

彎曲導光板於檯燈照明應用之光學模擬與分析

林龍昌、林士凱、徐維謙、余志成*

國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

摘要

本研究探討 LED 側入光式導光板於檯燈照明的設計，使用 V-cut 為其導光特徵結構，藉由變化 V-cut 角度與結構分佈及導光板曲率設計，以符合照明的規範需求，經由分析導光特徵與平面及彎曲導光板對於出光特性的影響，找出較為適宜之角度組，並套用在彎曲導光板設計上，分析導光板的曲率對於出光特性的影響。本文採用雙側 LED 入光設計，運用 TracePro 光學模擬軟體找出最佳特徵設計為頂角 120 度的等腰內凹 V-Cut，再以照度圖上的亮、暗區作為調整的依據，經由線性變化來調整 V-cut 的高度分佈，以達到導光板的均勻出光。本文所提出凹弧狀導光照明設計中加入擴散膜(D122、CH28T)[1]，模擬結果顯示符合 JIS(Japanese Industrial Standards) C 8112 之 AA 型規範[2]，並達到 70% 的照度均勻度。為避免擴散膜老化造成光衰的問題，本文設計一種波浪狀的導光板，探討多弧狀設計對出光光形與照度均勻性的影響，結果顯示多弧狀導光板幾何設計有助於提升照度均勻性，在未來以整合式單一導光板達到照明應用具有相當高的可行性。

關鍵字：側入光導光、彎曲導光板、多弧狀導光板、TracePro、LED 照明

1. 簡介

市面上的各式檯燈產品越來越多元化，不管是傳統白熾燈泡與螢光燈管的檯燈等，以及現在慢慢普及的白光 LED 檯燈，它們所發出的光能與光譜皆不相同，白光 LED 檯燈相較與其傳統式檯燈，在功能消耗及使用壽命方面均有優越性，要如何在 LED 燈具的光源設計上，我們需要利用光學原理，來達到控制光線的發散方向，而且可依不同用途的照明需求，來設計符合其燈具的理想配光路徑。目前 LED 照明燈具設計之方式有以下幾種[3]：LED 陣列式組合、利用透鏡的反射或折射原理、LED 藉由不同反射罩之形狀功能、LED 側入導光式等；每個照明燈具設計方式運用在不同的照明上，亦能相互的搭配，將可有效地收集從 LED 所發出之光線，並且更能夠更有效率設計出不同需求之 LED 照明燈具。

照明被人們廣泛的應用在生活中，為了響應節能減碳的目標，以 LED 為燈源的照明燈具已快速成長，當然 LED 檯燈也越來越多元化，在這競爭激烈的市

場，一定要開發出功能與造形兼具時尚感的檯燈，且又能符合環保概念的照明技術。

目前運用在照明上之導光板廣泛為平版，少有在造型上出現幾何變化，為了能在照明市場更有競爭力，本研究將嘗試在外型上做曲率變化，探討其出光特性，進一步應用在照明上，在此本研究將利用導光板搭配 LED 側入光方式建立檯燈照明模組，進行模擬分析，並符合照明之法規。

2. 照明應用之雙側入光 V-Cut 結構設計

本研究主要探討反射結構設計對於導光板的影響，以及說明雙側入光對於微結構的影響，所以反射結構的設計在與 LED 的搭配和導光板外觀的變化都會影響導光板出光的方向與角度；導光板所設定之材質為聚甲基丙烯酸甲酯(簡稱 PMMA)，折射率 1.49，而在此章所實驗的照明模組設置示意圖如圖 1 所示，於導光板下方設置觀察面(Observation Surface, OB Surface)以便能觀測出光的情形，於反射罩內面則是設定為白擴射(Diffuse White)，其相關外形尺寸如下：反射罩外形大小：117x83x6(mm³)、反射罩缺口大小：110x82(mm³)、導光板大小：110x80x3(mm³)、LED 大小設定：1x1x1(mm³)(出光角 120°其數量左右各 5 顆)、觀察面 A 大小：100x80(mm²)(距離導光板下方 1mm)、觀察面 B 大小：1000x1000(mm²)(距離導光板下方 400mm)。

