

空氣簾節能應用手冊

經 濟 部 能 源 局 指 導

財團法人台灣綠色生產力基金會 編印

中 華 民 國 一 百 零 九 年 十 二 月

目錄

目錄.....	i
圖目錄	iv
表目錄	1
前言	3
一、空氣簾應用之說明與介紹	4
二、營業場所空氣簾應用實例調查	10
2.1 營業場所空氣簾的量測方法.....	10
2.2 案場一之應用狀況分析	12
2.3 案場二之應用狀況分析	15
2.4 案場三之應用狀況分析	18
2.5 案場四之應用狀況分析	21
2.6 案場五之應用狀況分析	25
2.7 空氣簾應用之常見問題.....	28
2.8 空氣簾應用之安裝和調試建議.....	30
三、空氣簾應用案例之效益分析	31
3.1 室外風場對於空氣簾節能之效益.....	31
3.1.1 溫度場分析	31
3.1.2 速度場分析	36

3.1.3 相對濕度分析	39
3.1.4 提升空氣簾封閉效果	42
3.1.5 節能效益評估	43
3.2 適當調降空氣簾出風速度之效益	46
3.2.1 溫度場分析	46
3.2.2 速度場分析	50
3.2.3 相對濕度分析	54
3.2.4 節能效益評估	55
四、空氣簾設備規劃及設計原則	57
4.1 空氣簾出風速度估計方法	58
4.2 空氣簾封閉效率計算方法	59
4.3 空氣簾最佳出風速度評估	60
4.3.1 空氣簾設計模擬分析方法	61
4.3.2 空氣簾性能影響參數與模擬實驗設計	62
4.3.3 室外風速 0m/s 模擬結果分析	64
4.3.4 室外風速 0.3m/s 模擬結果分析	66
4.3.5 室外風速 0.6m/s 模擬結果分析	68
4.3.6 室外風速 0.9m/s 模擬結果分析	70
4.3.7 空氣簾出風風速之關鍵參數	72

4.3.8 封閉效率之關鍵參數	73
4.4 空氣簾建議之最小出風速度	74
4.5 設計參數對空氣簾封閉效率之影響	78
4.6 空氣簾熱損失計算方程式	80
4.7 空氣簾之性能功能驗證	81
五、結語	83
參考文獻	85

圖目錄

圖 1-1 風除室	4
圖 1-2 空氣簾之應用	5
圖 2-1 AMCA 空氣簾垂直量測點位圖	11
圖 2-2 AMCA 空氣簾水平量測點位圖	11
圖 2-3 多功能環境分析儀、環境溫濕度探棒、風葉式風速探棒.....	12
圖 2-4 案例一量測點位	13
圖 2-5 案例一空氣簾量測	14
圖 2-6 案例一室內環境量測	15
圖 2-7 案例二量測點位	16
圖 2-8 案例二空氣簾量測	17
圖 2-9 案例二內環境量測	18
圖 2-10 案例三量測點位	19
圖 2-11 案例三空氣簾量測	20
圖 2-12 案例三內環境量測	21
圖 2-13 案例四量測點位	22
圖 2-14 案例四空氣簾量測	24
圖 2-15 案例四室內環境量測	24
圖 2-16 案例五量測點位	25

圖 2-17 案例五空氣簾量測	27
圖 2-18 案例五室內環境量測	27
圖 2-19 案例三空氣簾安裝位置	29
圖 2-20 案例三空氣簾與門之相關位置	29
圖 3-1 案例一之離地 1.5m 溫度場分佈	32
圖 3-2 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面溫度場分佈圖	34
圖 3-3 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面溫度場分佈圖	35
圖 3-4 案例一之 Base Case 與 Case 01 之門口前之速度分佈剖面比較	36
圖 3-5 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面速度場分佈圖	37
圖 3-6 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面速度場分佈圖	38
圖 3-7 案例一之 Base Case 與 Case01 速度場分佈	39
圖 3-8 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面相對濕度分佈圖	40
圖 3-9 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面相對濕度分佈圖	41
圖 3-10 案例一之 Base Case 與 Case 02 之各垂直剖面速度分佈圖	42
圖 3-11 案例一之 Base Case 與 Case 02 之各垂直剖面溫度分佈圖	43
圖 3-12 案例二之離地 1.5m 溫度場分佈	46
圖 3-13 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面溫度場分佈圖	48
圖 3-14 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面溫度場分佈圖	49
圖 3-15 案例二之 Base Case 與 Case 01 之門口前之速度分佈剖面比較	50

圖 3-16 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面速度場分佈圖	51
圖 3-17 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面速度場分佈圖	52
圖 3-18 案例二之 Base case 與 Case 01 於離地 2.2m 之速度向量分佈剖面比較	53
圖 3-19 案例二之 BaseCase 與 Case 01 之各水平剖面相對濕度分佈圖	54
圖 4-1 空氣簾設計的分析模型	59
圖 4-2 氣流模擬分析模型平面圖	61
圖 4-3 氣流模擬分析模型與尺寸	61
圖 4-4 室外風速 0m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖	65
圖 4-5 室外風速 0m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖	65
圖 4-6 NO.02 $V_{0.min}$ 與 V_0 - X 軸向 18m 處速度分布圖	66
圖 4-7 室外風速 0.3m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖	67
圖 4-8 室外風速 0.3m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖	67
圖 4-9 NO.03 $V_{0.min}$ 與 V_0 - X 軸向 18m 處速度分布圖	68
圖 4-10 室外風速 0.6m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖	69
圖 4-11 室外風速 0.6m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖	69
圖 4-12 NO.04 $V_{0.min}$ 與 V_0 - X 軸向 18m 處速度分布圖	70
圖 4-13 室外風速 0.9m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖	71
圖 4-14 室外風速 0.9m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖	71
圖 4-15 空氣簾最小出風風速與 Hayes and Stoecker 預測之比值	76

圖 4-16 空氣簾最小出風風速 F 修正因子.....	77
圖 4-17 一般騎樓商店之空氣簾最小出風風速建議值.....	77
圖 4-18 空氣簾熱對流係數回歸曲線圖	80
圖 4-19 空氣簾距離地面 15 公分之氣流速度.....	82

表目錄

表 1-1 空氣簾之主要優缺點比較	5
表 2-1 案例一空氣簾出風回風量測數值	13
表 2-2 案例一空調出風回風量測數值	14
表 2-3 案例一室內外壓差量測數值	14
表 2-4 案例二空氣簾出風回風量測數值	16
表 2-5 案例二空調出風回風量測數值	16
表 2-6 案例二室內外壓差量測數值	17
表 2-7 案例三空氣簾出風回風量測數值	19
表 2-8 案例三空調出風回風量測數值	20
表 2-9 案例三室內外壓差量測數值	20
表 2-10 案例四空氣簾出風回風量測數值	22
表 2-11 案例四空調出風回風量測數值	23
表 2-12 案例四室內外壓差量測數值	23
表 2-13 案例五空氣簾出風回風量測數值	26
表 2-14 案例五空調出風回風量測數值	26
表 2-15 案例五室內外壓差量測數值	26
表 3-1 案例一 Base Case 與 Case 01 溫度數值比較	33
表 3-2 案例一之總耗電量以及節能率計算	44
表 3-3 案例一之熱傳量計算	45

表 3-4 案例二 Base Case 與 Case01 溫度數值比較	47
表 3-5 案例二之總耗電量以及節能率計算	55
表 3-6 表案例二之熱傳量計算	56
表 4-1 模擬因子水準表	62
表 4-2 模擬 L_{32} 直交表	63
表 4-3 室外風速 0m/s - V_0 計算表	64
表 4-4 室外風速 0.3m/s - V_0 計算表	66
表 4-5 室外風速 0.6m/s - V_0 計算表	68
表 4-6 室外風速 0.9m/s - V_0 計算表	70
表 4-7 最小出風風速 S/N 比 模擬因子效應表	72
表 4-8 最大封閉效率 S/N 比 模擬因子效應表	73
表 4-9 $D_{m.min}$ 修正係數表	75
表 4-10 空氣簾封閉效率	78

