

## 彎曲導光柱特徵設計與曲率對其導光特性的影響

劉世強、陳致堯、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

本文探討 LED 側光式彎曲導光柱的設計，分析導光特徵與導光柱曲率對出光特性的影響。並藉由 V-cut 導光特徵角度、分佈、與厚度變化的設計，提升出光的均勻性。本研究以 TracePro 光學模擬軟體，分析典型的單側入光導光柱其 V-cut 特徵角度與出光方向的關係，以求得最佳的集中光強度出光特性。進而探討導光柱曲率對出光角度的影響；並分析彎曲處的內外側出光不對稱的現象，提出以內外側的厚度變化，改善其內外側出光對稱性，並提升正面導光的效率，最後藉由特徵的大小分佈，達到彎曲導光柱均勻出光的目的。

關鍵字：LED 側光式車尾燈、導光柱、曲面導光、TracePro、出光均勻性

### 1. 簡介

因環保節能的意識抬頭與 LED (Light Emitting Diode) 的技術的進步，帶來了新一代燈具設計的改革，而這股風潮也早已影響到科用照明，大部分的車廠也嘗試以 LED 取代傳統白熾燈泡，尤其是車尾燈與方向警示燈的部分，但多採用直下式 LED 排列設計[1][2]，為達到整面均勻面出光的目的，必須使用數量相當多的 LED 排列，因而造成無謂的電力耗損。另一方面由於 LED 光指向性強，會導致後方駕駛者有眩光的問題，不僅增加車輛設計上的成本，也相對受影響車燈的美觀與外型，這都是車燈照明設計需要考量重要因素[3][4][5]。

為改善此些問題，已經有車廠將車尾燈製作成條狀的導光柱如圖 1 所示，此方法減少了 LED 的數量使用，避免不必要的耗能，也減少了成本。LED 燈源可置於單側或兩側，藉由導光柱上的微結構將光導引出光，但是這種側光式導光柱常會有亮暗不均的情形產生，尤其在彎曲處內外側出光不均勻和側面漏光的問題更為嚴重，這是彎曲導光元件在應用時所面臨的最大挑戰。

典型的車尾燈導光柱設計，大多利用圓柱結構或 V-cut 大小來控制出光的均勻性，Matthias 和 Steffen[7] 提出控制 V-cut 三角形的導角  $\alpha$ 、 $\beta$  來控制光的行進方向，如圖 2 所示。現有文獻多集中在車尾燈應用設計專利的發表[8][9]，並未探討導光柱特徵參數與分佈的設計。而一般導光柱採用等間距的特徵分佈，使得大部分的光線集中在靠近 LED 的地方，而離光源較遠的地方則明顯較暗，均勻性差，雖可採用特徵的疏密分佈[10]

或特徵的大小改變，或雙側光源來改善出光分佈，但在彎曲部分內外側出光不對稱的問題，並未提出解決方案。

本文將對於曲面所導致出光不均的問題做一個探討，並分析不同入光面的設計搭配微結構的影響、V-cut 的導角度的出光特性，並針對如何改善彎曲處內外亮暗不對稱與導光柱出光均勻性提出改善方案



圖 1 LED 導光柱車尾燈[6]

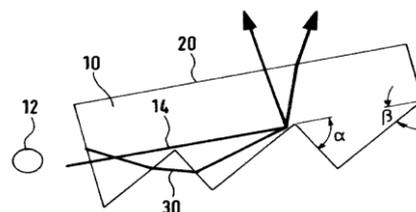


圖 2 側光式導光柱設計[7]

### 2. 模型建構與出光角度分析

本研究主要探討的導光柱微結構為 V-cut，並以 Pro-ENGINEER 5.0 的作為 3D 建模軟體，此軟體在曲面特徵分佈的處理較為方便。首先分析頂角為  $90^\circ$  之 V-cut 左右導角對出光分佈的影響。利用 TracePro 的光強度分佈圖來找出最佳的 V-cut 導角，以提升正軸向光強度，進而作為導光柱後續出光均勻分佈的基準特徵。