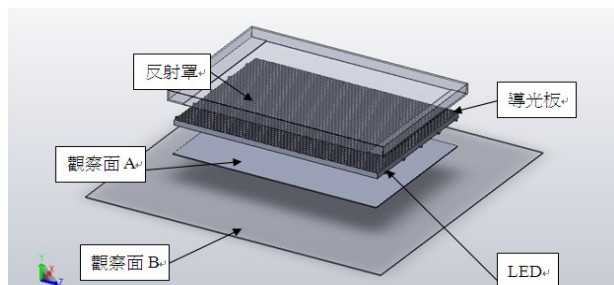


圖 1 模擬分析模型示意圖

為了得到較佳的照明均勻性，本實驗的出光分佈為蝙蝠翼配光曲線[4]，因此在導光板微結構 V-Cut 角度設計上，先設置一個可變角度的 V-cut 等腰三角形如圖 2，分別設置多種頂角來分析彼此的出光特性，頂角設置分別為 70°、80°、90°、100°、110°、120°等六種角度；其 H 值由原先預設固定值 0.3mm，高度做初步調整以等差高度變化(高度兩側最低為

0.1mm，中間最高為 0.33mm)，外形結構之頂角間距為 1.6mm，並將此 V-cut 等腰三角形結構設計，建置於模型導光板中，採用週期性分佈如圖 3，本小節所要探討的是在導光板上微結構的特徵方向，模擬並找出導光板上微結構的凸特徵(Convex V-cut)與凹特徵(Concave V-cut) 圖 4 最適的角度值。

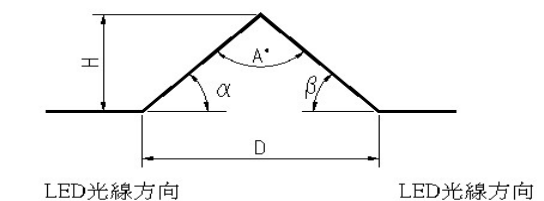


圖 2 LED 雙側入光示意圖

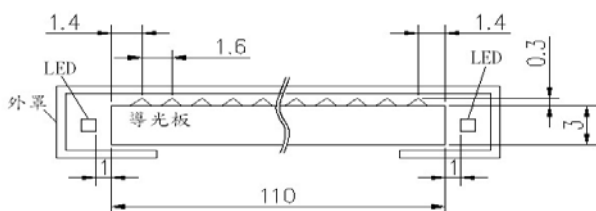


圖 3 凸特徵(Convex V-cut)微結構分佈示意圖

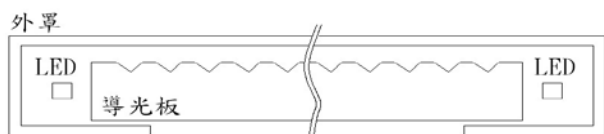


圖 4 凹特徵(Concave V-cut)示意圖

經模擬分析兩種特徵所得到相關數據結果如表 1、表 2 所示，從模擬分析結果來選擇凸特徵與凹特徵適當的角度。依出光角來看如圖 5，凸特徵有頂角 A 為 80°、100° 其中間軸向的光強度較高，凹特徵如圖 6 則有頂角 A 為 70°、80°、100° 中間軸向的光強度較高，因此中間的光強度太亮，而兩側的光強度較低，因此排除上述之角度組；在依據表 1、表 2 的數據來判斷較適合的角度組，在頂角角度越大時其平均照度及出光效率會跟著提高，因此本實驗將選擇頂角為 120° 的凹特徵角度組合來做進一步的模擬分析。

根據模擬結果來看，為了避免有判斷誤差情況，先進一步調整頂角 120° 的 V-Cut 的凹特徵，將以線性等差高度的變化來調整微結構的大小與分佈，使其在 LED 出光側的地方較為均勻再來進行後續模擬分析，讓所得結果比較為合理不易誤判。

表 1 凸特徵(Convex V-cut)分析彙整表

V-cut 結構	平均照度 (lux)	峰值光強度 (cd)	光角度	出光比率 (%)
70°	1.8567x10 ⁵	900	±16°	53.2
80°	1.9269x10 ⁵	1270	0°	55.2
90°	2.0254x10 ⁵	790	±21°	58.0
100°	2.1227x10 ⁵	830	±5°	60.8
110°	2.2259x10 ⁵	970	±15°	63.8
120°	2.3386x10 ⁵	1040	±27°	67.0

