

創新節能窗之設計探討

A study on high thermal-performance window design

李訓谷* 成淑君** 吳上源*** 謝恩倉****

一、前言

現今世界各國為了解決氣候變遷與地球暖化問題，皆投注大量人力與物力進行解決之道的研究發展。由於建築能耗佔一個國家的全國總能耗的比例相當大，例如美國的建築能耗大約佔美國總能耗 40%，台灣大約為 30%，中國大約 25%。因此，降低建築能耗與都市熱島效應之策略已成為全世界關注的重點。對於降低建築能耗之策略除了提高建築設備的能源使用效率（例如：使用高能源效率的空調、照明設備等）外，另一發展重點為降低建築外殼能耗。降低建築外殼能耗的方法大約可分為使用高性能隔熱建材與開口部外遮陽設計。其中高性能隔熱建材之廣泛使用對於建材產業發展具有相當大的幫助。再者，相關建材產業亦結合學術界積極投入高性能節能建材之開發，例如：相變化材料(Phase Change Material, PCM)、變色智慧玻璃、冷屋頂材料等。

目前在台灣的綠建材標章中僅在高性能的隔音與節能玻璃兩項與窗戶有關，其中有 16 項隔音窗以及 3 項節能玻璃通過標章。因著政府相關部門在綠建材標章法令與推行之努力，致使隔音窗之普及率提升。然而，即便現今窗戶材料應用與設計在隔音與節能上已較過去優越，但是為了能降低建築物的能耗而達到淨零能耗建築(Net Zero Energy Building, NZEB)之目標，研究更節能且對環境永續之窗戶的發展是必要的。因此，本文利用 eQuest 建築耗能動態模擬軟體，針對節能窗開發之各項參數進行窗戶熱得的評估，期使能從研究中獲得節能窗設計開發的元件或構件性能之關鍵指標。

二、世界各國節能窗之標章與法規發展

窗戶在建築物節能的影響上可區分為遮陽效能與隔熱效能兩方面。所謂遮陽效能係指玻璃阻擋太陽輻射進入室內之部分，其評估指標為日射取得係數(Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)。隔熱效能是指熱能經熱傳導、對流方式穿透窗戶進入室內之部分，其評估指標為熱穿透係數-U 值。另外，玻璃的可見光穿透率亦是影響建築物能源消耗的主要參數。對於常年都有冷房負載的台灣而言，SHGC 是影響建築耗能最重要的參數；較低的 SHGC 代表越能抵擋太陽熱能進入室內，有效降低空調能源消耗。窗戶建材對於建築物節能影響之評估，世界各國（如美國、德國、日本與大陸）亦清楚

* 國立成功大學能源科技與策略研究中心 助理研究教授

** 高雄市立中正高級工業學校 建築科專任教師

*** 財團法人基督教中華信望愛基金會 建築師

**** 南亞塑膠工業股份有限公司 塑膠第二事業部 經理室 組長

明訂節能門窗的法規和規範。以美國為例，美國自第一次能源危機後即正視建築物能耗問題，在 1988 年訂定國際能源管理法(IECC)，揭示建築物有效利用能源之設計、建造標準以及規範建築物的建材與設備能耗與效率。有關節能門窗的相關規範在 IECC 第 303.1.3 條款中要求，門窗產品必須依照 NFRC 100 與 NFRC 200 規範測試門窗產品的 U 值與 SHGC 值。並且在第 402.1.1 條款中將美國區分為 8 個不同氣候分區，依照建築物外殼、門窗、天窗、天花板等構件，規定門窗產品的標示性能必須相關的節能性能要求。表 1 為各國窗戶之隔熱性能規範。

除了上述世界各國窗戶之法規外，目前美國[1]、英國[2]、澳洲、歐盟[3]各國以及台灣[4]均設有相關節能標章（詳見表 2）獎勵消費者多使用此類節能窗戶或玻璃以節省能源。美國、加拿大以及台灣的節能標章是屬於認證標章(Endorsement label)，英國、歐盟與澳洲的節能標章是屬於分級標章(Comparative label)，另外如美國 NFRC 的節能門窗認證制度則為性能標章(Informative label)，僅提供受測門窗建材相關之性能數據。再者，目前美國能源之星、英國以及日本各國政府均有提供獎勵措施，獎勵消費者多使用隔熱建材以節省能源。例如：日本在 2009 年推行住宅 eco-point 措施[5]，透過補助方式獎勵消費者能對新建或既有建築物改造採用包含隔熱建材、節能門窗等 6 項建材。美國在 2009 年提出的「美國復甦與再投資法案」(American Recovery and Reinvestment Act of 2009, ARRA)中規定在 2009~2010 年間一般民眾購買經過能源之星認證之節能門窗等設備可獲得產品售價 30%(最高 1500 美元)補助。

