

側入光垂直彎曲導光條的光學設計與分析

高榜德、林士凱、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 側入光式彎曲導光條的設計，分析出光特性因彎曲所產生的影響，調整 V-cut 角度，以改變導光條出光角度，提升導光條的輝度均勻性。利用 TracePro 光學模擬軟體分析彎曲導光條在彎曲時的光耦合效率，找出曲率與導光效率的關係，並應用於具有微結構之彎曲導光條設計。為改變 LED 光形，本文以楔形導光管，改變 LED 光強分佈角度，以增加彎曲導光條之出光效率。另外針對彎曲導光條的微結構，探討導光條垂直彎曲方向對於微結構出光之影響，並透過微結構角度變化，配合導光條的主功能觀察面，提升整體彎曲導光條的觀測輝度均勻性。

關鍵字：LED 側入光式導光、彎曲光耦合、彎曲導光、TracePro

1. 簡介

LED 其具有壽命長、低耗電量等優點，已成為主要的照明燈源，近來廣泛的被應用在照明燈具的設計上，主要分為反射式、直下式、混合式、導光式等四類，前三者容易有眩光、高指向性等問題，而導光式則沒前述問題但易有導光不均的現象。LED 導光技術應用於顯示裝置已是成熟的技術[1]，藉由分佈在薄板上的微特徵控制出光的位置，將線光源轉變形成平面光源，來達到均勻出光的效果，其出光特性受到特徵幾何形狀影響[2]。

側光式導光技術應用於車用側光導光元件如晝行燈等，其外觀隨車輛外型而會有彎曲的外型，當元件彎曲後會產生一些問題，像是漏光、出光效率不佳等問題，如何能達成均勻出光、降低漏光因素和提升出光效率成為側光導光元件的設計重點。

V-cut 為典型的導光特徵，單側入光時 V-cut 對稱設計在出光會有偏向一側的現象，專利設計[13]提出控制微結構 V-cut 角度的方式，使主要光強度於觀測方向出光如圖 1，微結構的角度主要影響導光條出光角度，調整微結構的 α 角與 β 角使光源能夠以觀測方向出光，並控制微結構高度以調整導光條出光量，對於不同角度的 V-cut 統一以 α LED β 來表示。部分整合式導光板相關之文獻研究改變微結構角度的方式，來控制出光特性[3][4]。Leclercq[8]利用側面導光原理，在導光條兩側設置 LED 燈源並藉由導光條的光學特徵使導光條發光，並避免眩光的問題，但在導光條前後兩端有亮度不均的問題，且導光條曲線化的設計更增

加出光均勻化的困難度。現有彎曲較大之導光條的車燈設計，在彎曲段不使其出光，改以光傳導作用降低光損失[9]。Van Derlofskel 與 Hough [9]提出以不同入光面的形狀影響出光的位置，在直段與直段間有個夾角的彎曲，此種導光條不須特徵結構就具有破壞光線行進的功能。

本研究將分析彎曲導光條的截面形狀、彎曲曲率和彎曲角度對於其耦合效率的影響，並以最佳彎曲設計參數，探討其出光光形與微結構角度建議設計，最後將建議設計套入一垂直彎曲導光條以驗證設計之正確性。

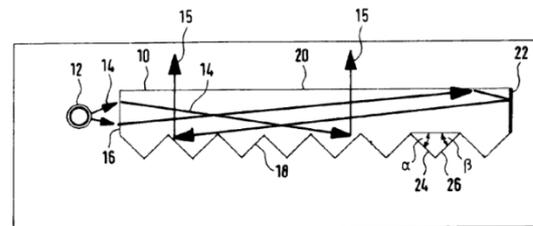


圖 1 導光條 V-cut 設計示意圖[13]

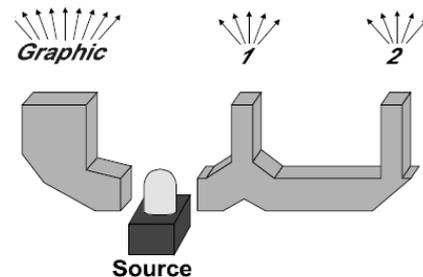


圖 2 不同方式的彎曲導光柱設計[10]