前言

現今的營業場所中多半都是一個半開放式的空間，許多業者為了使消費者能更流暢地進入店內，常採用無門式的入口或是採用自動門，儘管自動門在關閉時可以有效隔絕室內外的氣流流動，然而人員的進出使自動門開開關關，室外氣流滲入造成熱負荷的增加，甚至門口如果處在迎風處將有更多的氣流流入導致更嚴重地增加熱負荷，並嚴重影響室內的環控條件。因此在不影響室內環控的條件下，降低冷凍空調系統的能耗及控制氣流的滲透，維持室內的環控水準變得格外重要。

且在建築物中使用空氣簾作為前廳的替代方法，可為建築物節省空間與施工成本，Wang[1]等人研究，空氣簾顯著降低了通過門的氣流滲透和能量損失。近年來，已有相當多的場所採用空氣簾以防止室內氣流外洩或室外氣流滲入室內，但因為空氣簾之節能效果會受到諸多環境因素、氣候因素、設計方法及使用條件而有所差異，使得使用者對於空氣簾節能技術應用產生疑慮。

有鑒於此，本節能技術手冊將進行空氣簾應用之說明與介紹、營業場所量空氣簾應用常見之問題解說、導入空氣簾應用的方法與技術、空氣簾應用之節能效益評估等，藉由計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）之模擬方法與現場調研，針對空氣簾之設計方式、氣流設計及環境條件進行模擬評估及相關研究分析，並研究提出空氣簾節能設計之建議方案與效益探討及推廣應用。

一、空氣簾應用之說明與介紹

為了避免營業場所內部空間之冷氣或暖氣由大門外洩到戶外，或是防止戶外熱空氣或冷空氣由大門侵入建築室內空間，通常會裝置手動門、自動門、風除室(如圖 1-1 所示)或空氣簾(如圖 1-2 所示)以達到節能減碳之目的。由於台灣地狹人稠，很多營業場所因為空間受限及消費者人流密集，而不便於設置手動門、自動門及風除室。因此，空氣簾成為解決前述痛點之唯一解方。

相對於風除室，空氣簾主要優點是不需設置會影響出入方便性之雙道門、節省空間及成本便宜..等。空氣簾之主要優缺點如表所示。



圖 1-1 風除室

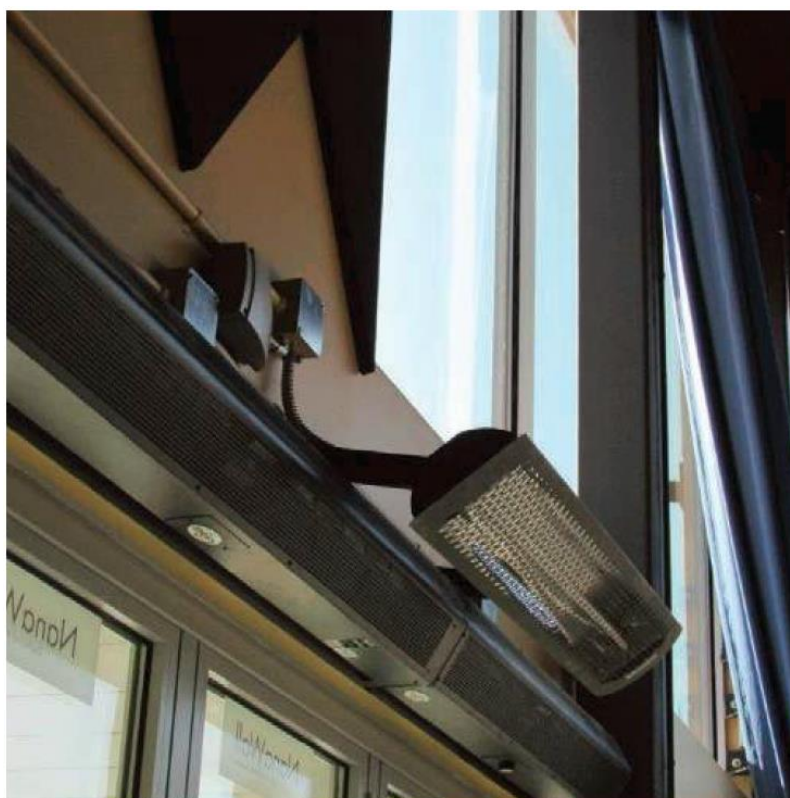


圖 1-2 空氣簾之應用

表 1-1 空氣簾之主要優缺點比較

優點	缺點
1. 不增加額外的障礙物（例如額外的門），從而使緊急出口更加安全。	1. 不是永久性的屏障，容易受到強風的影響，從而減少了對人員的保護。
2. “開門效應”可能會增加客戶的訪問量，因為“開門效應”是發掘探索的動力。	2. 可能會因弄亂頭髮或衣服而煩擾過往的人，並可能破壞原本令人愉悅的購物體驗。
3. 與風除室相比，可以增加可用的可用空間。	3. 當噪音和氣流超過舒適極限時，客戶會認為氣幕發粘。
4. 根據氣候區的不同，空氣簾在節能方面可以等於或優於風除室。	4. 不具安管之安全入口。
5. 與風除室相比，建設成本較低。	

優點	缺點
6. 可有效減少進入建築物的昆蟲和污染物的數量。 7. 易於維護，維護成本低。 8. 不需要安裝風管系統，電氣成本更低，門數量更少，並且在暴風雨期間，地板比風除室更乾燥。	

由市場調查、研究文獻與案例探討報告等資料，可歸納空氣簾之規格型式與適用場所，並根據氣流方向、適用場域與控制方式等條件來進行分類。國內市面上空氣簾依出風風速與射程大致可分成三類：

1. 風速 7-9m/s、射程 2-2.5m，適用於小超商、店鋪、飲料店、早餐店等。
2. 風速 9-13.5m/s、射程 2.5-4.5m，適用於賣場、百貨公司、車站、捷運站等。
3. 風速 12.5-16m/s、射程 4.0-5.5m，適用於中央廚房、食品加工廠、汙水處理廠等廠房。

依氣流方向可分為三類：

1. 上出風：安裝在門口上方，風由上往地面吹，上出風也是目前營業場所空氣簾的主要使用方式。
2. 下出風：安裝在地面，風由地面往上吹，下出風往往造成女性顧客裙子被吹起，不適用於一般之營業場所。
3. 側出風：安裝在門口兩側，風由兩側往中間吹，因門口過高使射流無法達到地面，側出風常運用在門口高度較高之場所。

目前市售之空氣簾風速可調變段速多半在 2 至 3 段，依各營業場所需求自行選擇使用之段速，並無特定之方法判斷其風速應調至為多少才適當。關於空氣簾相關之節能應用及節能效益，將在下一章節文獻回顧進行詳細之說明。

通常透過實驗進行氣流分析是相當耗時且昂貴的，計算流體動力學(CFD)已經被越來越多的人廣泛運用到空氣簾的研究中(Juraeva[2]等人)。Downing and Meffert[3]對不同的空氣簾系統的封閉效率進行了現場研究，並指出許多空氣簾安裝在實際的工業設施中時，其尺寸通常不正確或調節不適當（未選擇至最佳狀態），提出選擇正確空氣簾參數的重要性。