表 1 各國窗戶 U 值之規範

國家	窗戶 U 值規範	國家	窗戶 U 值規範
瑞典（南部）	2.0	日本（東京）	6.5
德國	1.5	中國（北京）	2.8
英國	3.3	中國（上海）	4.7
加拿大	2.86	中國（廣州）	6.5
美國（邁阿密）	3.8	台灣	-

表 2 各國節能窗（玻璃）評定制度

國家	標章名稱	評定等級
美國	Energy Star	核定標章
歐盟	European Window Energy Rating System (EWERS)	A-G 七等級
英國	BFRC Rating System	A-G 七等級
加拿大	Canadian Energy Star	核定標章
澳洲	Window Energy Rating Scheme (WERS)	0~10 顆星（級距：半顆星） <ul style="list-style-type: none"> ■ Heating Star ■ Cooling Star

紐西蘭	Window Efficiency Rating System (WERS)	0~5 顆星 (級距：半顆星) ■ Heating Star ■ Cooling Star
台灣	高性能節能玻璃綠建材	核定標章

從上述之各國有關窗戶部位的節能法規與推動政策可知，目前台灣僅在高性能節能玻璃綠建材標章中列出節能玻璃之評定基準，對於窗戶部位之隔熱與遮陽性能並未有相關規範。有鑑於此，台灣於 2011 年由內政部營建署研擬「提升建築物節約能源指標管制效益草案」，針對建築外殼節能法規修訂內容草案。其中在「外殼節能評定基準」中外殼平均熱傳透率 U 值由原 3.5 修正至 2.0；而窗戶節能性能之規範初步擬定各種立面開窗率範圍之窗平均熱傳透率 U 值與遮陽係數。其中窗部位平均熱傳透率 U 值與立面開窗率有關，即開窗率越大，窗平均熱傳透率 U 值需越低(窗框+玻璃)，反之亦然。另一方面，由於窗框的隔熱有助於節能，為了考慮窗框的隔熱性能，以窗框+玻璃的加權熱傳透率代表窗部位平均熱傳透率，其計算如下：

$$\text{窗部位平均熱傳透率 U 值} = \text{玻璃的 U 值} \times 0.8 + \text{窗框的 U 值} \times 0.2 \quad (1)$$

表 3 台灣提升建築物節約能源指標管制效益草案 (外殼節能)

海拔高度	外牆平均傳透率 基準值 U_{wmax} ($W/(m^2 \cdot K)$)	立面開窗率 >0.5		0.5 ≥ 立面開窗率 >0.4		0.4 ≥ 立面開窗率 >0.3		0.3 ≥ 立面開窗率 >0.2		0.2 ≥ 立面開窗率	
		窗平均 熱傳透 率	窗平均 遮陽係 數	窗平均 熱傳透 率	窗平均 遮陽係 數	窗平均 熱傳透 率	窗平均 遮陽係 數	窗平均 熱傳透 率	窗平均 遮陽係 數	窗平均 熱傳透 率	窗平均 遮陽係 數
住宿類建築	2.0	2.7	0.10	3.0	0.15	3.5	0.25	4.7	0.35	6.5	0.55
其他各類建築	2.0	2.7	0.20	3.0	0.30	3.5	0.40	4.7	0.50	6.5	0.60

註 1：窗平均熱傳透率 6.5 為普通玻璃、4.7 為膠合玻璃、3.0 為乾燥空氣中空玻璃、2.5 為惰性空氣中空玻璃
 註 2：窗在無外遮陽之下，平均遮陽效率即為日射透過率 η ，0.6 為 6mm 綠色單層玻璃，0.3 為雙銀 LOW-E 玻璃；但採用外遮陽，則可以放寬玻璃日射透過率 η 之要求
 說明：因應行政院對建築隔熱之要求，規定建築外牆、開窗之隔熱與遮陽之最低標準。

