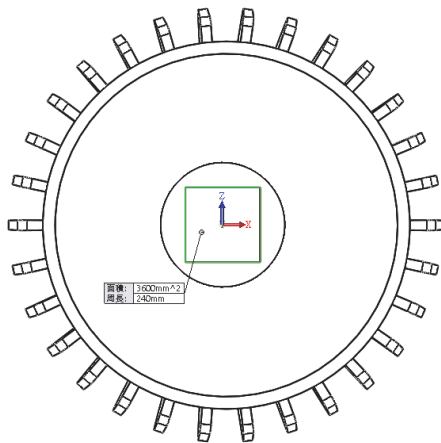


圖3 LED晶粒之散熱基板

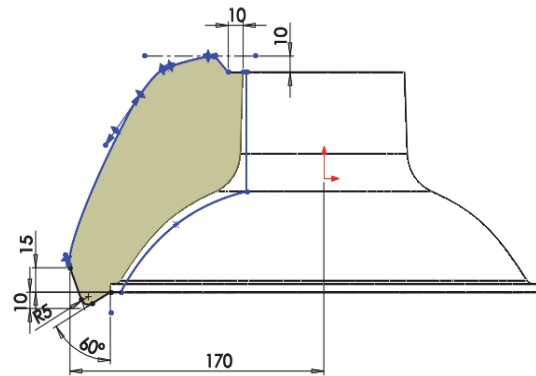


圖4 單一散熱鰭片尺寸(單位mm)

表1 鋁合金熱傳導係數

溫度($^\circ\text{C}$)	k ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$)
-100	144
0	144
100	165
200	175

本研究利用ANSYS Workbench 15.0版本進行分析，分析之計畫概要(Project Schematic)如圖5

所示。

網格劃分採用ANSYS預設Mechanical模組使用Meshing，設定相關度中心(Relevance Center)為中等(Medium)，自動劃分為六面體網格。網格總共有28,909個點(Node)及13,708個單元(Element)。本分析之測試條件如表2所示。本分析之熱輻射只針對環境輻射，不存在面與面之間熱輻射，所以形狀因素F值設為1。ANSYS設定的熱通量只能施加在表面上，單位為能量除以時間再除以面積(energy/time/area)。本分析之高功率投射燈之額定功率設為100W，散熱基板面積為3,600mm²，且假設100W熱量均勻分布於散熱基板上，所以ANSYS所設定邊界條件之熱通量(heat flux)為2.78*10⁴ W/m²。前四個測試條件(case-1至case-4)保持輻射放射率為0.5，對流熱傳係數分別為5、50、500、5,000 W/m²- °C。其中case 1可視為自然對流，case-2至case-4則為強制對流。此四個測試條件可測試對流熱傳係數對散熱器整體性能之影響。Case-5至case-9之測試條件則改成對流熱傳係數固定為自然對流之5 W/m²- °C，輻射放射率ε分為0.4、0.3、0.2、0.1與不考慮熱輻射(ε=0)。所以比較case-1與case-5至case-9，可觀察熱輻射對散熱器性能之影響。

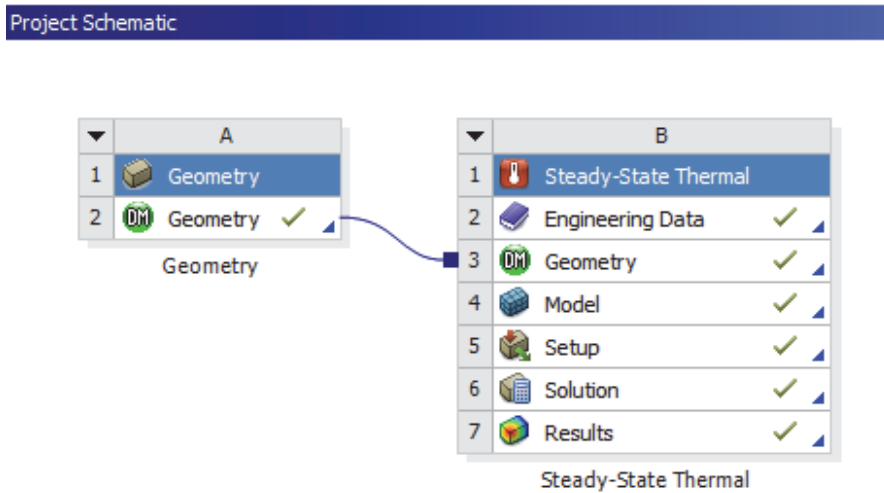


圖5 ANSYS分析計畫概要

表 2 測試條件

Case	h (W/m ² - °C)	ε	Tamb (°C)
1	5	0.5	25
2	50	0.5	25
3	500	0.5	25
4	5000	0.5	25
5	5	0.4	25
6	5	0.3	25
7	5	0.2	25
8	5	0.1	25
9	5	0	25