若藉由空氣簾降低室外熱濕空氣滲入冷凍冷藏賣場，可獲得顯著之效益，根據 Howell[4]研究結果顯示，當商店相對濕度降低 5% 時，展示櫃的總能量需求減少了 10%，因此可以使整個商店總能耗降低 5%。環境氣候對總傳熱率和滲透率亦產生很大影響，根據 Gaspar[5]等人研究顯示，當濕度從 35% 上升到 60% 時，潛熱傳遞率增加了 42%，濕度對潛熱傳遞速率有顯著的影響。Gil-Lopez[6]等人在保持顧客通行的商店中，並維持室內環境溫度與濕度的熱舒適性條件下，針對無空氣簾、一般空氣簾和高效空氣簾三種情況進行實驗分析，其結果表明，因一般空氣簾之風扇耗功較大，所以高效空氣簾比一般空氣簾約可以節省 32.9% 的能源消耗，並能阻隔 90% 室外的氣流滲入。蘇郁涵[7]利用建築耗能模擬軟體分析降低冷氣外洩量，當裝設空氣簾時冷氣外洩占整體空調負荷的 61 % 降為 27 %，商店裝設空氣簾可達到相當可觀之節能率。

Yang[8]等人通過實驗評估在不同風速和風向下的空氣簾性能，以及考慮到不同的室外氣流速度、角度和整個空氣簾間壓差的影響。由結果表明，室外氣流的風速與風向會對空氣簾性能產生重大的影響，尤其在高風速下會穿透空氣簾下部，導致大量的氣流滲透，而較大的空氣簾出風風速與出風角度或增加室內壓力，有助於阻隔室外氣流的流入。Tomas Gil-Lopez[9]研究顯示，當空氣簾出風風速度太低時，空氣射流無法到達地面，導致空氣簾無法將室內空氣與

外界環境隔離開來，且由於持續使用空調系統而產生的正壓，它會迫使室內空氣通過開口流至室外，導致空調系統更多的能耗；相反，當空氣簾出風風速的增加往往會與地面產生碰撞，在這種情況下，空氣從外到內的混合也會造成明顯的熱損失。根據李國仲[10]研究亦顯示，當空氣簾出風風速太強時，空氣簾產生之射流會與室內外氣流互相衝擊擾動，造成室內冷熱氣流混雜，影響室內環境舒適度；當空氣簾出風風速太弱時，無法有效隔絕室外空氣的滲透，若能與自動門的搭配，更可以維持室內冷(暖)氣效果，更可發揮空調系統效率達到節能效果。

Wang[1]等人研究指出，在建築物中使用空氣簾作為前廳的替代方法，可為建築物節省空間與施工成本，並且量化空氣簾對整個建築能耗的影響。研究結果顯示，在相同條件下的前廳與裝設空氣簾相比，裝設空氣簾顯著降低了通過門的空氣滲透和能量損失。Amin Mazyar [11]研究表明，對安裝在冷藏室檢修門上方空氣簾的性能進行參數研究。結果表明，空氣簾的最佳出風風速隨著門的高度以及空氣簾兩側的溫度差而增加，使用較厚出風口的空氣簾允許較低的出風風速，達到相同的阻隔效果。謝文德[12]等人指出，增設空氣簾時室外滲透熱負荷比無空氣簾減少達 60%以上，在相同出風風量下，出風面積越大有較好的節能效果，增設空氣簾有效阻隔室外空氣的滲透，減少空調系統的能耗。

Goubran[13]等人研究，透過 CFD 提出一個新的經驗模型，用以驗證文獻中的空氣簾經驗模型，對於估計通過裝有空氣簾建築物入口的滲透是有效的，研究結果發現空氣簾的風速越高，空氣簾能抵抗的室內外壓差的性能就越好，但較高的出風速度在低壓差條件下可能會引起更多的空氣滲透或洩漏。此外 Ye[14]等人，利用 CFD 模擬一個大空間建築模型，以探討改變空氣簾相關參數對減少空氣滲透的影響。其結果表明，空氣簾阻隔效率隨室內外壓差的增加呈指數下降，並隨空氣簾風速的增加而線性增加。當空氣簾風量恆定時，空氣簾的出風速度比出風口的開口大小更具影響，因此在風量固定時可優先提高出

風速度。Gregory[15]等人研究，利用 CFD 模擬在不同的空氣簾參數下，對門口的傳熱速率的影響，並使用熱顯像圖做為驗證。最後，提出一種估算通過空氣簾的傳熱速率方程式。

綜合以上之文獻分析，可確認空氣簾在適當之使用條件下具有顯著之節能成效，但以下因素會影響空氣簾阻隔外氣滲透之效率：

1. 室外氣流的風速與風向會對空氣簾性能產生重大的影響，尤其在高風速下會穿透空氣簾下部，導致大量的氣流滲透，而較大的空氣簾出風風速與出風角度或增加室內壓力，有助於阻隔室外氣流的流入。
2. 當空氣簾出風風速度太低時，空氣射流無法到達地面，導致空氣簾無法將室內空氣與外界環境隔離開來，且由於持續使用空調系統而產生的正壓，它會迫使室內空氣通過開口流至室外，導致空調系統更多的能耗；相反，當空氣簾出風風速的增加往往會與地面產生碰撞，在這種情況下，空氣從外到內的混合也會造成明顯的熱損失。
3. 空氣簾的風速越高，空氣簾能抵抗的室內外壓差的性能就越好，但較高的出風速度在室內外低壓差條件下可能會引起更多的空氣滲透或洩漏。

空氣簾之節能效果會受到諸多環境因素、氣候因素、設計方法及使用條件而有所差異，使得使用者對於空氣簾節能技術應用產生疑慮。有鑒於此，本手冊將進行空氣簾節能設計與效益之分析探討，藉由本土商店現場調查及計算流體力學之模擬方法，針對空氣簾之設計方式、氣流設計及環境條件進行模擬評估及相關研究分析，並研提空氣簾節能設計之建議方案與效益探討及推廣應用。

二、營業場所空氣簾應用實例調查

2.1 營業場所空氣簾的量測方法

本計畫針對空間環境、空調系統與空氣簾進行量測，做為模擬結果與實際情形比對，以確保模擬之真實性。因量測案場點位不宜架設長期量測設備，且現場空間與感測器架設成本等考量，因此量測點仍需以人工方式配合現場環境狀況進行測量，針對空間內之溫濕度分別為取距離地面高度 0.5、1.0、1.5、2.0m 進行量測，室內空調系統與空氣簾出回風溫濕度與風速、室外大氣之溫濕度、室內外壓差進行量測。

AMCA Standard 220-05[16]有關於空氣簾在實驗室測試標準，對於空氣簾其目標距離為 3m 或以上時，垂直方向應分別距離出風口 1.0、2.0、3.0m 之平面量測；對於空氣簾其目標距離為 2m 時，垂直方向應分別距離出風口 1.0、1.5、2.0m 之平面量測；對於空氣簾其目標距離為 1m 時，垂直方向應分別距離出風口 0.5、1.0、1.5m 之平面量測，水平方向第一點應離出風口一個寬度，之後每點間隔不得超過 10cm，且至少須 5 個點位以上，如圖 2-1 及圖 2-2 所示。但為了避免干擾商店營運，且現場實務上難以完全依據 AMCA Standard 220-05 之標準實驗室條件下進行量測，所以本手冊的空氣簾量測方法亦參考 Gregory[15]等人空氣簾量測方法，採用水平方向每隔 20cm 為一個點位，垂直方向距出風口 5cm、1.0m、1.5m、2.0m 與距離地面 10cm、20cm 之平面進行溫濕度與風速量測。