三、節能窗設計參數

(1) 玻璃選用

窗戶的遮陽性能是影響台灣建築物窗戶熱得的最主要因素，因此本文首先選用 7 種玻璃建材，以高雄地區的氣候條件為模擬環境探討玻璃的遮陽性能對整體窗戶熱得之影響性。表 4 為本文所探討 7 種玻璃建材之遮陽與隔熱性能。

(2) 框材的選用

對於影響窗戶之節能效果除了玻璃的遮陽性能，另外一個重要的參數即

為窗戶的隔熱性能。因此本文進一步探討窗框材料對窗戶整體隔熱性能之影響。目前常用的窗框材料有鋁合金非斷熱型材、鋁合金斷熱型材、鋁木複合型材、塑鋼型材等，甚至新的高隔熱窗框材料[6] (例如：玻璃纖維增強聚氨酯拉擠型材)亦被開發應用；然而不同窗框的熱傳導係數會導致整體窗戶部位 U 值的差異，使用隔熱性能較差之窗框可能造成整體窗戶部位的 U 值無法滿足法規之要求。本文選定目前最常用的鋁合金與塑鋼框材搭配各式玻璃，探討窗戶部位之 U 值以及對窗戶部位熱得之影響。下表為本文所選取兩種不同窗框搭配 36 種各式玻璃之相關熱傳性質。在表中，窗框的面積佔窗戶總面積的 20%。窗戶部位平均傳透率 $U_i = \text{窗框 } U \text{ 值} \times 0.2 + \text{玻璃 } U \text{ 值} \times 0.8$

表 4 玻璃建材之遮陽與隔熱性能

編號	玻璃組成	SC	可見光 穿透率	太陽輻射 穿透率
G1	3mm 清玻璃	0.92	0.90	0.834
G2	6mm 綠玻璃	0.66	0.757	0.443
G3	6mm 茶玻璃	0.69	0.533	0.486
G4	6mm 灰玻璃	0.67	0.465	0.453
G5	雙層清玻璃 (6mm+12mmAir+6mm)	0.81	0.781	0.604
G6	雙層綠玻璃 (6mm+12mmAir+6mm)	0.58	0.664	0.379
G7	雙層 Low-E 玻璃 (6mmE ₂ =0.4+12mmAir+ 6mm 清)	0.48	0.682	0.343

表 5 窗框材料與窗戶之 U 值

窗框「w/(m ² -k)」		玻璃 (數字代表厚度 mm)	玻璃熱傳透率 U _i 「w/(m ² -k)」	窗戶總熱傳透率 U _i 「w/(m ² -k)」 (窗部位平均傳透率)		
塑鋼 窗框	鋁 窗框			塑鋼窗	鋁窗	
U _i =1.4	U _i =3.5	單層玻璃	3	6.31	5.33	5.75
			5	6.21	5.25	5.67
			6	6.16	5.21	5.63
			8	6.07	5.14	5.56
			10	5.97	5.06	5.48
			12	5.88	4.98	5.40
			15	5.75	4.88	5.30
		19	5.59	4.75	5.17	
		雙層玻璃 (乾燥空 氣層)	3+A6+3	3.31	2.93	3.35
			5+A6+5	3.25	2.88	3.30
			6+A6+6	3.23	2.86	3.28
			8+A6+8	3.17	2.82	3.24
			10+A6+10	3.12	2.78	3.20
		雙層玻璃 (惰性氣 體層)	3+Aig6+3	2.62	2.38	2.80
			5+Aig6+5	2.58	2.34	2.76
			6+Aig6+6	2.56	2.33	2.75
			8+Aig6+8	2.52	2.30	2.72

			10+Aig6+10	2.48	2.26	2.68		
			12+Aig6+12	2.44	1.95	2.65		
		雙層玻璃 (惰性氣體層)	3+Aig12+3	1.93	1.82	2.24		
			5+Aig12+5	1.90	1.80	2.22		
			6+Aig12+6	1.89	1.79	2.21		
			8+Aig12+8	1.86	1.77	2.19		
			10+Aig12+10	1.83	1.74	2.16		
			12+Aig12+12	1.80	1.72	2.14		
			雙層玻璃 (乾燥空氣層)	3+A12+3	3.10	2.76	3.18	
		5+A12+5		3.05	2.72	3.14		
		6+A12+6		3.03	2.70	3.12		
		8+A12+8		2.98	2.66	3.08		
		10+A12+10		2.94	2.63	3.05		
		12+A12+12		2.90	2.60	3.02		
		膠合玻璃	5+隔熱膜+5	4.92	4.22	4.64		
			6+隔熱膜+6	4.88	4.18	4.60		
			8+隔熱膜+8	4.71	4.05	4.47		
		玻璃磚	8+A6~A8+8	2.98	2.66	3.08		
		註：窗部位平均傳透率 $U_i = \text{窗框 } U \text{ 值} \times 0.2 + \text{玻璃 } U \text{ 值} \times 0.8$						