2. 導光條垂直彎曲對耦合效率的影響

彎曲導光條常見的彎曲方向有兩種，分別為垂直方向彎曲和水平方向彎曲，當導光條彎曲軸向與觀測方向垂直為垂直彎曲，若彎曲軸向與觀測方向在同一軸向上，則為平面彎曲。本研究針對垂直彎曲導光條將光線由光源入光處傳遞至尾端的耦合效率進行探討。彎曲導光條的彎曲角度、彎曲曲率、厚度皆是影響耦合效率的因素，針對這些因素分析其對於耦合效率的影響，實驗參數：彎曲曲率 ρ 分別為 0.01、0.02、0.05、0.1、0.15、0.2、0.4；導光條厚度 t 分別為 3 mm、4 mm、5 mm；彎曲角度 θ 以 45°為主，導光條總長度

為 90 mm，轉彎段前後皆有直段導光條以減少光線入光時產生多餘的漏光情形。

2.1. 矩形截面

矩形截面導光條垂直彎曲模組如圖 3 所示，導光條彎曲方向繞 Z 軸彎曲，而觀察面則在 Y 軸方向，判斷在不同參數下導光條的耦合效率。

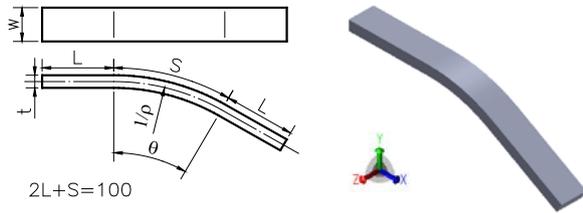


圖 3 垂直彎曲矩形導光條模型設計圖

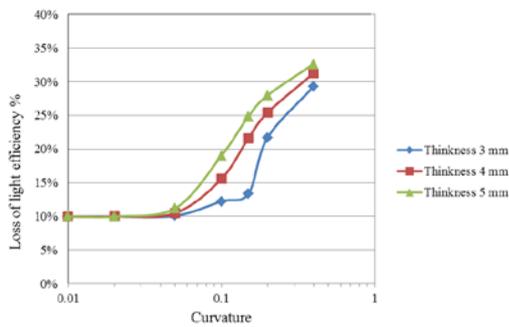


圖 4 矩形導光條彎曲角度 45° 光損失曲線圖

模擬結果如圖 4 所示，當彎曲曲率大於 0.05 時，導光條所損失的耦合效率會逐漸地提升，而在同彎曲曲率下，其厚度越厚損失的耦合效率則越多；在同厚度下，彎曲角度越大損失的耦合效率則越多。導光條的彎曲曲率在 0.05 以下時，導光條損失的耦合效率穩定在約 10%。

2.2. 圓形截面

圓形截面彎曲導光條模組如圖 5 所示，導光條直徑 ϕ 分別為 6 mm、8 mm、10 mm，因圓形截面導光條直徑尺寸較大，無法繪製出彎曲曲率 0.4，其最大曲率為 0.2。

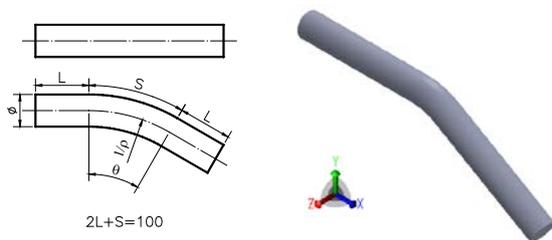


圖 5 彎曲圓形導光條模型設計圖

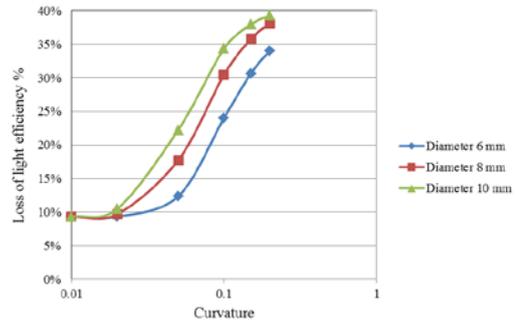


圖 6 圓形導光條彎曲角度 45° 光損失曲線圖

其模擬結果如、圖 6，當導光條彎曲曲率大於 0.02 後耦合效率的損失會開始提高，在相同彎曲曲率下，導光條直徑越大耦合效率的損失越多；在同直徑下，彎曲角度越大耦合效率的損失就越多。在不同的厚度、寬度與直徑下，尺寸越大越容易使耦合效率的損失提高，但在彎曲曲率建議上限之下時，對於耦合效率的影響則會降低。因此圓形截面彎曲導光條的彎曲曲率建議上限為 0.02。