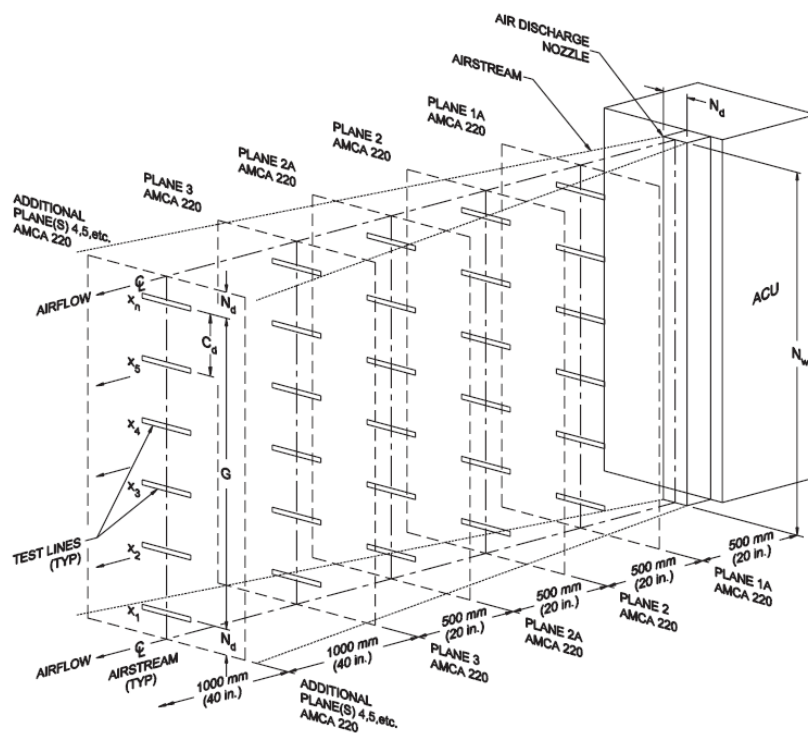


圖 2-1 AMCA 空氣簾垂直量測點位圖

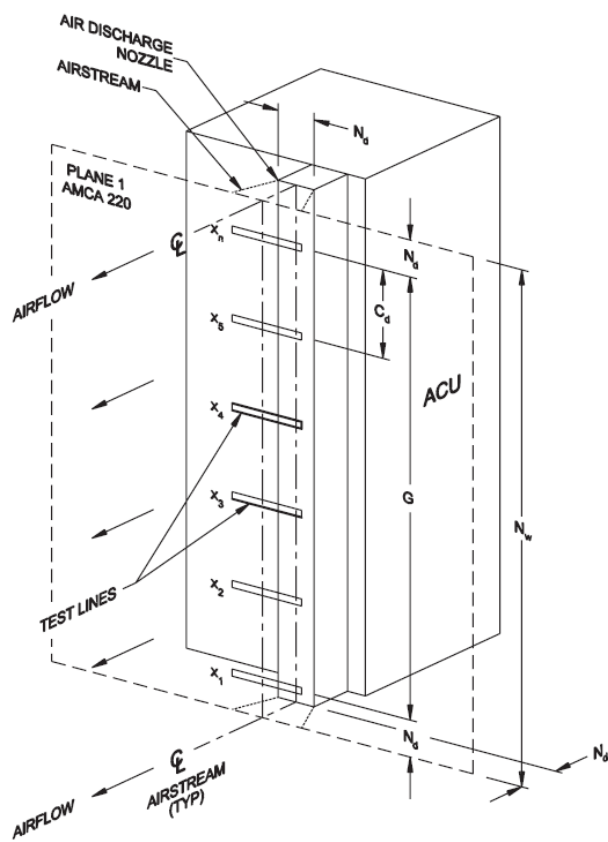


圖 2-2 AMCA 空氣簾水平量測點位圖

本計畫量測之數據除了作為營業場所量空氣簾應用之現況調查了解之外，也將引入案例模擬中之邊界條件。為了觀察空氣簾出風風速與射流的情形，本次計畫量測採用多功能分析儀並搭配風葉式風速探棒與溫濕度探棒，圖 2-3 所示，其風速量測範圍為 0.2~15(m/s)，精準度為 ± 0.1 (m/s)，溫濕度量測範圍為 $-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 、0%~100% RH，精準度為 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\%$ RH。



圖 2-3 多功能環境分析儀、環境溫濕度探棒、風葉式風速探棒

2.2 案場一之應用狀況分析

案例一為西門某便利商店，該超商長寬高分別為 10.15 m、3.8 m、2.55 m，入口處採無門式設計，門口上方安裝 3 台空氣簾，門口開口面積為 8.55m^2 ，室內有一台天花板嵌入型全方吹，三台開放式冰櫃，收銀台上方有兩個格柵式出風口，空氣簾使用時間為夏季全天運轉，冬季不使用空氣簾，空氣簾本身為兩段可調式風速，強弱兩段風速分別約為 9.45、7.71m/s。下圖 2-4 為量測之點位位置標示圖，紅色點位為空間之溫濕度，量測高度分別為距離地面 0.5、1.0、1.5、2.0m 之情形，藍色點位為天花板嵌入型全方吹之出回風溫濕度與風速，綠色點位為室外大氣在離地 1.5m 之溫濕度，紫色點位為室內外壓差，橘色點位為收銀台上方兩個格柵式出風口之溫濕度與風速。

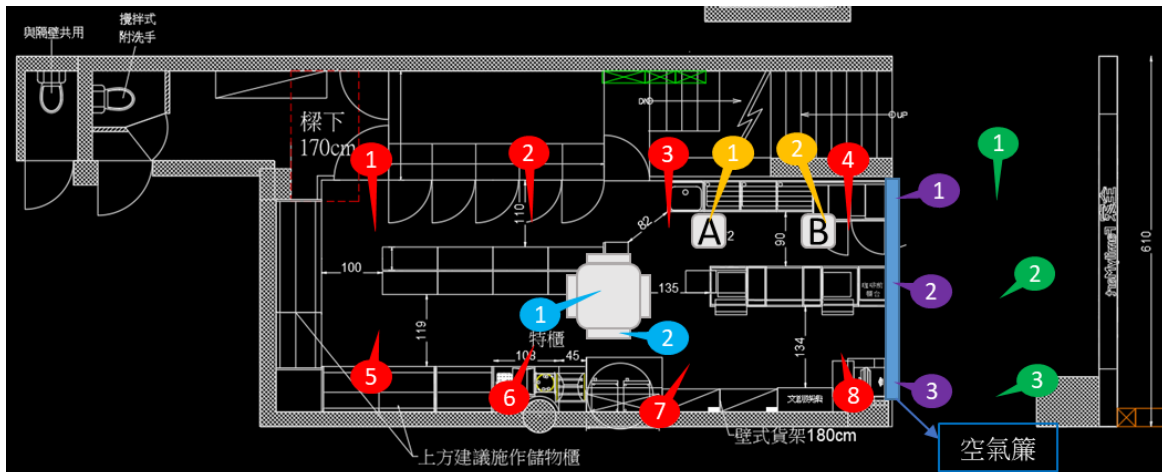


圖 2-4 案例一量測點位

當天室外量測溫濕度條件為 31.3℃、RH 66.5%，其量測相關數值如表 2-1～表 2-3 所示，現場量測有發現因空氣簾的風機是放在機身的左右兩側，這導致空氣簾的左右兩側的出風風速是較為強勁的，中間相對風速弱許多，造成出風的不均勻性，如圖 2-5、圖 2-6 為現場量測照片。

表 2-1 案例一空氣簾出風回風量測數值

	距離出風口 m	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
空氣簾 出風	0.05	5.85	30.67	72.95
	1.0	1.58	30.73	69.84
	1.5	1.32	30.75	69.79
	2.0	0.98	30.78	69.75
	離地 0.1m	0.54	30.41	69.55
	離地 0.2m	0.72	30.35	69.6
空氣簾回風		1.58	31.16	58.33

表 2-2 案例一空調出風回風量測數值

	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
天花板嵌入型全 方吹出風	3.8	17.45	99.99
天花板嵌入型全 方吹回風	2.2	25.4	62.7
收銀台出風口 A	4.24	16.4	99.9
收銀台出風口 B	3.25	17.1	99.9