四、結果與討論

玻璃遮陽性能與隔熱性能對於窗戶熱得之影響如圖 1 所示。改變玻璃的顏色主要是影響穿透窗戶之熱量。3mm 清玻璃換成 6mm 綠玻璃，太陽輻射穿透熱減少 50.3%；但是傳導熱會因為深色玻璃吸收率較高而增加大約 35%，總體會減少 19.3%的窗戶熱得。至於更換成雙層玻璃，因為雙層玻璃的遮陽性能與隔熱性能均較單層玻璃高，故穿透之太陽輻射熱與傳導熱均降低。以替換雙層 Low-E 玻璃為例，穿透之太陽輻射熱減少 62.6%，傳導熱減少 40.9%，整體窗戶熱得減少 54.7%。

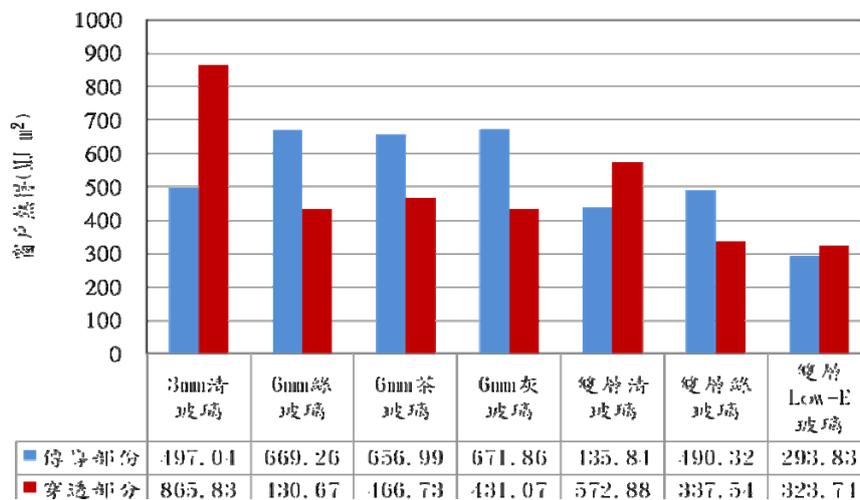


圖1 玻璃材料對窗戶熱得之影響

對於窗框的隔熱性能對窗戶部位熱得之影響上，由表 5 可知，採用鋁框與塑鋼窗對於窗戶部位之 U 值影響相當大。以窗戶部位之要求 U 值=5.2W/m²-K 為例，鋁框必須搭配 19mm 的單層玻璃；塑鋼框僅需搭配 8mm 的單層玻璃。因此

就成本分析而言，目前鋁框與窗框之成本大約相同，但在相同 U 值之規格限制下，鋁框窗戶因須採用隔熱效果較好的玻璃，導致鋁框窗戶之成本大於塑鋼框窗戶之成本。綜上所述，吾人得知使用低成本且高隔熱性能的窗框是符合庶民經濟與達成節能減碳目標之節能窗設計方向。

不同窗框材料對於單位面積窗戶部位傳導熱得的影響如表 6 所示。採用較低 U 值之窗戶，造成窗戶傳導熱得較少，最終對於建築外殼節能效益亦能提升。從模擬結果可看出在台灣的氣候條件下，隔熱性能好的窗框在搭配隔熱性能好的玻璃的情況下，窗框隔熱性能對於建築外殼之節能效益越加明顯。在不同窗框搭配單層玻璃之案例中，塑鋼窗之窗戶單位面積傳導熱得平均比鋁窗框減少 6%；而在雙層玻璃的案例中，採用塑鋼窗框的節能效益較鋁窗框的節能效益提升 10% 以上。