3. 導光條幾何設計的光學分析

3.1. 矩形導光管之設計

目前在光學導光元件上，所使用的光源主要以 120° LED 為主，無法將全部的光源做有效的利用，文獻中提出改變導光條外側的角度能夠使光源集中 [5]，但矩形導光管因厚度的限制，無法改變垂直方向的夾角角度，僅能改變導光管水平方向的夾角角度，使水平方向光線集中增加其發光強度如圖 7，導光管入光入光面尺寸與 LED 之尺寸相同，導光管長度 5 mm。結果如圖 8，水平夾角為 30° 時光線往中心集中、提高主峰值，當夾角為 60° 時光線集光效果消失，其光線半強度角與未改變水平夾角之矩形導光管相近。

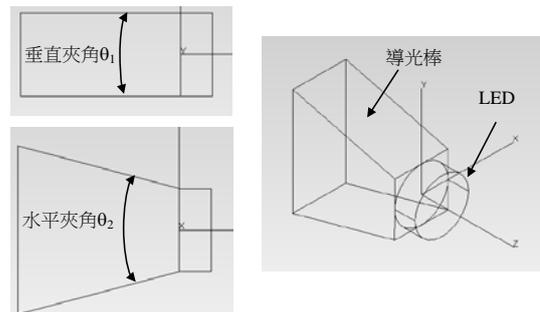


圖 7 矩形導光管模型示意圖

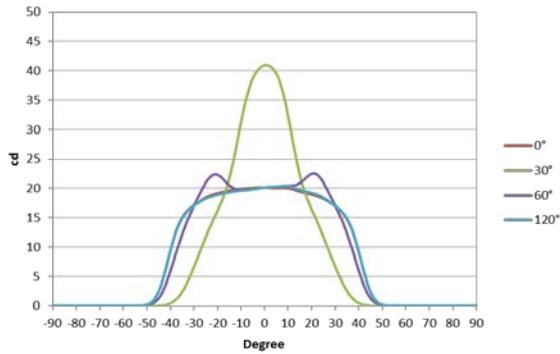
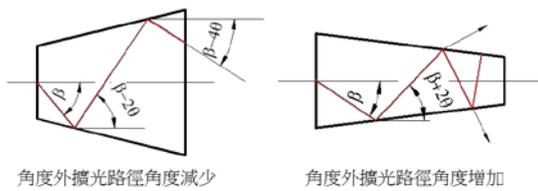


圖 8 矩形導光直管水平夾角變化出光角度圖

導光管尺寸因角度改變時，光線傳遞角度亦會跟著改變。當光線進入夾角外擴之導光管時，光線每經由外側反射回內管時光線角度會減少 20° ，光線反射次數越多光線角度越往 0° 角集中；光線進入夾角內縮之導光管時，光線經由外側反射回內管時光線角度會增加 20° ，當光線角度與外側夾角大於全反射角時，光線會開始從外側漏光、降低效率，光線反射路徑如圖 9 所示。



角度外擴光路徑角度減少 角度外擴光路徑角度增加
圖 9 光路徑角度改變圖

3.2. 導光管應用於彎曲導光條

垂直彎曲導光條使用 36LED54 微結構，出光效率為 32% (圖 10)，與水平方向 30° 夾角之導光管結合後，出光效率提升至 40% (圖 11)，效率提高約 8%。因此在垂直彎曲導光條上使用水平方向 30° 夾角之導光管將水平方向之光線集中，可有效的提高導光條出光效率。