Case-1 分析結果之溫度分布圖如圖 6 所示。最高溫發生於散熱基板中央，最低溫發生於散熱器之散熱鰭片上。

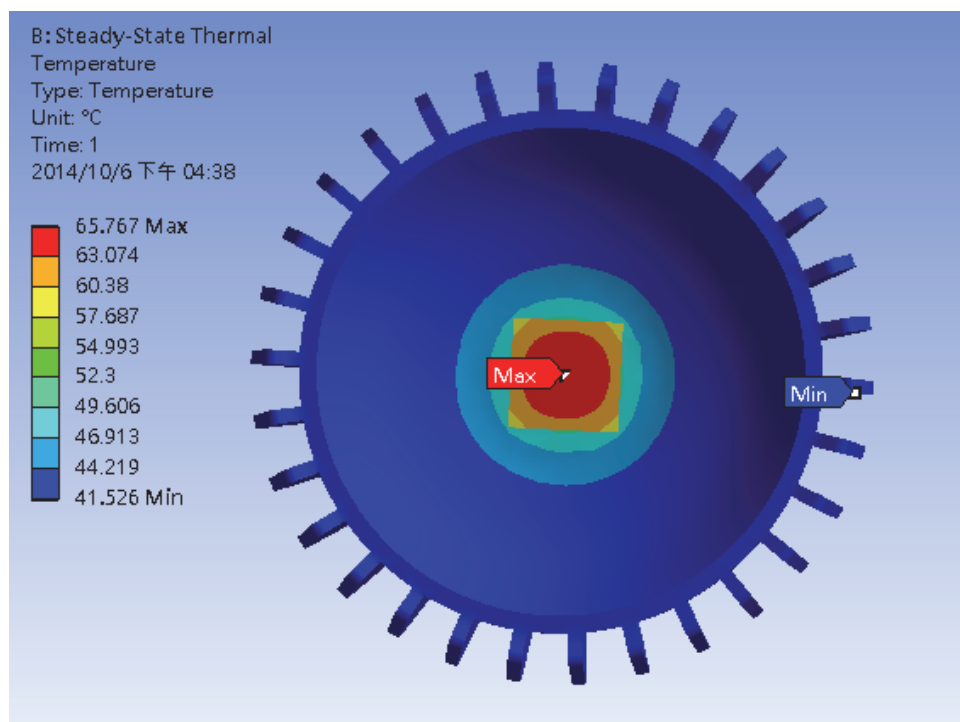


圖 6 Case-1 分析結果之溫度分布圖

伍、結果與討論

利用 ANSYS Workbench 15.0 的 Mechanical 模組進行穩態熱分析(Steady-State Thermal)。網格劃分設定為：中級(Medium)的關聯中心(Relevance Center)、中級的平滑度(Smoothing)、快速的過度(Transition)，粗造(corase) 的跨距角度中心(Span Angle Center)，及最小邊界長度(Minimum Edge Length)為 $5.201 \times 10^{-5} \text{m}$ 進行網格劃分，劃分所得網格共有 28,909 點(node)，結構元素(element)有 13,708 個。求解選項設定為溫度(Temperature)，並在結果顯示標註最高溫與最低溫。分析結果如表 3 所示。

散熱器最高溫發生於與散熱基板位置中央部位，最低溫發生於散熱器散熱鰭片表面，增加對流熱傳係數，導致散熱基板與散熱器表面溫度下降。當對流熱傳係數由自然對流之 $5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 增加至強制對流之 $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 時，散熱基板最高溫與散熱器表面溫度很明顯產生急速下降。但是，強制對流熱傳係數由 $500 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 增加至 $5,000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，降溫效果不明顯。結果如圖 7 所示。