表6窗框搭配各式玻璃對窗戶熱得之影響

玻璃 (數字代表厚度 mm)	玻璃熱傳 透率 U_i 「w/(m ² -k)」	窗戶總熱傳透率 U_i (W/m ² -k) (窗部位平均傳透率)		窗戶單位面積 傳導熱得 (MJ/m ²)		窗框熱 得差異	
		塑鋼窗	鋁窗	塑鋼窗	鋁窗	%	
單層 玻璃	3	6.31	5.33	5.75	366.06	387.84	5.62
	5	6.21	5.25	5.67	361.89	383.75	5.70
	6	6.16	5.21	5.63	359.77	381.69	5.74
	8	6.07	5.14	5.56	356.13	378.19	5.83
	10	5.97	5.06	5.48	351.56	373.79	5.95
	12	5.88	4.98	5.40	347.81	370.24	6.06
	15	5.75	4.88	5.30	341.94	364.57	6.21
	19	5.59	4.75	5.17	335.05	357.94	6.39
雙層玻 璃(乾燥 空氣層)	3+A6+3	3.31	2.93	3.35	224.96	252.07	10.76
	5+A6+5	3.25	2.88	3.30	221.60	248.12	10.69
	6+A6+6	3.23	2.86	3.28	222.77	247.19	9.88
	8+A6+8	3.17	2.82	3.24	219.98	244.40	9.99
	10+A6+10	3.12	2.78	3.20	217.65	242.08	10.09
	12+A6+12	3.07	2.74	3.16	215.33	239.75	10.19
雙層 玻璃 (惰性 氣體層)	3+Aig6+3	2.62	2.38	2.80	194.40	218.82	11.16
	5+Aig6+5	2.58	2.34	2.76	192.54	216.96	11.26
	6+Aig6+6	2.56	2.33	2.75	191.61	216.03	11.30
	8+Aig6+8	2.52	2.30	2.72	189.74	214.17	11.40
	10+Aig6+10	2.48	2.26	2.68	187.88	212.31	11.50
	12+Aig6+12	2.44	1.95	2.65	169.74	210.44	19.34
雙層玻 璃(惰性 氣體層)	3+Aig12+3	1.93	1.82	2.24	162.30	186.72	13.08
	5+Aig12+5	1.90	1.80	2.22	160.90	185.33	13.18
	6+Aig12+6	1.89	1.79	2.21	160.44	184.86	13.21
	8+Aig12+8	1.86	1.77	2.19	159.04	183.47	13.31
	10+Aig12+10	1.83	1.74	2.16	157.65	182.07	13.41
	12+Aig12+12	1.80	1.72	2.14	156.25	180.67	13.52
雙層玻 璃(乾燥 空氣層)	3+A12+3	3.10	2.76	3.18	216.72	241.14	10.13
	5+A12+5	3.05	2.72	3.14	214.40	238.82	10.23
	6+A12+6	3.03	2.70	3.12	213.47	237.89	10.27
	8+A12+8	2.98	2.66	3.08	211.14	235.56	10.37
	10+A12+10	2.94	2.63	3.05	209.28	233.70	10.45
	12+A12+12	2.90	2.60	3.02	207.42	231.84	10.53

膠合玻璃	5+隔熱膜+5	4.92	4.22	4.64	301.38	325.80	7.50
	6+隔熱膜+6	4.88	4.18	4.60	299.52	323.94	7.54
	8+隔熱膜+8	4.71	4.05	4.47	291.61	316.04	7.73
玻璃磚	8+A6~A8+8	2.98	2.66	3.08	211.14	235.56	10.37

另一方面，本文進一步探討不同窗戶型式因其窗框與玻璃比例不同，而對建築物的節能效益之影響。本文採用目前市面上常見的塑鋼固定窗、塑鋼橫拉窗與塑鋼推開窗三種，尺寸為高 1.3 公尺、寬 0.9 公尺，玻璃為 3mm 清玻璃。而三者的玻璃與窗框所佔面積比例分別為固定窗：玻璃 77.66%，窗框 22.34%；推開窗：玻璃 61.57%，窗框 38.43%；橫拉窗：玻璃 60.37%，窗框 39.63%，其中以固定窗窗框所佔的比例最低。至於三種型態窗戶之 U 值係依據式(1)代入所占面積比例求得三者之 U 值分別為 5.21 W/m²-k(固定窗)、4.42W/m²-k(推開窗)、4.36 W/m²-k(橫拉窗)。