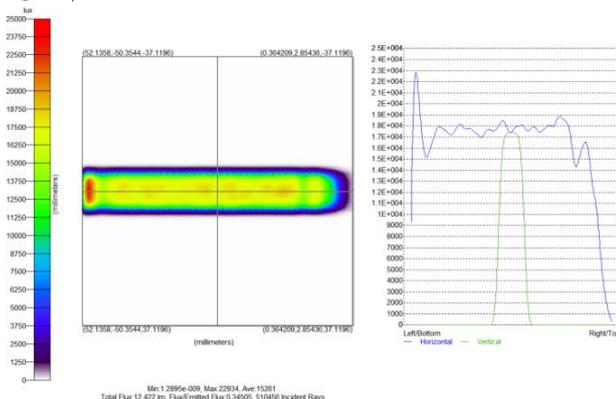


圖 10 未加導光管之垂直彎曲導光條照度圖

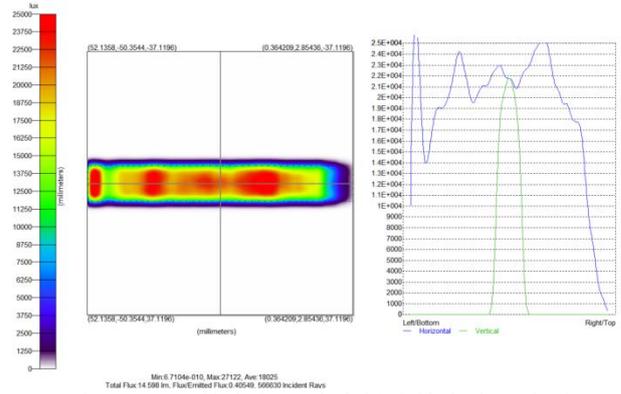


圖 11 加上導光管之垂直彎曲導光條照度圖

4. 導光條彎曲對出光光形的影響

導光條經彎曲後，其出光光形會受到彎曲曲率的影響，而非以主要觀測方向出光，將探討導光條彎曲後出光光形所受之影響與其出光光形的調整方法，其微結構角度的建議設計。

4.1. 垂直彎曲

垂直彎曲導光條應用於產品端所使用的彎曲曲率大多都非常的小，分析模組上彎曲曲率使用 0.01、厚度為 3 mm、寬度為 10 mm、彎曲角度則使用 30° 如圖 12，而觀察面則設在距離導光條中心法線方向 5 mm 處，並在距離導光條 0.5 mm 處設置 6 個小觀察面，將導光條分為六等分來觀察各角度範圍內的出光光形，如圖 13。

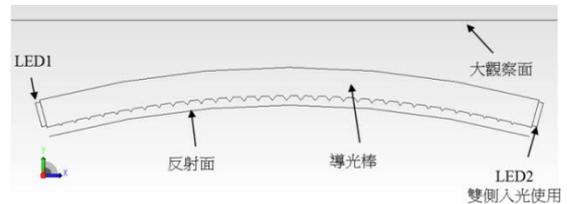


圖 12 垂直彎曲導光條模組示意圖

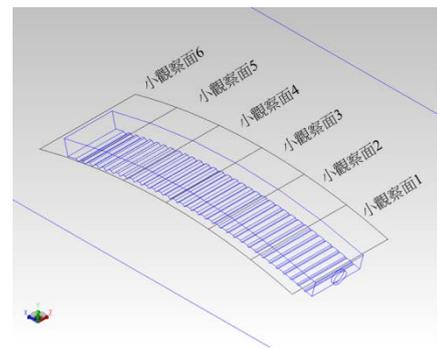


圖 13 垂直彎曲導光條小觀察面示意圖

4.1.1. 單側入光

為分析單側入光之導光條出光光形，微結構使用 36LED54 結構分布，其頂角固定為 90° ，各小觀察面所觀測之主峰角如圖 14、圖 15。大部分的光線出光方向偏向一側，而在各個小觀察面與觀察面之間的夾

角越大偏角幅度愈大，利用微結構角度調整公式調整如公式(1)，並以線性變化改變微結構角度後結果如圖 16、圖 17，光線主峰角出光方向集中於主要觀測方向出光，且從各小觀察面之主峰角可驗證光線主峰角已調整至主要觀測方向。但當導光條彎曲角度大於 45° 時，則難以將較大彎曲角度之光線調整至主要觀測方向出光。