不考慮輻射效應時，散熱基板最高溫為 77.036°C ，散熱片上溫度為 52.92°C ，此散熱片上溫度偏高，將造成工作人員有燙傷疑慮。如果考慮輻射效應，散熱基板最高溫明顯下降。當輻射放射率升高至 0.5 時，散熱基板最高溫下降至 65.767°C ，散熱片上溫度則降至為 41.526°C 。輻射效應對散熱效果影響不可以忽視。結果如圖 8 所示。

目前電腦 CPU 散熱器均改用銅合金散熱鰭片，合金銅之熱傳導係數為 $401 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ，為鋁合金之 3 倍多。本研究嘗試使用銅合金為散熱鰭片，重新進行分析，其分析結果如表 4 所示。

與使用鋁合金散熱鰭片最高溫與最低溫比較如圖 9 與圖 10 所示。一般情況下，銅合金為散熱鰭片對散熱基板上最高溫約可降低 5 °C，但是，高對流熱傳係數(例如 5,000 W/m²-K)狀況下，使用銅合金散熱鰭片沒有明顯作用。若考量重量與成本，銅合金散熱鰭片不適用於高功率 LED 投射燈之散熱器。

表 3 鋁合金散熱鰭片分析結果

Case	Maximum Temperature (°C)	Minimum Temperature (°C)
1	65.767	41.526
2	50.846	27
3	45.235	25.041
4	38.917	25
5	67.2	42.973
6	68.911	44.703
7	71.011	46.814
8	73.628	49.465
9	77.036	52.92

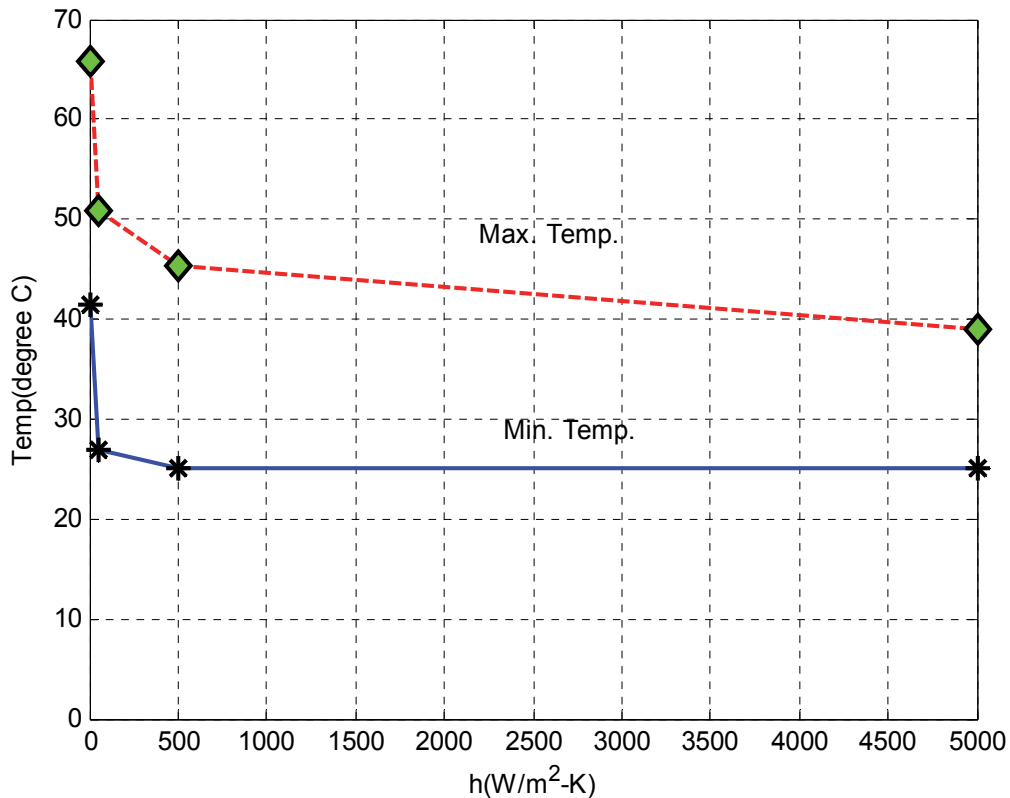


圖 7 對流熱傳係數對散熱器最高溫度之影響(ε=0.5)