表 2 凹特徵(Concave V-cut)分析彙整表

V-cut 結構	平均照度 (lux)	峰值光強度 (cd)	光角度	出光比率 (%)
70°	2.0794x10 ⁵	1390	0°	59.6
80°	2.1849x10 ⁵	1060	±5°	62.6
90°	2.3074x10 ⁵	740	±25°	66.1
100°	2.392x10 ⁵	1110	±7°	68.5
110°	2.3985x10 ⁵	1040	±21°	68.7
120°	2.4094x10 ⁵	980	±37°	69.0

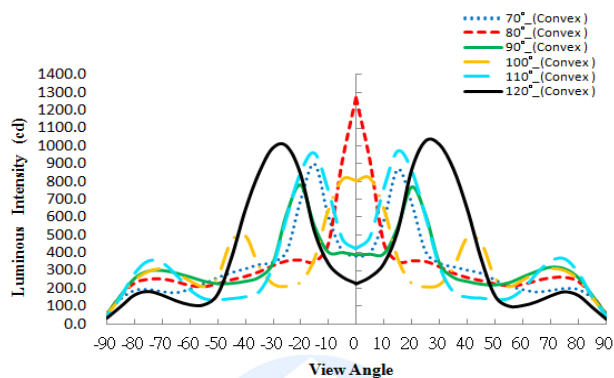


圖 5 凸特徵(Convex V-cut)出光角示意圖

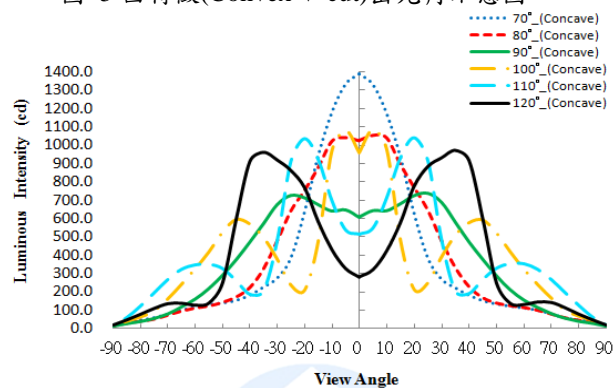


圖 6 凹特徵(Concave V-cut)出光角示意圖

3. 彎曲導光板的照明分析

3.1. 弧狀導光板之設計

為了使檯燈燈具在造形上有所變化，將以弧狀導光板來接續探討，在設計上，將以平面導光板相同的設計參數來分析不同彎曲導光板之出光特性，在此定義外形名稱為凸弧板(Convex arc plate)及凹弧板(Concave arc plate)， R_v 和 R_c 為曲率半徑， D_v 和 D_c 為彎曲高度，如圖 7 所示，導光板長 110 mm、寬 80 mm 厚度 3 mm，每個導光板的短邊前方有 LED 光源，LED 為 120° 出光角，光線數設定為 10 萬條，本實驗先預設一種同曲率不同外形的導光板，其曲率半徑為 200mm， $D_v = D_c = 7.51\text{mm}$ ，其微結構角度同平面導光板，材質為 PMMA，藉以討論同曲率及導光板外形結構差異的出光特性。

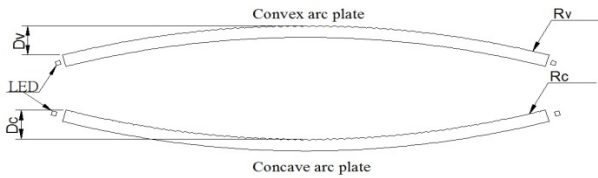


圖 7 曲率外形示意圖

其模擬分析結果就單純對其出光角圖如圖 8 來討論，凸弧板的軸向光強度太暗，光強度的高低落差較大，依工作受照面面積為 $500 \times 500(\text{mm}^2)$ 的大小，以九點量測法算出其均勻度之值如表 3，所得之值凹弧狀導光板其均勻度優於凸弧狀導光板，所以在此實驗將以凹弧狀導光板接續探討。