$$\beta_1 = \beta_0 + (\theta/2) \quad (1)$$

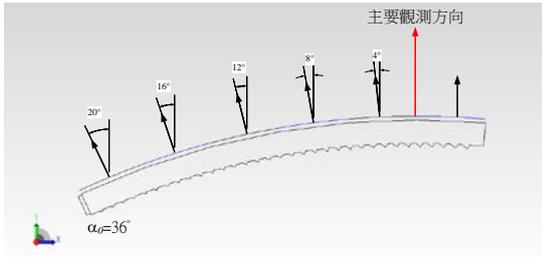


圖 14 各小觀察面主峰角出光結果

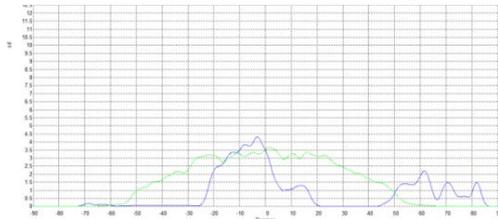


圖 15 觀察面所得之微結構出光角度圖

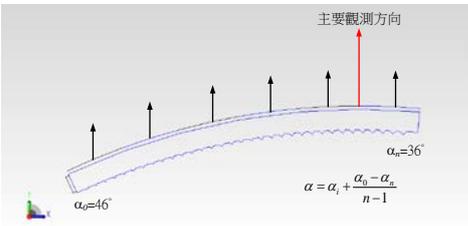


圖 16 微結構角度調整後小觀察面主峰角出光結果

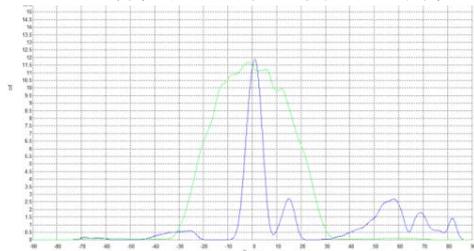


圖 17 改變微結構角度後之角度圖

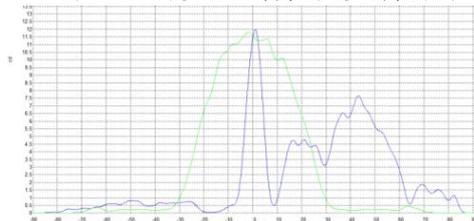


圖 18 加上反射面之角度圖

經調整過微結構角度之導光條使用反射面後所產生的右側區塊光源(圖 18)，以導光條出光角度判

斷，從導光條尾端可見其出光，若應用於車用警示燈，可於側邊看見導光條所折射出之光行，以作為側邊警示作用，因此若應用於車用警示燈 LED 如圖 19 的方式放置。但當導光條彎曲角度大於 45° 時，則難以將較大彎曲角度之光線調整至 0° 角出光。

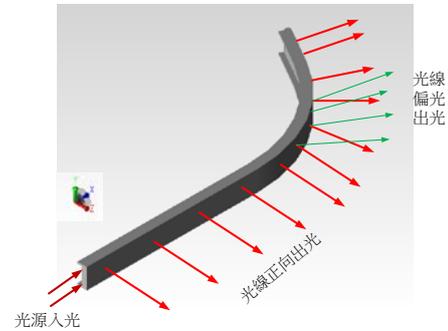


圖 19 單側入光導光條應用於車用警示燈示意圖

4.1.2. 雙側入光

分析雙側入光之垂直彎曲導光條所使用的微結構角度為 50LED50，頂角固定為 80°，其出光角度如圖 20、圖 21，因光源從兩側入光，出光光形為左右對稱之光形，角度主要集中在 ±10 度內，光線出光角度主要以法線方向出光會與主要觀測方向呈一夾角，透過微結構角度調整公式(公式(1))調整角度可使導光條出光光形集中往主要觀測方向出光，如圖 22、圖 23。