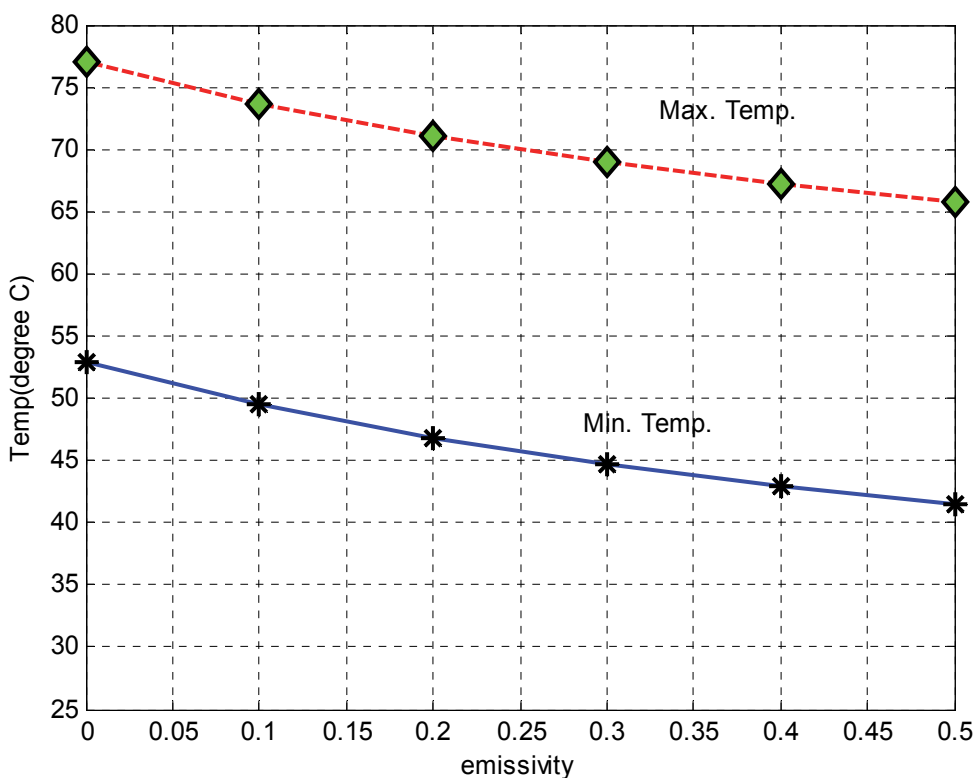


圖 8 輻射放射率對散熱器最高溫度之影響($h=5 \text{ W/m}^2\text{-K}$)

表 4 銅合金散熱鰭片分析結果

Case	Maximum Temperature (°C)	Minimum Temperature (°C)
1	58.849	42.639
2	43.511	27.406
3	40.463	25.115
4	38.078	25
5	60.309	44.098
6	61.436	45.224
7	63.55	47.336
8	66.201	49.986
9	69.656	53.439