表 2-3 案例一室內外壓差量測數值

點位	壓差 Pa
1	1.40
2	1.48
3	1.52



圖 2-5 案例一空氣簾量測



圖 2-6 案例一室內環境量測

2.3 案場二之應用狀況分析

案例二為板橋某速食販售店，該速食店面長寬高 13.0m、5.4m、3m，入口處為雙開玻璃門設計，在門口上方安裝了 2 台空氣簾，門口開口為 7.92 m²，室內有一天花板嵌入式全方吹分別有四個出風口以及一回風口，供應室內冷氣，空氣簾搭配門口開關的感測器，當門打開時，空氣簾開始運轉，門關上時，空氣簾也隨之停止運轉，空氣簾本身風速經過量測約為 6.92m/s，下圖 2-7 為量測之點位位置標示圖，紅色點位為空間之溫溼度量測點，量測高度分別為距離地面 0.5、1.0、1.5、2.0m 之情形，藍色點位為天花板嵌入式全方吹之出回風口溫溼度以及風速，綠色點位為室外大氣在離地 1.5m 之溫溼度，紫色點位室內外壓差。

當天室外量測溫溼度條件為 30.1℃、RH 65%，其量測相關數值如表 2-4～

表 2-6 所示，現場量測有發現因空氣簾是由兩台風計併排排風，而且出風風速較大，導致將門開啟時，室內的冷空氣會洩漏至外部，下圖 2-8、圖 2-9 為現場量測照片。

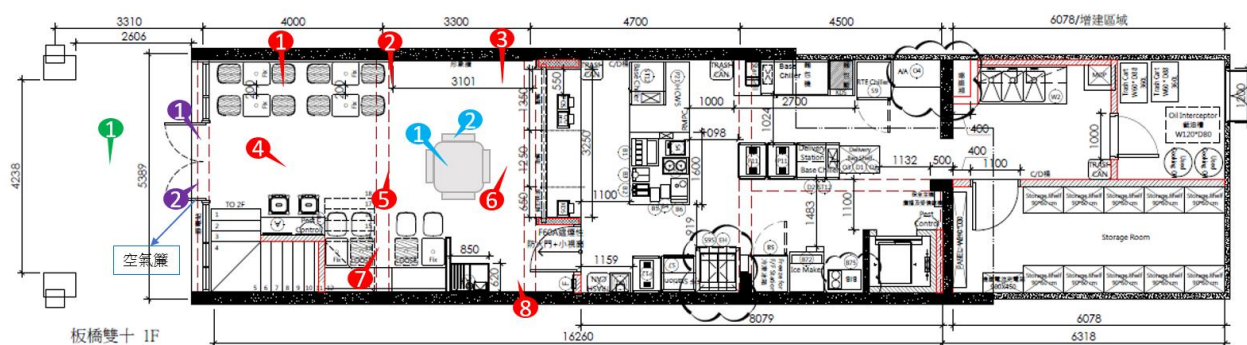


圖 2-7 案例二量測點位

表 2-4 案例二空氣簾出風回風量測數值

	距離出風口 m	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
空氣簾出風	0.05	6.92	27.1	62.1
	1.0	2.47	27.2	62.3
	1.5	1.32	28.0	64
	2.0	0.80	28.2	64.4
	離地 0.1m	0.38	28.3	64.3
	離地 0.2m	0.32	28.2	64.7
空氣簾回風		1.54	27.2	62.0

表 2-5 案例二空調出風回風量測數值

	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
天花板嵌入型全方吹出風	5.22	19.5	99.9
天花板嵌入型全方吹回風	2.35	26.1	62.7

表 2-6 案例二室內外壓差量測數值

點位	壓差 Pa
1	1.38
2	1.42



圖 2-8 案例二空氣簾量測



圖 2-9 案例二內環境量測

2.4 案場三之應用狀況分析

案例三為披薩販售店，該披薩店面長寬高分別為 19.1m、3.9 m、2.45 m，入口處自動門設計，距門口 30cm 樑上安裝 1 台空氣簾，門口開口面積為 2.45m²，室內有一箱型冷氣機分別拉出 7 個圓形出風口在顧客區，空氣簾搭配自動門運轉，當門打開時空氣簾開始運轉，關閉時空氣簾也隨著停止運轉，空氣簾本身為兩段可調式風速，強弱兩段風速分別約為 9.45、7.71m/s，如圖 2-10 為量測之點位位置標示圖，紅色點位為空間之溫濕度，量測高度分別為距離地面 0.5、1.0、1.5、2.0m 之情形，藍色點位為圓形出風溫濕度與風速，綠色點位為室外大氣在離地 1.5m 之溫濕度，紫色點位為室內外壓差。

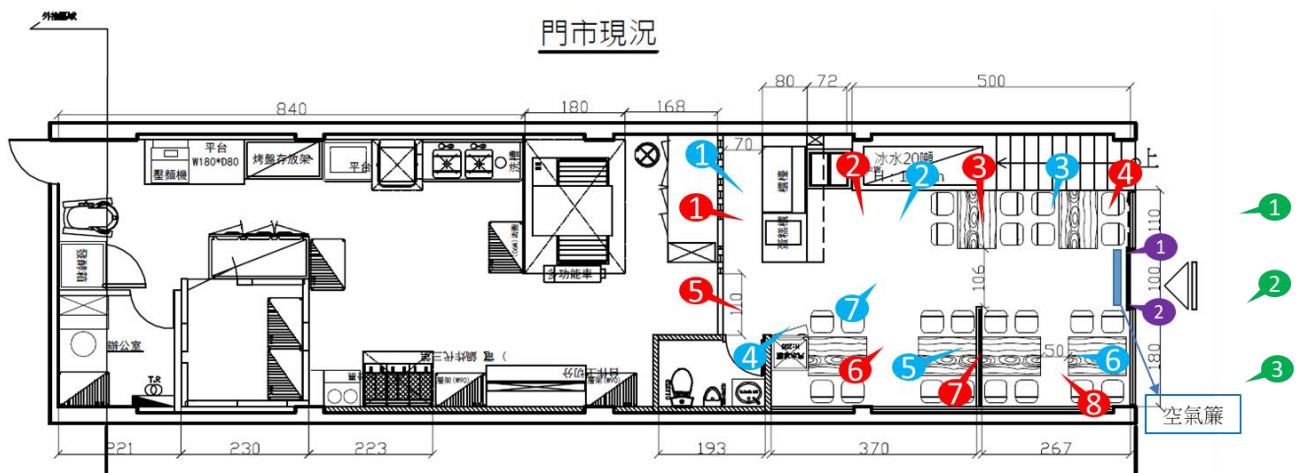


圖 2-10 案例三量測點位

當天室外量測溫濕度條件為 25.97℃、RH 88.3%，其量測相關數值如表 2-7～表 2-9 所示。現場量測亦有發現在空氣簾的左右兩側的出風風速較為強勁，中間部位相對風速弱許多，造成出風的不均勻性的狀況，如圖 2-11、圖 2-12 為現場量測照片所示。

表 2-7 案例三空氣簾出風回風量測數值

	距離出風口 m	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
空氣簾出風	0.05	6.33	25.2	89.4
	1.0	2.55	25.6	88.7
	1.5	1.72	25.4	88.6
	2.0	1.16	25.2	89.8
	離地 0.1m	0.40	25.7	88.7
	離地 0.2m	0.69	25.7	87.7
空氣簾回風		1.48	26.2	85.3

表 2-8 案例三空調出風回風量測數值

	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
圓形出風口	1.98	19.2	82.0
箱型冷氣機回風口	2.52	20.9	79.0