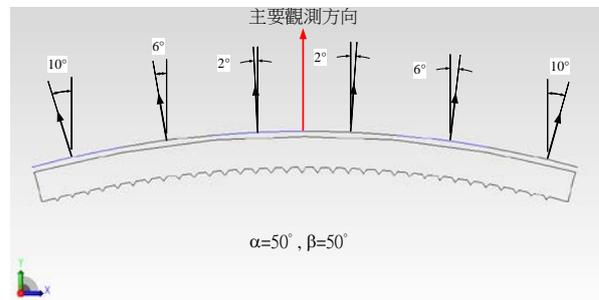


圖 20 各小觀察面主峰角出光結果

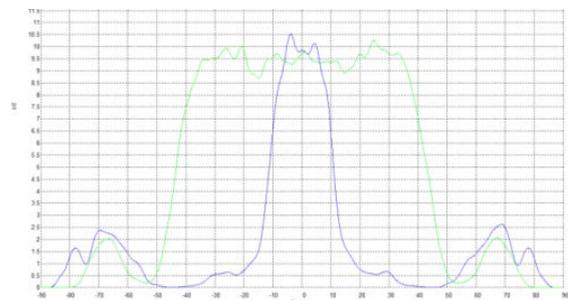


圖 21 50LED50 微結構出光角度圖

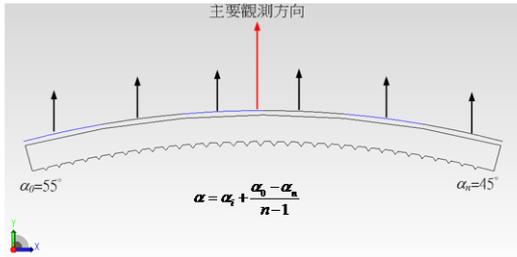


圖 22 角度調整後小觀察面出光結果

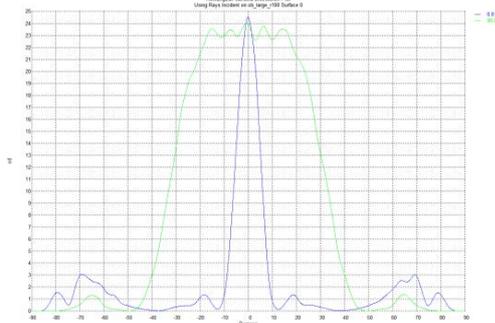


圖 23 角度調整後出光角度圖

5. 垂直彎曲導光條設計應用

垂直彎曲導光條應用於車用燈源時，以車尾燈、警示燈為主，目前大多以直下式加上擴散板作為發光燈源，將利用一側入光式導光原理設計此垂直彎曲導光條之模組，如圖 24、圖 25 所示。

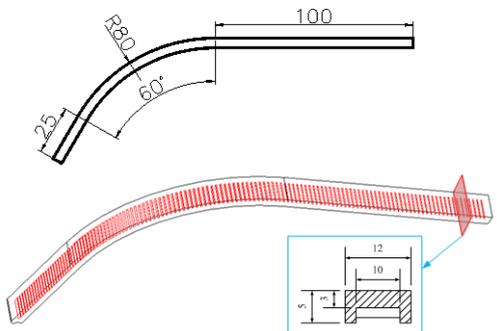


圖 24 垂直彎曲導光條模組尺寸圖

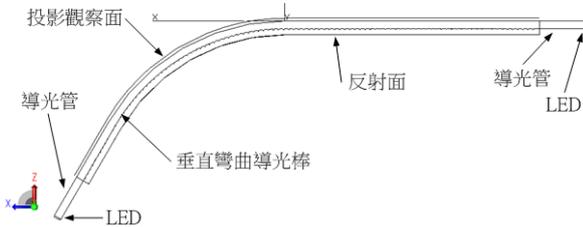


圖 25 垂直彎曲導光條分析模組示意圖

因垂直彎曲導光條彎曲後的微結構角度變化有一限制，在單側入光時彎曲角度超過 45°後微結構無法成形，微結構角度過小時則難以加工且對於光線角度的導正效果不佳，而限制微結構最小角度後會導致較尾端之光源難以集中至主要觀察方向如圖 26，為解決此問題垂直彎曲導光條改以雙側入光作為光源，以

減少微結構角度過小而難以加工之問題，並透過調整微結構角度將垂直彎曲導光條彎曲段的出光角度調整至主要觀察方向如圖 27，微結構最小限制角度為 20LED80，若微結構角度再小則難以加工，因角度的限制使部分光線無法調整至主要觀察方向出光，且當導光條彎曲角度大於 55°後，出光方向逐漸偏移，因此將導光條彎曲角度 55°後之微結構皆以 20LED80 分佈，而開始彎曲處之微結構則以角度線性變化方向分佈至彎曲角度 55°，與調整前相比，已使大部分光源集中至主要觀察方向，整體的主峰值由原本的 61 cd 提升至 87 cd，提升了 30%。透過改變微結構高度以改善導光條出光照度均勻性如圖 28，其 RMSE 從 7552.7 降至 3535.5 下降約 53.2%，如圖 29 所示。