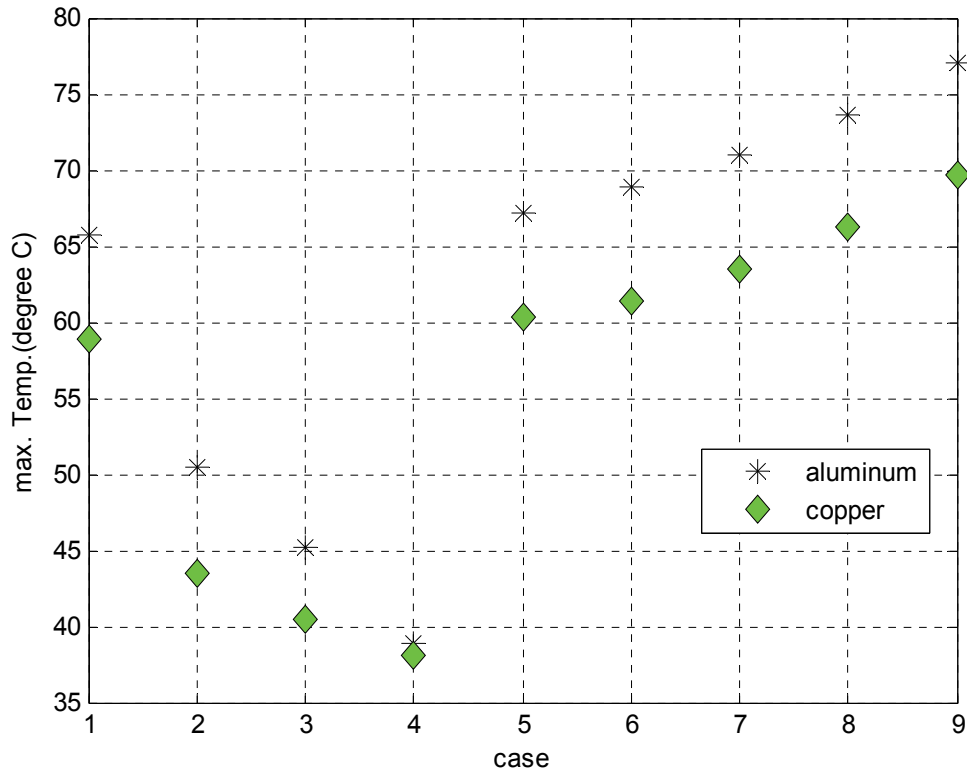


圖 9 鋁合金散熱鰭片與銅合金散熱鰭片最高溫度之比較

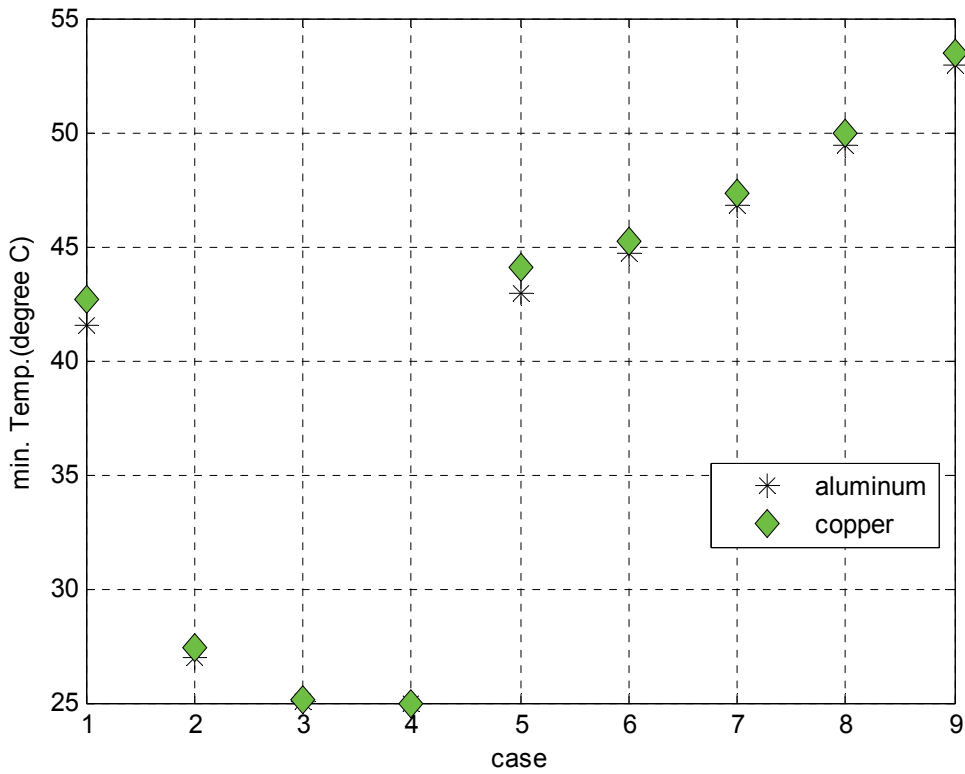


圖 10 鋁合金散熱鰭片與銅合金散熱鰭片最低溫度之比較

陸、結論

1. 將本文設計之散熱器使用於額定功率為 100W 高功率投射燈。
 - 在自然對流不考慮熱輻射情況下，散熱基板最高溫 77.036°C，可以接受。
 - 在強制對流考慮熱輻射情況下，散熱基板最高溫可降至 50°C 以下。
2. 對流熱傳係數增加，散熱基板最高溫下降。
3. 對流熱傳由自然對流改為強制對流時，散熱器最高溫很明顯產生急速下降。
4. 增加熱輻射效應，散熱器最高溫下降。
5. 熱輻射效應對散熱器最高溫影響明顯。
6. 在強制對流情況下，熱輻射效應可以忽略不計。
7. 改用銅合金散熱鰭片，可降低散熱基板最高溫，但是重量與成本增加，不是好的選擇。