三種窗戶之單位面積窗戶之傳導熱得與透射熱得模擬結果如圖 2 所示。固定窗之因窗框所佔比例最低，因此 U 值為三者最高，同時玻璃所佔面積亦是三者最高，故窗戶傳導與透射熱得為三者最高，其中傳導部分三者相差不大，但對於窗戶的透射熱得，窗框所佔面積比例就有較大影響。此結果亦可更加印證窗框隔熱性能對於窗戶部位隔熱之重要性。

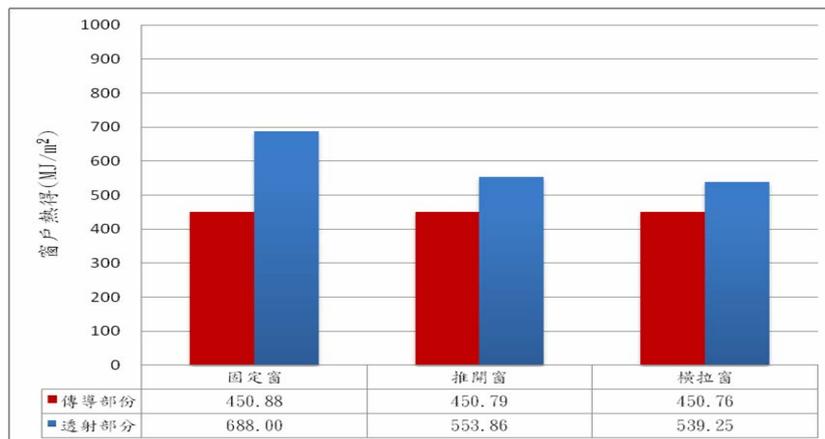


圖2 不同窗戶型式對窗戶熱得之影響

五、結論

降低進入建築物的熱量又兼顧室內自然光照度與通風一直是建築節能重要的課題，因此各種節能窗已被廣泛應用在建築物上。本文透過電腦模擬評估在台灣氣候條件下窗戶設計參數對於建築外殼能耗之影響，獲致如下的結論：

- (1) 窗戶的U值相較於其他建築外殼(例如：牆、屋頂)為高，加上太陽輻射熱的穿透致使窗戶部位的熱得遠比其他的建築外殼部位高出許多，因此窗戶的U值有降低之必要。根據本文所整理之不同窗框材料搭配各式玻璃之窗戶組合可知，窗框的U值對於窗戶部位整體隔熱性能有相當大的影響，採用塑鋼窗框的整體窗戶部位U值較採用鋁框者低。至於窗框的U值降低可朝向高隔熱性能窗框、高斷熱填充材、低熱傳導係數之間隔條(spacer)、高反射率與輻射率框架塗層開發之方向著手。另一方面，在窗戶部位U值固定之條件下，採用較低U值的塑鋼框材可以搭配成本較低的玻璃，進而降低整體窗戶部位的成本。因此目前節能窗之設計應以發展低成本高隔熱性能的窗框為首要。
- (2) 不同型式的窗框之玻璃與窗框所佔面積比例，會影響窗戶部位之節能效益。對於相同尺寸的窗戶，窗框所佔比例越多，其隔熱效能越好；而窗框所佔比例越多造成玻璃面積減少，亦會降低窗戶的透射熱得，而提升窗戶部位的遮陽效能。
- (3) 目前台灣的綠建材標章，僅有高性能隔音窗以及節能玻璃之評定基準，對於整組門窗的節能特性尚未納入評定項目。因此，亟需節能門窗相關標準量測方法以及評定基準之建立。
- (4) 節能窗之使用是納入在建築物設計之整體考量，可以整合遮陽、開窗面積、框架與窗戶之比例、建築物朝向等設計手法。

六、參考文獻

1. Russell Vare, Japanese Green Building Technologies: New Innovations and Policy, JETRO Green Building Report Vol. 2, 2011.
2. U.S. Department of Energy, ENERGY STAR Program: ENERGY STAR for windows, doors, and skylights revised draft criteria and report, March 2009.
3. British Federation Rating Council, Use of the BFRC A-G energy window label, BFRC Guidance Note , March 2007.
4. Avasoo, D., Energy transparency for energy efficiency, Future buildings forum event Cooling Buildings in a Warming Climate, Sophia Antipolis, France 21-22 June 2004.
5. 內政部建築研究所，「綠建材解說與評估手冊」，2011.
6. Gustavsena A., Grynninga S., Arastehb D., Jelle B. P., Goudey H., Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames, Energy and Buildings, Vol. 43 , 2011, pp. 2583–2594.