初始設計 V-cut 以單純的左右對稱導角，結構為  $0.6\text{ mm}$  的以  $1.4\text{ mm}$  等週期分佈，V-cut 左右導角為  $45^\circ$ ，其模擬結果如圖 3 所示 6，出光強度較為分散，主要峰值呈現  $-70^\circ$  和  $-19^\circ$  偏角。本文利用 V-cut 左右導角  $\alpha$  與  $\beta$  的改變如圖 4 所示，來調整導光柱的出光方向，使光能盡量往軸向集中。在實驗中使用的結構角度符號

註記為  $\alpha$ LED $\beta$ ， $\alpha$  較為靠近 LED 光源端， $\beta$  較為遠離 LED 端，並分析 V-cut 導角改變的影響。

由基本光折射與反射原理，可得導角的調整公式如公式(1)， $\beta_0$  為原本的右導角， $\theta$  為原光強度峰值的偏角， $\beta_a$  為調整後之角度。在此初始導角為  $45^\circ$ ，由圖 3 中可看出主峰值的偏角  $\theta = -19^\circ$ ，調整後的右角度  $\beta_a$  約為  $53^\circ$ ，其調整後 37LED53 之光強度角度分布模擬結果如圖 5 所示，可以發現其出光角度都往中央集中而且軸向光強度也從原本的 2.2 提升至 3.2cd。

$$\beta_a = \beta_0 + (\theta/2) \quad (1)$$

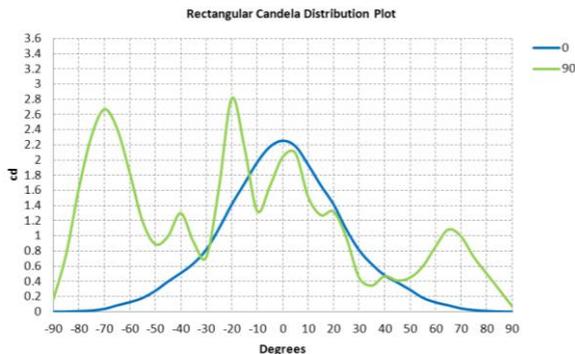


圖 3 導光柱  $45^\circ$  等腰 V-cut 光強度分布圖

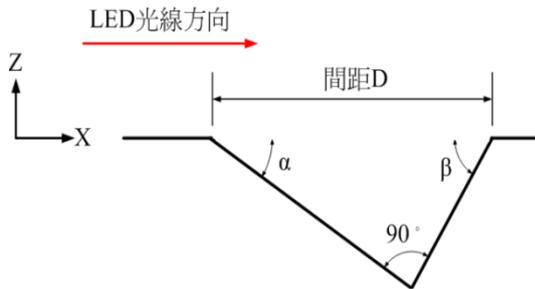


圖 4 V-cut 結構導角示意圖

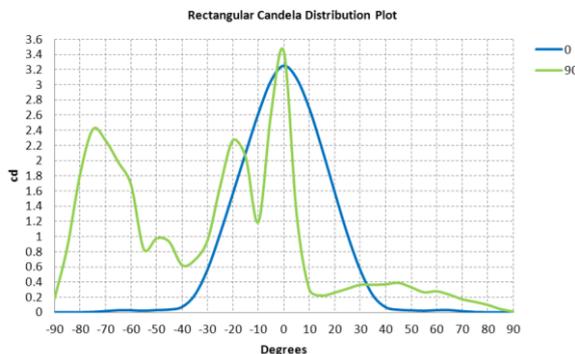


圖 5 V-cut 導角調整後 37LED53 之光強度分布圖

### 3. 曲率對導光柱正面導光率的影響

導光柱曲率將會影響導光效率，過大的曲率將會使光線在彎曲處非預期的出光，本節將分析無特徵導光柱側面曲率變化對導光的影響；再探討在導光柱上加入 V-cut 後，側面曲率對其正面導光效率的關係。