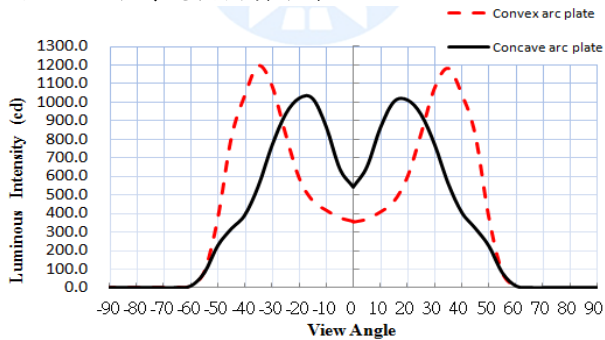


圖 8 凸、凹弧板在觀察面 B 的出光角

表 3 受照面之九點照度均勻度

曲率 0.05 (R200)	受照面 500mm X 500mm 之九點照度 (單位：lux)			照度均勻 (%)
凸弧板	3390	1691	3231	40%
	4179	2070	4085	
	3488	1714	3358	
凹弧板	3281	4425	3205	62.5%
	4376	5128	4538	
	3363	4510	3324	

3.2. 不同曲率凹弧狀導光板之光形分析

本節將探討不同曲率之凹弧狀導光板對於出光特性有何影響，依據曲率公式(1)計算，取得曲率分別為 0.002、0.003、0.004， D_v 為 3.02mm、4.57mm、6.03mm，藉以判斷不同曲率的出光特性。

$$\rho = \frac{1}{R} \quad (1)$$

各弧狀導光板在近觀察之分析模擬所得結果如表 4 從表可看出其平均照度值及出光效率隨著曲率由大到小的值會隨之提升，在此證明曲率越小越能使光線在導光板中傳送並出光；在光強度角上曲率越大其光強度角會往中間軸向偏移如圖 9，來看因此本實驗將針對曲率 0.002 之凹弧板做後續模擬分析。

表 4 各彎曲導光板近觀察面分析彙整表

凹弧板	平均照度 (lux)	光強度 (cd)	光角度	出光比率 %
曲率 0.004	2.5404×10^5	1020	$\pm 18^\circ$	72.8
曲率 0.003	2.587×10^5	1010	$\pm 20^\circ$	74.1
曲率 0.002	2.622×10^5	1000	$\pm 23^\circ$	75.1

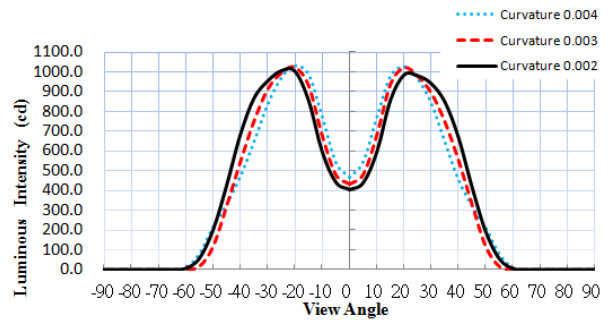


圖 9 各曲率出光角圖

3.3. 平面導光板的照度分析

針對本實驗所設計之平面導光照明模組來進行受照工作面來模擬分析，並觀察模擬結果，是否符合 JIS C 8112 檯燈規範中 AA 型的照度規範[4]，在檯燈前方半徑 50cm 的 1/3 圓周上的照度值須大於 250lux 以上，與在檯燈前方半徑 30cm 的 1/3 圓周上的照度值須大於 500lux 以上，其受照面之照度表整理如表 5 所示其結果符合 JIS C 8112 檯燈規範中 AA 型的照度規範。

導光板經多次線性高度變化所得最佳化的結果，其導光板的出光並非完全均勻，所以在此將利用擴散膜的特性，將擴散板放置在模型中進行模擬分析，探討其對於導出光均勻化。

在此先以平面導光板來進行模擬，依模擬分析之結果進行工作受照面的面積 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 之照度均勻度的計算，觀察其計算的結果是否符合照明手冊中

的規範，藉由表 6 和照度均勻度(Euniforimity)公式(2)可計算照度均勻度為 71%，可得知其結果剛好符合照明手冊中工作面的照度均勻度必須為 70% 以上。而其九點量測之平均照度為 1421 lux。所以在受照面上的照度也會呈現對稱分佈如圖 10。

$$E = \frac{\min(P1\sim P9)}{\max(P1\sim P9)} \times 100\% \quad (2)$$

表 5 檯燈受照面照度表(擴散膜 CH28T)