符號說明：

Nu=Nusselt number，定義 $Nu=hD/k$ ，對流與傳導之比。

Re=Reynolds number，定義 $Re=Du\rho/\mu=Du/\nu$ ，分子力與黏滯力之比。

Pr=Prandtl number，定義 $Pr=Cp\rho/k=\nu/\alpha$ ，分子擴散與熱擴散之比。

Gr=Grashof number，定義 $Gr=gp^2L^3\Delta t/\mu^2$ ，浮力與黏滯力之比。

c=常數。

Cp=比熱，J/kg-K。

E=內能，W。

g=重力加速度常數，9.81 m/s²。

h=對流熱傳係數 (Coefficient of the convective heat transfer)，W/m²-K。

k=傳導熱傳係數(thermal conductivity)，W/m-K。

L、D=特徵長度，m。

q=熱傳量，W。

u=速度，m/s。

t=時間，s。

ρ =密度，kg/m³。

α =熱擴散率(thermal diffusivity)，m²/s。

μ =流體黏性(viscosity)，m²/s。

ν =流體動黏性(dynamic viscosity)，Pa-s。

ϵ =放射率(emissivity)。

參考文獻

- [1] 林志勳，2007，LED 市場及應用發展，工業技術研究院
- [2] 林志勳，2008，高亮度 LED 市場趨勢，工業技術研究院
- [3] 林志勳，2011，全球 LED 市場及台灣 LED 產業發展趨勢，能源報導，2011 年
- [4] 梅老師的數位教學網站，LED 原理，

<http://w3.uch.edu.tw/swchu/led%E5%8E%9F%E7%90%86.htm>

[5] 陳隆建編著，2010，發光二極體之原理與製程，全華圖書

[6] LED 知識庫，<http://steinled.blogspot.tw/2012/03/led.html>

[7] Schubert, E. Fred and Kim, Jong Kyu，2005，"Solid-State Light Sources Getting Smart". Science 308 (5726): 1274

[8] Jang, S.H. and Shin, M.W.，2008，"Thermal analysis of LED arrays for automotive headlamp with a novel cooling system"，IEEE Transactions on Device and Materials Reliability 8(3):561-564

[9] Bar-Cohen, A., M. Iyengar, and A.D. Kraus, 2003, "Design of optimum plate-fin natural convective heat sinks", Journal of Electronic Packaging 125(2): 208-216

[10] Huang, R.T., W.J. Sheu, H.Y. Li, C.C. Wang, K.S. Yang, 2006," Natural convection heat transfer from square pin fin heat sinks subject of the influence of orientation", 22nd IEEE SEMI-THERM Symposium, pp.102-105

[11] Rao, V.R. and S.P. Venkateshan, 1996, "Experimental study of free convection and radiation in horizontal fin arrays", International Journal of Heat and Mass Transfer 39(4): 779-789

[12] Rao, V.D., S.V. Naidu, B.G. Rao, K.V. Sharma, 2006, "Heat transfer from a horizontal fin array by natural convection and radiation – a conjugate analysis", International Journal of Heat and Mass Transfer 49: 3379-3391

[13] DIGITIMES 中文網：原文網址：高功率 LED 散熱技術與發展趨勢

http://www.digitimes.com.tw/tw/dt/n/shwnws.asp?CnlID=13&packageid=3233&id=0000167775_W25884HV6AJP5R6DRII0D&cat=20&ct=1#ixzz3E6FZStra

[14] 陸軍軍官學校資料

<http://content.sp.npu.edu.tw/teacher/changhc/DocLib2/5%E7%86%B1%E5%82%B3%E5%B0%8E.pdf>

[15] 袁越錦、徐英英、張豔華編著，2014，ANSYS Workbench 14.0 建模仿真技術及實例詳解。北京市：化學工業出版社。

Abstract

The main purpose of projection light is to decorate the illumination and show the outline of buildings. The mainstream of projection light is LED-based. The thermal analysis for high power LED-based projection light with 100W power is carried out by using ANSYS. In addition to passive thermal analysis, heat radiation was included in this analysis. The results shows the maximum temperature in ceramic substrate is about 77 °C, and the minimum temperature in heat sink is around 53 °C。 When forced convection is applied and heat radiation is considered, the maximum temperature in ceramic substrate and the surface temperature in heat sink is decreased to an acceptable range.

關鍵字：heat sink、LED、projection light、ANSYS