#### 3.1. 側面曲率對導光的影響

本研究設計了 4 種與導光面平行 (X-Y 面) 不同曲率的導光柱實體模型，曲率分別為 0, 0.01, 0.02, 0.05，曲率  $\rho$  與平面彎曲半徑  $r$  間的關係如式(2)

$$\rho = \frac{1}{r} \quad (2)$$

導光柱長 150 mm、寬 20 mm 厚度 4 mm，材質為 PMMA，導光柱前方設有兩個  $30^\circ$  出光角 LED，比較入射光通量與導引至導光柱尾端的光通量間的差異，作為判斷不同曲率的導光損失。從圖 6 的模擬顯示在曲率小於 0.02 的導光柱，LED 光線進入導光柱後，大多以全反射路徑行進到尾端出光，光損失約為 2~5%，但隨著曲率的增加為 0.05 時，在彎曲處有明顯的漏光情形，光損失達 24%。整理曲率與出光比例之間的關係如圖 8 所示，可看出曲率大於 0.02 時漏光比例有明顯向上增加的趨勢。

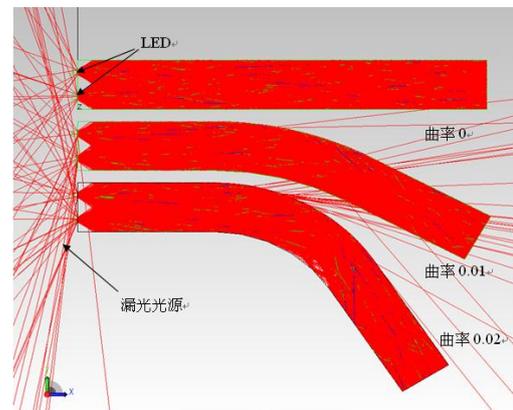


圖 6 X-Y 面曲率小於 0.02 時的導光柱光軌跡圖

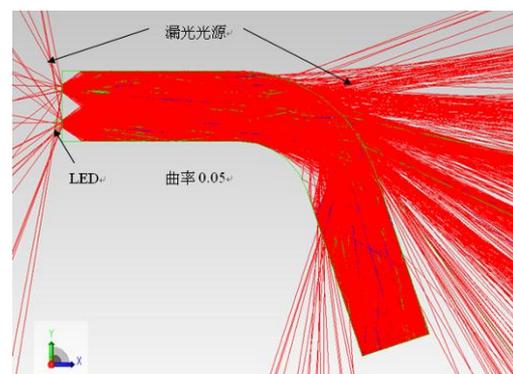


圖 7 導光柱 X-Y 面曲率 0.05 時彎曲處的出光現象

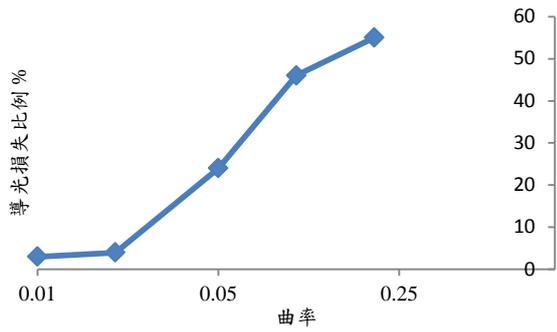


圖 8 導光柱平面曲率與光損失比例關係

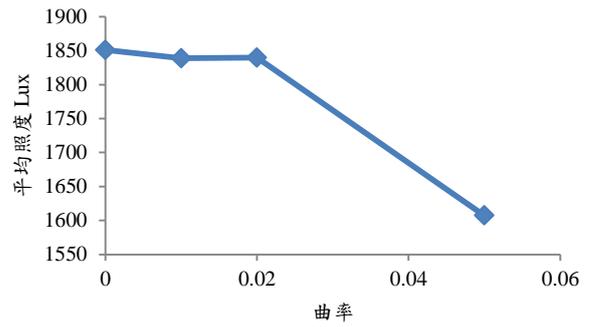


圖 10 導光柱正面平均照度與曲率間的關係

### 3.2. 導光柱正面出光與曲率的關係

在導光柱底面加上 v-cut 微特徵後，將會導引光線從正面出光，本研究分析三種不同平面曲率(0.01、0.02、0.05) 導光柱，特徵結構 V-cut 頂角  $90^\circ$ ，左右導角分別為  $37^\circ$  與  $53^\circ$  如圖 9 所示，探討對於不同曲率導光柱的出光特性。