半徑	角度				
	-60°	-30°	0°	30°	60°
30cm	986	944	799	973	932
50cm	296	351	262	354	327

表 6 檯燈受照面均勻度照度表(擴散膜 CH28T)

受照面中央 500mm x 500mm 之九點照度(單位：lux)		
1238	1358	1284
1633	1744	1606
1228	1442	1260

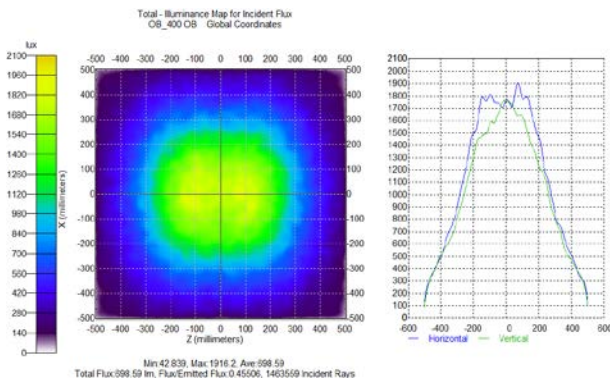


圖 10 平面導光板加入擴散膜(CH28T)之照度圖

3.4. 凹弧狀導光板的照度分析

本研究選用曲率為 0.002 之弧狀導光板來套用此設計之照明模組加入擴散膜型號 CH28T 來進行工作面來模擬分析，模擬結果符合日本 JIS C 8112 檯燈規範中的照度規範，但其照度均勻度並未符合照明手冊中工作面的照度均勻度必須為 70% 以上。

因此先變更其擴散膜的規格使用穿透性較佳之 D122 擴散膜，來在進行工作受面模擬分析，所得到受照面之照度圖圖 11 及配光曲線圖如圖 12，根據其受照面之照度表整理如所表 7 示其結果合 JIS C 8112 檯燈規範 AA 型的照度規範，我們再經由表 8 可計算出照度均勻度為 70.4%，結果符合照明手冊中工作面

的照度均勻度之要求，而其九點量測之平均照度為 1490lux。

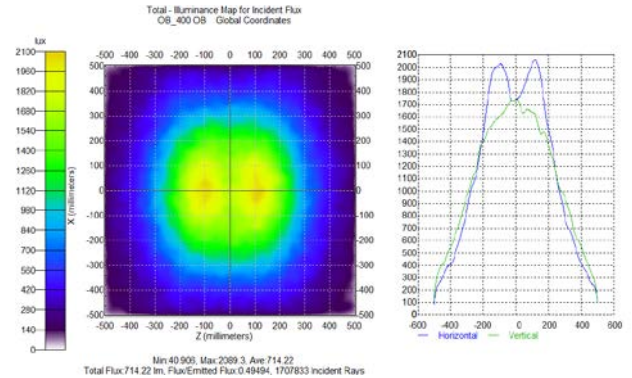


圖 11 凹弧狀導光板擴散膜 D122 之照度圖

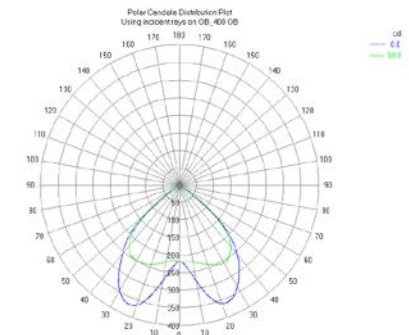


圖 12 凹弧狀導光板擴散膜(D122)之光型圖

表 7 檯燈受照面照度表(擴散膜 D122)

半徑	角度				
	-60°	-30°	0°	30°	60°
30cm	892	1010	959	1032	893
50cm	258	363	306	352	269

表 8 檯燈受照面均勻度照度表(擴散膜 D122)

受照面中央 500mm x 500mm 之九點照度(單位：lux)		
1251	1468	1314
1767	1733	1776
1331	1469	1302

4. 多弧狀導光板出光特性之影響及可行性

本實驗設定四種曲率如表 9 所列之多段彎曲的導光板，其外形如圖 13 所示，其設計參數同平面導光板，表面微結構為凹特徵(Concave V-cut)，加入同導光板外型之多弧狀擴散膜，其模擬分析的結果如表 10，而各曲率所得之結果並未符合照明手冊中的 70% 的均勻度，但從數據來看多弧狀導光板均勻度都在 69% - 64% 之間。