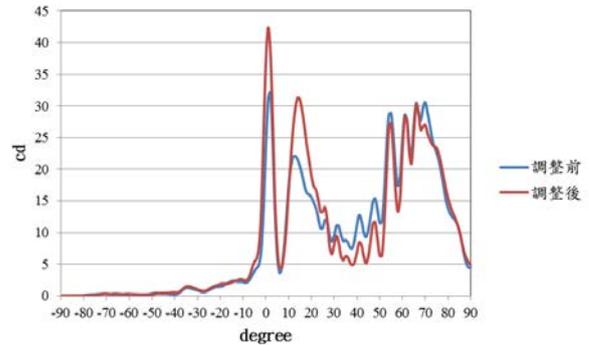


圖 26 導光條模組單側入光出光角度圖

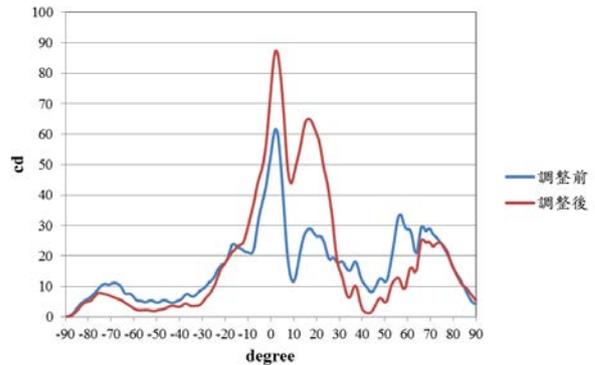


圖 27 導光條模組雙側入光出光角度圖

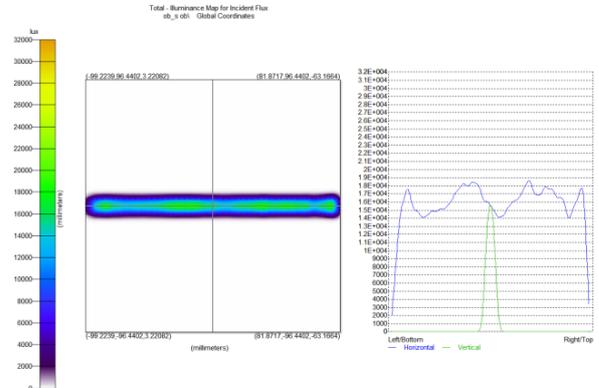


圖 28 彎曲導光條優化後投影照度圖

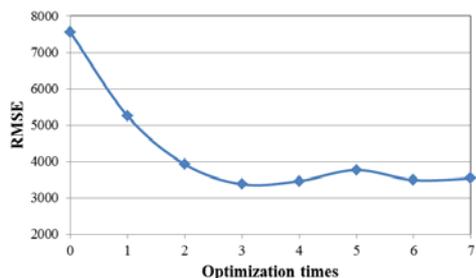


圖 29 彎曲導光條優化 RMSE 變化圖

導光條輝度觀測位置如圖 30，輝度觀測視角與矩形飾環相同如圖 31，其結果如表 1。可發現觀測點 1~3 的輝度值在視點 0° 時最大，在此三個觀測點的主峰角在主要觀測方向出光，因此在此視點角度下的輝度值則為最大；在觀測點 4 與 5 的輝度值在視點 -15° 時最大，因導光條彎曲段的主要出光方向無法全部以主要觀測方向出光，而使光線有偏移的現象產生，且觀測面 5 在尾端直管上，因此與其他視點角度相比之下，在視點 -15° 時的輝度值會比其他視點角度來的大。

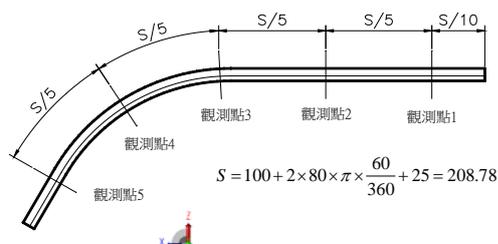


圖 30 輝度觀測點位置示意圖

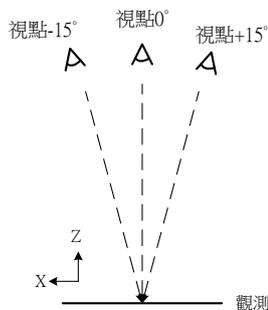


圖 31 輝度觀測點視點角度示意圖

表 1 垂直彎曲導光條輝度量測值

視點角度	觀測點 1	觀測點 2	觀測點 3	觀測點 4	觀測點 5	平均
+15 度	116.91	12603	2711.3	42401	95312	30629
0 度	2268.8	64678	78443	44630	86400	55284
-15 度	6.933	39659	1605.9	95500	144000	56154