觀察面設置在每條導光柱前方 1 mm 處，LED 燈源為 2 顆  $30^\circ$  出光角 LED，導光柱下方及其尾端設為 Mirror 的反射面特性，觀察其正面出光情形，其觀察面平均照度與曲率間的關係如圖 10 所示。平均照度在曲率小於 0.02 時並沒有明顯改變，但當曲率為 0.05 時，導光柱正面出光的平均照度從 1840 下降到 1607 lux，下降比例達 13%，部分光線在彎曲處從側面出光。

雖然導光柱曲率在小於 0.02 時，在彎曲處出光的比例不大，正面平均照度與直線導光柱差異不大，但從圖 11 可以看出，目前等間距的 V-cut 分布使得出光集中於靠近光源端，出光在彎曲後明顯在下降，這未來雖可藉由調整特徵尺寸或分布疏密來均勻化，但在彎曲處卻可看出內外側的出光確有明顯不對稱的問題，觀察面外側的光強度明顯比內側來的高很多。

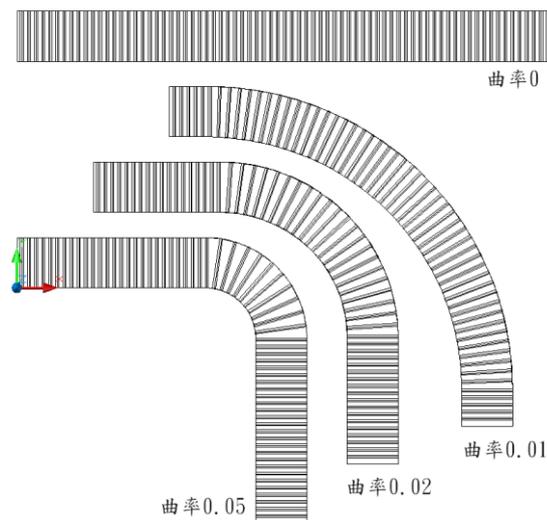


圖 9 X-Y 平面導光柱模組示意圖

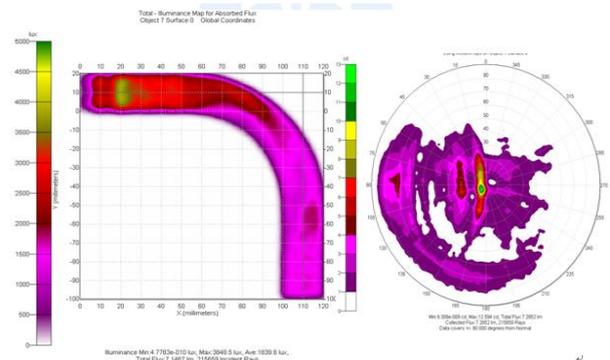


圖 11 曲率 0.02 之出光照度圖

### 4. 改善彎曲處內外側出光對稱性

圖 12 為均一厚度(4 mm) 曲率為 0.02 的導光柱的照度分布圖，如同圖 11 可看出導光柱光線到達彎曲處的時候，多聚集在導光柱外側；為了改善內外側亮度不均的情形，本文提出調整內外側厚度比如圖 13 所示，外側高度  $H_1$ ，內側高度  $H_2$ ，藉由降低內側的高度，使光線往較薄的地方行進，以改善內外側亮度不均的情形。導光柱外側高度為  $H_1$ ，而在彎曲中央內側厚度  $H_2$  設定  $cH_1$ ，倍率  $c$  為 1, 0.75, 0.5, 0.375，其厚薄變化實體模型如圖 14 所示。