表 9 多弧狀導光板之尺寸表

曲率	0.004	0.01	0.0125	0.0182
R 值(mm)	250	100	80	55
H 值(mm)	3.63	4	5	6



圖 13 多段弧狀導光板外形

表 10 多弧狀各曲率受照面照度均勻度比較表

曲率 擴散膜	受照面中央 500mm x 500mm 之九點照度 (單位: lux)			照度均勻度 (%)	平均照度值(lux)
0.004 多弧面擴散膜	854	813	838	67	945
	1181	1168	1176		
	881	793	858		
0.01 多弧面擴散膜	774	712	755	67	858
	1068	1029	1067		
	812	714	789		
0.0125 多弧面擴散膜	794	709	772	64	872
	1092	1059	1105		
	815	720	784		
0.0182 多弧面擴散膜	810	729	845	65	908
	1105	1116	1106		
	859	794	814		
0.004 平面擴散膜	1221	1388	1259	68	1445
	1648	1795	1682		
	1302	1434	1280		
	1436	1348	1452		
0.0182 平面擴散膜	1895	1788	1945	69	1571
	1451	1365	1464		

5. 模擬結果分析比較

就單在各外形工作受照面的照度均勻度比較表如表 11 與出光角圖如圖 14 來看, 在加入平面擴散膜 CH28T, 平面導光板與曲率 0.004 之多弧板其導光板幾乎重疊, 會有此結果應是曲率的波峰與波谷的高度落差不太, 使得在工作受照面 400mm 之照度均勻度相當接近, 曲率 0.0182 之多弧狀導光板, 雖然波峰與波谷的高度有明顯的差異, 但照度的均勻度亦有在 69% 左右, 其亮度也相對提升了, 從分析結果得知, 我們只要能將多弧狀導光板微結構進行優化調整之後, 相信就可使多弧狀導光板有很好的出光均勻性, 曲率較大之多弧狀導光板未來可嘗試改變 V-Cut 的角度, 找出適宜角度應用在多弧狀導光板上; 而在弧狀導光板之部分雖然在加入擴散膜 CH28T 之後沒有達照明手冊規定均勻性, 但更換擴散膜 D 122 即能符合

規範之要求。藉由本研究之實驗模擬分析結果說明, 在不同外形之導光板亦需要搭配較適宜之擴散板, 才能讓導光板的出光更為均勻, 在此亦證實了導光板外形的變化, 並搭配 V-Cut 角度的特徵確實可以使得照度均勻度, 我們從各外形工作受照面的光型圖如表 12 來看, 平面導光板及曲率 0.004 的多弧導光板的配光曲線較為滑順, 未來可將凹弧導光板及曲率 0.0182 的多弧導光板再進行最佳化, 使其配光曲線更為滑順, 並且期待能使其符合 JIS C 8112 檯燈規範與照明手冊中照度均勻度規範。

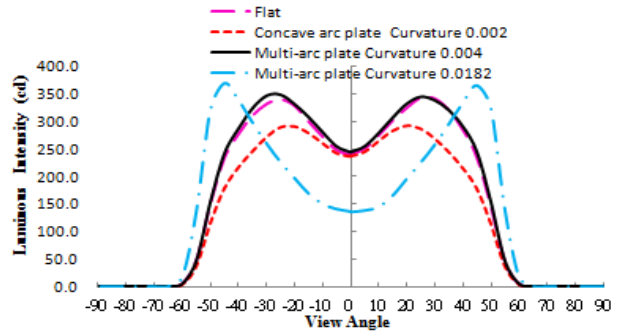
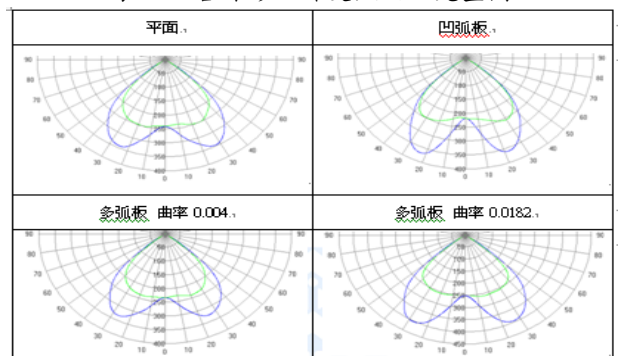