表 2-9 案例三室內外壓差量測數值

點位	壓差 Pa
1	4.3
2	4.7



圖 2-11 案例三空氣簾量測



圖 2-12 案例三內環境量測

2.5 案場四之應用狀況分析

案例四為美妝販售店，該店面長寬高分別為 10.7m、4.14m、2.35m，入口處採無門式設計，距門口 30cm 樑上安裝 4 台空氣簾，門口開口面積為 10.3635m^2 ，室內有兩台天花板嵌入式全方吹以及分別有兩個方形出風口，如圖 2.13 中之藍色點 1 及點 4，另有兩處回風口放置在產品展示區上方，空氣簾使用時間為夏季全天運轉，冬季不使用空氣簾，空氣簾本身為兩段可調式風速，強弱兩段風速分別約為 7.5、11.5m/s。如圖 2-13 為量測之點位位置標示圖，紅色點位為空間之溫濕度，量測高度分別為距離地面 0.5、1.0、1.5、2.0m 之情形，黃色及藍色點位為天花板嵌入式全方吹之分別為出、回風溫濕度與風速，綠色點位為室外大氣在離地 1.5m 之溫濕度及風速。

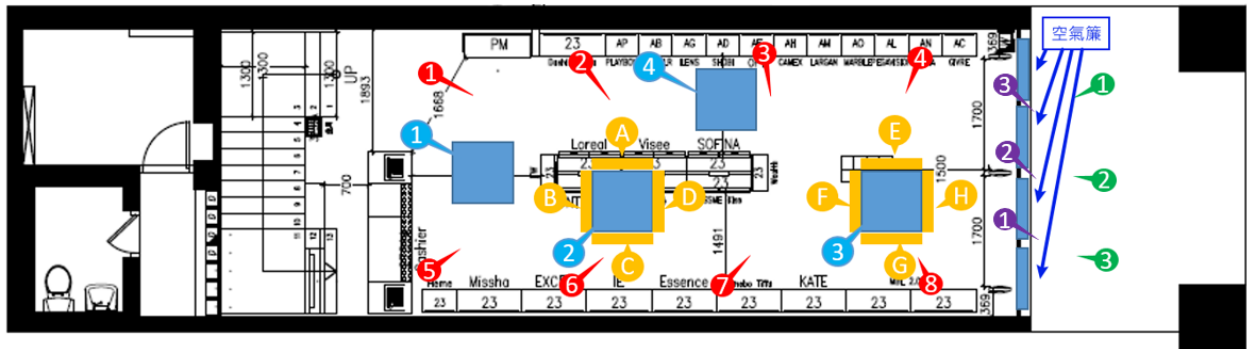


圖 2-13 案例四量測點位

由於此店面並沒有使用自動門來隔絕室外，所以在夏季必須完全依賴空氣簾來隔絕室外之較高溫空氣，當天量測之溫濕度條件為 33.5°C 、RH 52%，其量測相關數值如表 2-10 及表 2-11 所示。現場量測亦有發現在空氣簾的出風速度較為強勁，經量測後結果也認為雖然空氣簾風速較高，但是也能使該店面達到一定的氣簾封閉效果，使得室內與室外溫度有一定差異，達到良好的隔絕效果，如圖 2-14、圖 2-15 為現場量測照片。

表 2-10 案例四空氣簾出風回風量測數值

	距離出風口 m	平均風速 m/s	平均溫度 $^{\circ}\text{C}$	平均濕度%
空氣簾出風	0.05	8.83	27.55	59.1
	1.0	4.68	30.88	54.8
	1.5	3.24	30.51	53.6
	2.0	2.78	30.01	53.5
	離地 0.1m	1.49	30.41	53.2
空氣簾回風		2.46	26.73	62.4

表 2-11 案例四空調出風回風量測數值

	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
天花板嵌入型全方吹出風 (A 至 D)	4.98	18.1	84
天花板嵌入型全方吹出風 (E 至 H)	4.77	20.0	82
天花板嵌入型出風口(1)	3.55	24.3	56.3
天花板嵌入型回風口(2)	2.62	24.1	64
天花板嵌入型回風口(3)	2.4	25.1	63.7
天花板嵌入型出風口(4)	4.74	26.8	64

表 2-12 案例四室內外壓差量測數值

點位	壓差 Pa
1	0.5
2	0.3
3	0.8



圖 2-14 案例四空氣簾量測



圖 2-15 案例四室內環境量測

2.6 案場五之應用狀況分析

案例五為大型百貨賣場，該賣場採挑高設計，高度為 6m，入口處採用自動門，門口高度為 3m，並安裝一台空氣簾，空氣簾搭配自動門運轉，當門打開時空氣簾開始運轉，關閉時空氣簾也隨著停止運轉，門口開口面積為 9m^2 ，室內有一中央空調系統之風管供風，在賣場入口附近有四個出風口供應式內供風，如圖 2-16 為量測之點位位置標示圖，紅色點位為空間之溫濕度，量測高度分別為距離地面 0.5、1.0、1.5、2.0m 之情形，藍色點位為圓形出風溫濕度與風速，綠色點位為室外大氣在離地 1.5m 之溫濕度。

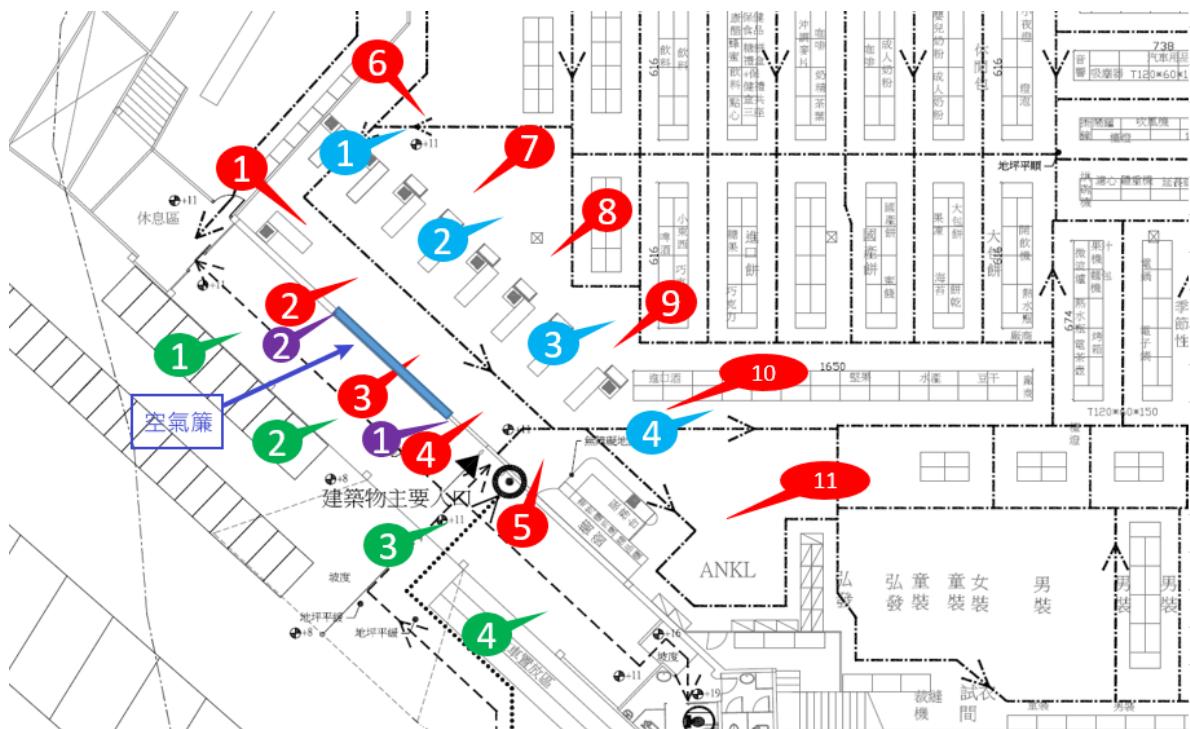


圖 2-16 案例五量測點位

該賣場由於空間較大，且門口之高度較高，當天量測之溫濕度狀態為 30.9℃、RH 57.9%，其量測相關數值如表 2-13～表 2-15 所示。現場量測時當自動門開啟時，室外之空氣會進入室內，室外封閉效果較差，雖然該空氣簾風速較高，但是風速到達地面之速度降低很多，原因是室內外壓差較大，所以造成室外空氣進入室內造成溫升，如圖 2-17、圖 2-18 為現場量測照片。