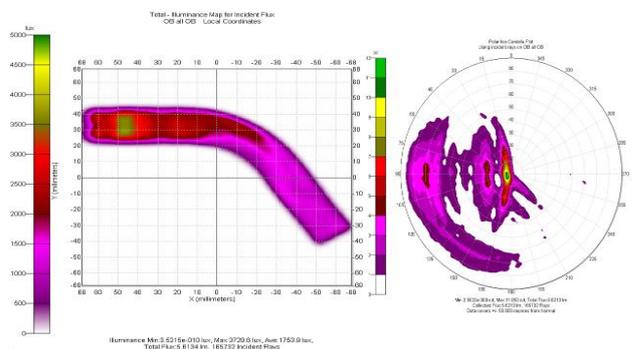


圖 12  $H_1=4$  mm,  $H_2=4$  mm 導光柱照度圖

本文再以三種不同基準厚度(5, 4, 3 mm)配合不同內外側厚度比，分析導光柱出光平均照度關係如圖 15 所示，可明顯發現降低基準厚度將有助於提升平均

照度，再則隨著內外側厚度比的下降，平均照度也會因而提升。圖 16 比較彎曲導光柱內外側平均照度的關係，隨著內外側厚度比下降其內外側的平均照度越接近於 1，代表內外側出光越均勻。綜合以上兩點可以得知，厚度改變和內側削薄有助於彎曲段內外側出光均勻性和整體平均照度的提升，但由於目前導光柱為單一特徵為均勻分布，出光集中於光柱前端，為提升整體出光均勻性，可以分區變化分布特徵間距的方式[11]或特徵大小的方式來達到均勻化的目的。

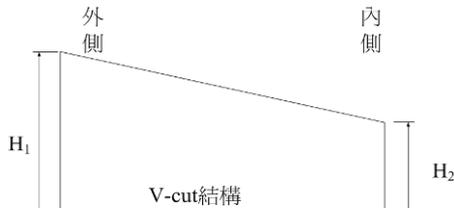


圖 13 導光柱厚薄變化示意圖

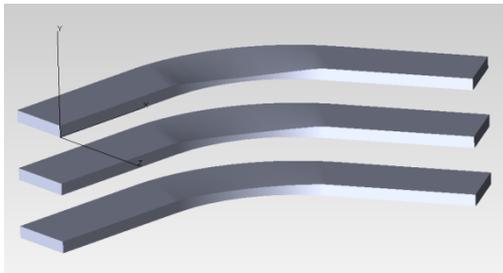


圖 14 導光柱厚薄變化實體模型

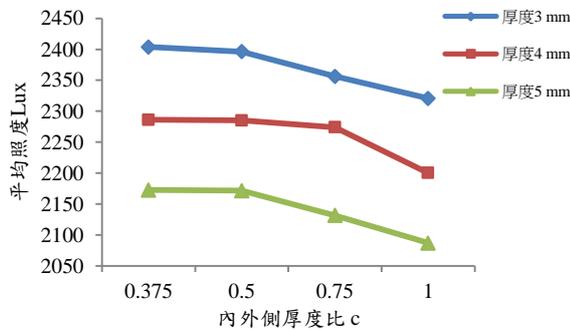


圖 15 導光柱厚薄變化之平均照度

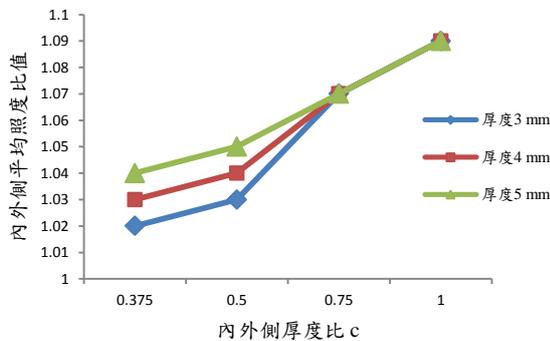


圖 16 導光柱厚薄變化之內外側平均照度比值

圖 17 為內側削薄等間距導光柱之照度圖，此種內側削薄的方式由外側  $H_1=3\text{mm}$ ，和外側乘上倍率 0.375 之較薄內測之中央  $H_2=1.125\text{mm}$  搭配而成，具有較高的平均照度之外，另也改善其彎曲段內側較暗的情形，但還是有不少光線無法到達尾端的情況。