圖 14 各外形出光角圖

表 11 各外形在受照面照度均勻度比較表

外形	受照面中央 500mm x 500mm 之九點照度 (單位: lux)			照度均勻度 (%)
平板	1238	1358	1284	71
	1633	1744	1606	
	1228	1442	1260	
凹弧板	1251	1468	1314	70.4
	1767	1733	1776	
	1331	1469	1302	
多弧板 曲率 0.004	1221	1388	1259	68
	1648	1795	1682	
	1302	1434	1280	
多弧板 曲率 0.0182	1436	1348	1452	69
	1895	1788	1945	
	1451	1365	1464	

表 12 各外形工作受照面之光型圖



6. 結論

本研究分析導光特徵與導光板彎曲對出光特性的影響，至於多彎曲導光板尚未經最佳化的論證結果，本實驗亦缺乏實作的運用，建議未來可將其實驗結果實際運用於實作上，以達到更有利的驗證，並使得設定的實驗數據能更廣範應用於照明模組上而並非侷限在桌燈的照明上，也期待能設計出符合現今的節能減碳又兼具造型美觀的產品。

本實驗針對所作之導光板各種外形模擬分析其結果都需加入擴散膜才能達到較佳之均勻性，未來將可嘗試改變導光板之外形不加入擴散膜就能達到照明的規範，並且可應用在不同照明領域上。

7. 參考文獻

- [1] 黃中騰，光學擴散片之雙向散射分佈函數 ABg 模型與量測之研究，國立高雄應用科技大學，碩士論文，高雄，台灣，2008。葉秀軒，以檯燈設計為實例之發光二極體照明分析，國立清華大學，碩士論文，新竹，台灣，2008。
- [2] Japanese Standards Association ,Japanese Industrial Standard –JIS C 8112 Table study lamps for fluorescent lamps, 2008.
- [3] 葉秀軒，以檯燈設計為實例之發光二極體照明分析，國立清華大學，碩士論文，新竹，台灣，2008。
- [4] 徐可芳、林志偉、黃忠民、王玫丹，LED 燈具蝙蝠翼型光形與燈具配置關係，綠色科技工程與應用研討會(GTEA)，頁 393-396，2013。

distribution is preferred. This study applies TracePro simulation to identify the optimum coupling feature as the concave isosceles v cuts with vertex angle of 120° . To simplify the optimization design, the size distribution of v cuts on the light guide plate is first parameterized as a line graph with anchor points selected at the peaks and valleys of the illuminance distribution. The v-cut sizes at the anchors with illuminance peaks are reduced, and those with illumination valleys are increased. A linear distribution of the V-cut size between anchor points is introduced to achieve uniform illumination. This study also introduces orthogonal v cuts on the light exiting surface of the light guide, and varies the lead angles to divert the emitting light toward user side to improve lighting efficiency. The simulation results show that the proposed concave curved light guide plate design with a diffusive sheet not only meets the AA requirement of JIS C 8112 but also the illumination uniformity of 70%. To avoid the light decay due to aging of diffusive sheets, we also propose a wavy design of light guide. The initial investigation shows that the wavy design improves illumination uniformity and a great potential to achieve the lighting requirement using an integrated light guide without the use of diffuser.

Keywords : Edge-lit light guide、Curved light guide、Wavy light guide、TracePro, LED lighting

Optical Simulation and Analysis of curved LED Edge-lit Light Guide Plate for Desk Lamp Applications

Lung-Chang Lin, Jyh-Cheng Yu*

Department of Mechanical and
Automation Engineering
National Kaohsiung First University of
science and Technology

*Email: jcyu@nkfust.edu.tw

Abstract

This thesis addresses the optical design of curved LED edge-lit guide plate for desk lamp applications. V cuts are used as the optical coupling features for light guides. The angles, the distribution of V cuts, and the curvature of the light guide are varied to satisfy the lighting requirements of desk lamps. The light guides apply dual edge lit LEDs. To improve illumination uniformity, a bat-wing pattern of luminous intensity