單位：nit(cd/m²)

6. 結論

本研究探討導光條彎曲時光線自導光條漏光與彎曲對於微結構出光特性的影響分析。透過控制導光條彎曲曲率減少導光條漏光量，當彎曲曲率小於 0.02

時，導光條耦合效率的損失量可抑制在 10 % 左右。光源為單側入光與雙側入光時，根據小觀察面所得的出光光形並使用角度調整公式調整各小觀察面之微結構出光角度，可使光形集中於主要觀測方向，但難以將彎曲角度大於 45° 之微結構出光角度調整至 0° 角。

參考文獻

- [1] 余志成、陳宗男、張簡少棠，“以矽基蝕刻角錐特徵進行 LED 側光整合是導光板的最佳化設計”，中國機械工程學會第二十六屆全國學術研討會，D15-019，台南，台灣，2009。
- [2] Rosemann, A., Mossman, M., Whitehead, L., “Development of a cost-effective solar illumination system to bring natural light into the building core”, Solar Energy, Vol. 82, pp. 302 – 310, 2008.
- [3] Shinohana, M. and Aoyama, S., “Surface light source device, elements therefor and apparatus using the SAME”, US pattern 6231200, 2001.
- [4] Feng, D., Jin, G., Yan, Y., and Fan, S., “High quality light guide plates that can control the illumination angle based on micropism structures”, Applied Physics Letters, Volume 85, Issue 24, 2004.
- [5] Whang, J.-W., Li, P.-C., Chen, Y.-Y., Hsieh, S.-L., “Guiding Light From LED Array Via Tapered Light Pipe for Illumination Systems Design”, Journal of Display Technology, Vol.5, No.3, p104 – 108, 2009.
- [6] Yu, J., Zhangjian, S.-T., and Chen, Z.-N., “Design of Integrated Light Guiding Plates Using Silicon-based Micro-Features,” Proceedings of the 10th International Conference on Automation Technology, Tainan, Taiwan, 2009.
- [7] Yu, J., Chen, Z.-Y. “Optical Design and Analysis of Planar Curved LED Edge-lit Light Bar.” Optics & Photonics Taiwan International Conference (OPTIC 2013), Chung-Li, Taiwan, 2013, NSC 101-2221-E-327-007.
- [8] Leclercq, P., “Surface Configuration Of A Taillight For A Vehicle”, US Patent D552769S, 2007.
- [9] Taleb-Bendiab, A., Sharma, M. N., Stadtherr, D. L., “Dual-direction light pipe for automotive lighting”, US Patent 8333493 B2, 2012.
- [10] Van Derlofske1, J. F., Hough, T. A., “Flux Propagation in Light Pipes: Further Development of the Flux Confinement Diagram”, Proc. of SPIE, Vol. 5529, 2004.
- [11] 陳致堯、高榜德、余志成，“平面彎曲 LED 側入光式導光柱的光學設計與最佳化”，中國機械工程學會第三十屆全國學術研討會，宜蘭大學，台灣，2013。
- [12] Yu, J.C., Chen, Z.Y., Kao, B.D., “Optical design and optimization of planarcurved LED end-lit light bar”, APPLIED OPTICS, Vol. 53, No. 29, 2014.
- [13] Gebauer, M., Wiersdorff, S., 2009, “Lighting Mechanism”, US Patent 7494257B2.

Optical design and Analysis of vertical curve for LED Edge-lit Light Bar

Bang-De Kao, Shin-Kai 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 study investigates the optical design of LED edge-lit curved light guide bar. We start from analyzing the influence of light guide features and component curvature to the optical characteristics, and control the lead of V-cut to change emitting direction of peak intensity. This research applies the optical simulation software, TracePro to analyze the coupling efficiency of curved light guide pipe to analyze the limit of the curvature of the bar. We apply the result to the light guide bar with v-cut to analyze the optical efficiency. For the optical characteristics of curved light guide pipe with light sources at one and both ends, we control the lead angles of v-cut to improve the efficiency and uniformity of luminance. The designs of automotive auxiliary light and taillight are presented to illustrate the proposed optimization scheme.

Keywords: Energy saving light, Light bar, Curved light guide, LED edge-lit light guide, TracePro.