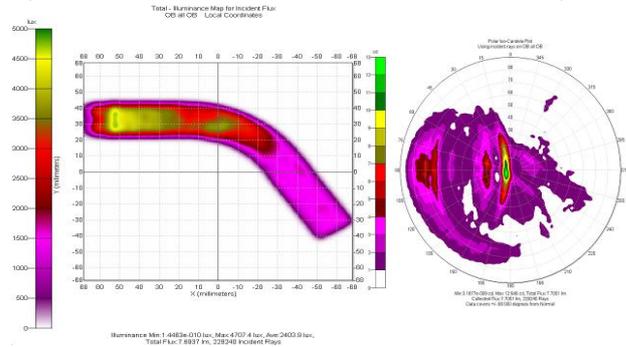


圖 17  $H_1=3\text{mm}$ ， $H_2=1.125\text{mm}$  等間距導光柱照度圖

### 5. 導光柱出光均勻性改善

為改善整體導光柱的出光均勻性，本文採用分區變化分布特徵大小的方式，先將整條導光柱分成 3 個區域，分別為頭、尾 2 直段及中間 1 彎曲段，因彎曲段影響較大，再將彎曲段分為 3 段，全部共 5 段，藉由 5 段分別除以整體平均照度之比值來控制每一段內特徵大小，經幾次優化後其結果為圖 18，可以明顯看出差異，整體照度均勻不少，不少光線也較能到達末端。

最後將模擬的結果圖 12 無厚薄變化、圖 17 厚薄變化、圖 18 厚薄變化之優化以數字呈現平均照度與 RMS 均方根值，如表 1 所示，其中 RMS 值在做厚薄變更後提升不少，雖然平均照度也跟著提升，但是均勻性卻下降所導致，經幾次優化後逐漸下降至 79.0；另外平均照度雖然在做厚薄變化後提升，但是在優化後卻又下降，不過還是優於原本的無厚薄變化，厚薄變化之優化結果比起無厚薄變化提升了平均照度及均勻性。

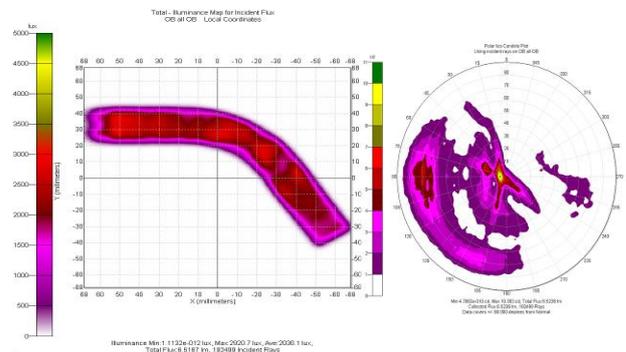


圖 18  $H_1=3\text{mm}$ ， $H_2=1.125\text{mm}$  優化後導光柱照度圖

表 1 各個導光柱之模擬結果

	平均照(lux)	RMS 值(lux)
無厚薄變化	1753.9	307.6
厚薄變化	2403.9	813.9
厚薄變化之優化	2036.1	79.0

## 6. 結論

本文探討 LED 側光式導光柱的設計，分析導光特徵與導光柱曲率對出光特性的影響。先以平行直條的導光柱為初步設計，分析出最適合導光柱的參數如 LED 與 V-cut 角度，使用 Pro-E 3D 繪圖軟體在曲面上建製 V-cut 三角形結構，然後調整其三角形角度，並搭配 TracePro 光學模擬軟體分析其出光特性。