表 2-13 案例五空氣簾出風回風量測數值

	距離出風口 m	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
空氣簾出風	0.05	7.17	27.05	54.6
	0.8	4.28	26.90	55.8
	1.6	2.15	27.95	56.3
	2.4	0.625	28.10	56.6
	離地 0.1m	1.49	29.21	56.6
空氣簾回風		3.55	26.90	67.6

表 2-14 案例五空調出風回風量測數值

	平均風速 m/s	平均溫度℃	平均濕度%
中央空調出風口(1)	6.69	25	59.8
中央空調出風口(2)	3.34	26.5	63.5
中央空調出風口(3)	4.21	25.2	61.2
中央空調出風口(4)	4.33	25.3	60.4

表 2-15 案例五室內外壓差量測數值

點位	壓差 Pa
1	4.8
2	5.1



圖 2-17 案例五空氣簾量測



圖 2-18 案例五室內環境量測

2.7 空氣簾應用之常見問題

在前章節之文獻分析，可確認空氣簾在適當之使用條件下具有顯著之節能成效，但空氣簾之節能效果亦會受到諸多環境因素、氣候因素、設計方法及使用條件而有所差異。因此，本手冊藉由現場應用案例之訪視及量測，以了解實務應用狀況。

由現場量測發現空氣簾的風機輪葉是安裝在機身的左右兩端，並未完全覆蓋整個出風口，而導致空氣簾的左右兩端的出風風速是較為強勁的，中間相對風速弱許多，造成出風的不均勻性，使空氣簾的射流結構不完整，容易因室外流場等因素影響破壞空氣簾氣流，使氣流往往無法順利達到地面形成完整得封閉，造成室外空氣由下半部滲透至室內或是冷氣流往外洩漏。

現場門口的寬度若大於空氣簾設備之寬度時，商家常常都是使用多台空氣簾並排串接而成，而空氣簾與空氣簾間會有一段縫隙，而造成室外氣流流入的破口，對室內產生熱負荷影響環境控制條件。

某些商家因為空間格局關係，空氣簾安裝的位置無法貼緊門口上緣，如圖 2-19、圖 2-20 所示，圖中空氣簾沒有安裝在門口上方，而是安裝在門口前方的樑上，這造成空氣簾射流無法完整封閉門口，射流與門口還有一段距離，使室外氣流都由門與空氣簾間的兩旁流入室內，沒有達到空氣簾的使用效果。

由現場量測發現，因室外流場的影響使空氣簾往裡面傾斜之趨勢，造成下半部的流入突破，無法達到理想的封閉效果。

經由現場之訪視與量測，關於空氣簾在使用上或安裝上之問題，可以歸納如下：

1. 空氣簾風機本身的結構問題，造成出風的不均勻性。

2. 空氣簾因多台串接，設備之間的縫隙造成氣流不連續，而造成外氣侵入。
3. 空氣簾安裝位置不理想，使空氣簾風速沒達到其規格及理想效果。
4. 理論上空氣簾之射流速度及角度需依據室外流場特徵進行調整，以達空氣簾理想的封閉效果，但目前市售產品並未有風速及角度之可自動調變功能。



圖 2-19 案例三空氣簾安裝位置



圖 2-20 案例三空氣簾與門之相關位置

2.8 空氣簾應用之安裝和調試建議

由前一節所述，由現場訪視所歸納之空氣簾應用的常見問題可知，有效的空氣簾安裝及選擇需考慮許多因素，才能發揮其效用並滿足使用者的需求。空氣簾之安裝和調試，建議必須特別考慮以下原則：

1. 不論將空氣簾安裝在門口的內部或外部，都需要特別注意其周圍的障礙物且應考慮維護的可行性，避免阻礙空氣簾之氣流流動。典型的障礙物可能包括橫樑，管道，管道系統，電線管，門之附件等。每個空氣簾之製造商都應為每款型號提供具體安裝及使用說明，安裝人員應具備建議之專業資格並仔細遵循有關工作規範的建議。
2. 空氣簾之調試應包括確認空氣簾系統正確的安裝、功能、性能和可維修性。應按照設備商提供之程序規範，進行正確的操作和控制。
3. 空氣簾通常安裝在室內，最常見的是直接安裝在門口上方，以使氣簾從開口處垂直吹出。由於可能有空間的限制，在某些情況下，空氣簾單元會垂直安裝並在整個開口處水平吹出；又或是在某些情況下，會將設備安裝在室外，建議可採用懸吊式或防風雨罩保護室外安裝的空氣簾不受這些外界天氣因素影響。可以通過使用特殊用途的電動機，電氣配件，風扇或葉輪，達到所需功能。
4. 無論是垂直安裝還是水平安裝，空氣簾氣流之寬度均應等於或略大於要保護的門口寬度。在確定裝置大小時應考慮現有門之元件（高架軌道等）的位置，以使吊桿或支架不會干擾門之元件。
5. 當吹向空氣簾的外部風場比較大時，可適時調整空氣簾之出風角度，例如使空氣簾朝外 15–20°，以允許抵抗外界的風。
6. 選用空氣氣簾時，應考量其電力規格，以確保符合現場電源規格及配電法規，並應由合格的技術人員安裝。

三、空氣簾應用案例之效益分析

由本手冊第二章之相關文獻顯示，當室外風場風速太大時，容意造成下半部的流入突破，使室外高溫高濕之氣流流入室內導致熱負荷增加，而當空氣簾出風風速過高時，射流撞擊地面空氣從外到內的混合造成明顯的熱損失。而藉由本手冊的現場輔導量測，亦可觀察到適當的空氣簾出風風速，確實有助於減少因空氣內外的混合所造的熱負荷增加。

為深入瞭解採用空氣簾在實務案例應用之效益，本手冊針對第三章營業場所區域之溫度場、速度場與相對濕度進行解析，並評估其對於能耗之影響。數值模擬軟體則採用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)程式為分析工具以進行數值計算，幾何建模、網格配置、求解溫度與氣流場等。空間幾何構型利用繪圖軟體建置該案場模型，組合成三維數位模型與欲解析之流體區域。數值計算方式則是利用有限控制體積(Finite Control Volume)法離散守恆方程式，進而取代統御方程式以產生代數方程式。詳細之氣流模擬理論與方法，請參見綠基會委託國立臺北科技大學執行之計畫報告書(李魁鵬[21])。

3.1 室外風場對於空氣簾節能之效益

3.1.1 溫度場分析

由本手冊之案例一的現場訪查可知，由於室外流場風速較大，使得空氣簾之射流受到影響，產生流入突破之情況，因此針對此情形模擬案例一在無室外流場下空氣簾射流情況(Case 01)，並觀察其空氣簾出風風速是否有過低或過高之情形發生。以如圖 3-1 為離地 1.5m 下 Base Case 與 Case 01 溫度場分佈情形，其數值比較如表 3-1 所示，由表中可以發現當沒有室外流場風速影響時，室內平均溫度降低 3.9℃，可讓室內保持在較低溫的環境中。