使用成熟的 V-cut 設計與側光式導光柱技術，應用於曲面導光設計，並控制 V-cut 角度來調整導光柱的出光方向，搭配出光角 30° LED 與業界常用 Mirror 鏡面底部反射特徵為最佳的設計組合。

當彎曲處曲率為 0.02 的時候，開始有漏光的情形產生，到了曲率 0.05 時更為嚴重，光線以由彎曲段出光，導致亮度和出光比例的下降，為了改善此情形可在外側加上反射段面，使光往回打。還有一方法就是本文對於彎曲處內外側亮度不均的現象，藉由改變整體導光柱厚薄變化使光線往內側行進，提升了內側的亮度，有效的改善的彎曲處亮暗不均的情形，以及分區變化分布特徵大小的方式，使整條導光柱出光能得到較佳的照度和均勻性。

## 7. 參考文獻

- [1] Hsu, H. M., 2008, "Exterior Surface Configuration Of Vehicle Rear Light", US Patent D567972S.
- [2] Lin, B., 2005, "Vehicle Rear Light", US Patent D506557S.
- [3] Lin, Y. C., 2007, "Exterior Surface Configuration Of A Vehicle Rear Light", US Patent D550870S.
- [4] Pfeiffer, P., 2009, "Taillight For a Vehicle", US Patent D590526S.
- [5] Weil, C., 2009, "Taillight For a Vehicle", US Patent D605793S.
- [6] 車訊網, "BMW Concept M5 原型現身", <http://www.carnews.com/>.
- [7] Gebauer, M., Wiersdorff, S., 2009 "Lighting Mechanism", US Patent 7494257B2.
- [8] Shinohara, M., Aoyama, S., 2009, "Surface Light Source Device Elements Therefor And Apparatus Using The Same", US Patent 7494257B2.
- [9] Jin, G., Yan, Y., Fan, S., "High quality light guide plates that can control the illumination angle based

on microprism structures", Applied Physics Letters, vol. 85, no. 24, December 2004.

- [10] Yu, J. and Hsu, P.-K., 2009, "Integration of Stamper Fabrication and Design Optimization of LCD Light Guides Using Silicon-based Microfeatures", Microsystem Technologies, Vol. 16, Issue 7 (2010), pp. 1193-1200.
- [11] 陳嘉豪、劉世強、余志成, 車尾燈 LED 側光式導光條的設計, 中國機械工程學會第二十八屆全國學術研討會論文集, 新興科技類, E 10-019, 高雄, 台灣, 2011。

## Analysis of Geometric Features of Light Bar for the Application of Automotive Lighting

Shih-Chiang Liu, Zhi-Yao Chen, Jyh-Cheng Yu\*

Department of Mechanical and  
Automation Engineering

National Kaohsiung First University of  
science and Technology

\*Email: [jcyu@nkfust.edu.tw](mailto:jcyu@nkfust.edu.tw)

### Abstract

This study investigates the design of curved light bar using edge-lit LED, and analyzes the influence of light guide features and component curvature to the optical characteristics. The angles and the distribution of the V-cut on the different thickness of light bar are varied to satisfy the requirements of the illumination uniformity. This research applies the light tracing software, TracePro to simulate the optical characteristics of a simple light bar, and analyze the relation between the lead angles of the V-cut and the Candela angular distribution to achieve the optimum axial luminous intensity. The light guiding and illumination uniformity are key issues for curved light guide bars. This study investigates the influence of light bar curvature to the distribution of emitting luminance. The illuminance difference between the inside and the outside of the curved section of a light bar is reduced by varying the inside and the outside thickness of light bar. Finally, this study proposed an optimization scheme to vary the size of an even distributed V-cuts of a sample curved light bar to achieve a uniform illuminance.

**Keywords:** LED edge-lit, Light bar, Tail light, Curved light guide, TracePro, Illuminance uniformity