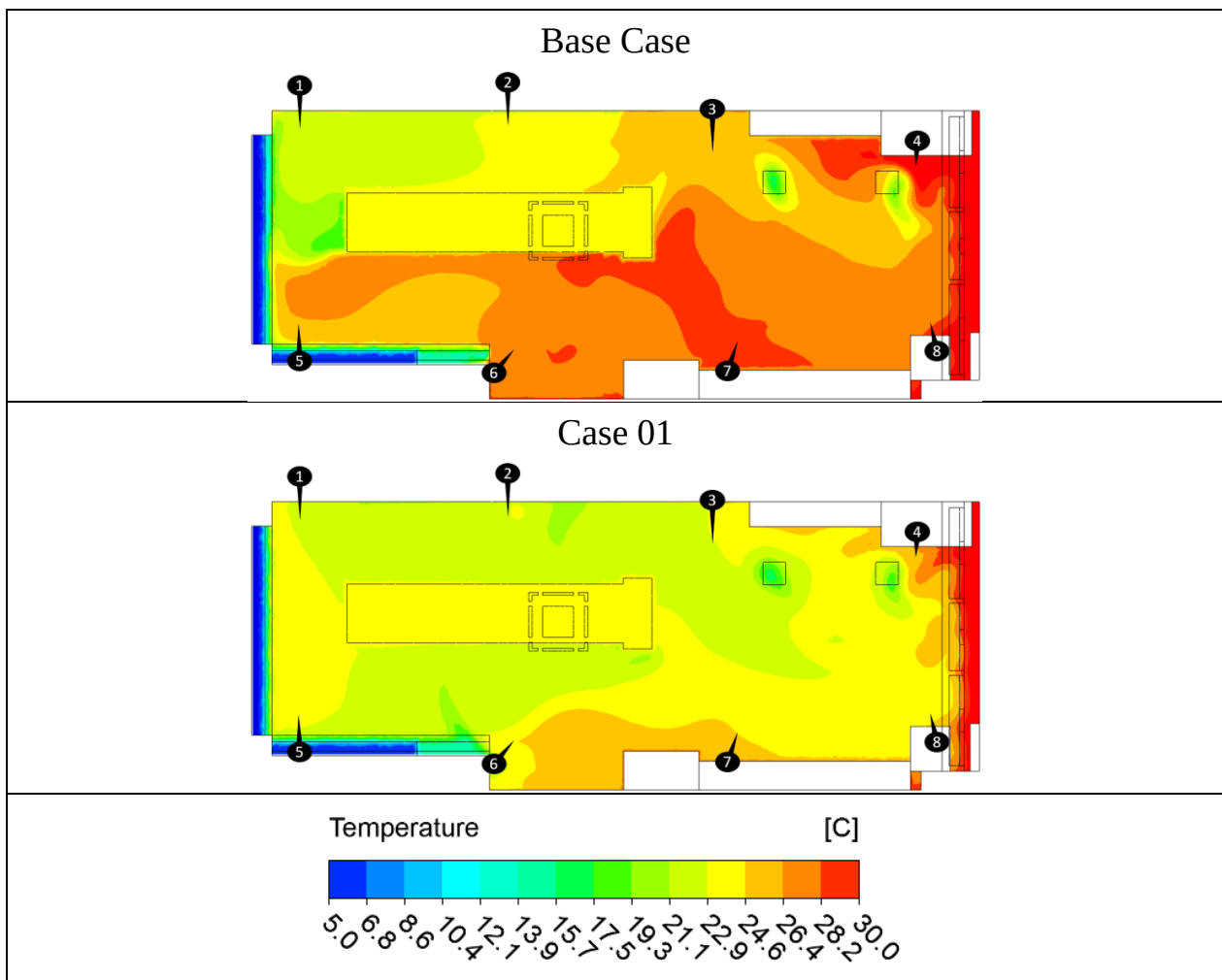


圖 3-1 案例一之離地 1.5m 溫度場分佈

表 3-1 案例一 Base Case 與 Case 01 溫度數值比較

點位	Case01	Basecase	差值
1	19.1	21.3	2.2
2	21	24.2	3.2
3	21.3	24.8	3.5
4	27.3	31.1	3.8
5	19.5	24.2	4.7
6	24	27.2	3.2
7	22.3	27.5	5.2
8	22.7	28.2	5.5
平均	22.2	26.1	3.9

由如圖 3-2 以及圖 3-3 中所示，可以明顯看出當沒有受到室外風速影響的情況(Case 01)，整體之溫度是比受到室外風速影響之情況(Base Case)還來的低。由於沒有室外風速破壞空氣簾，所以沒有室外高溫空氣的侵入，使得整體之溫度較低。

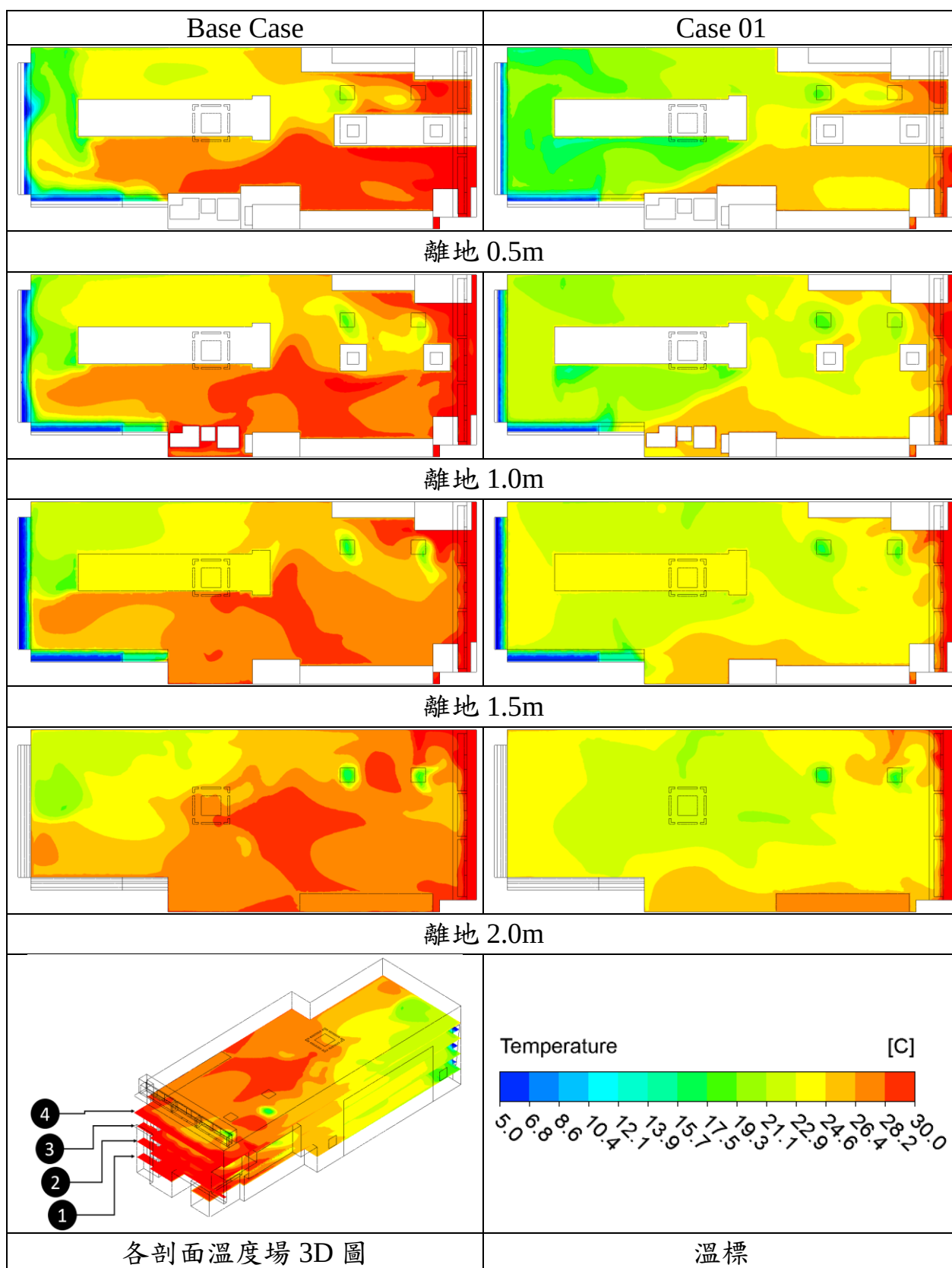


圖 3-2 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面溫度場分佈圖

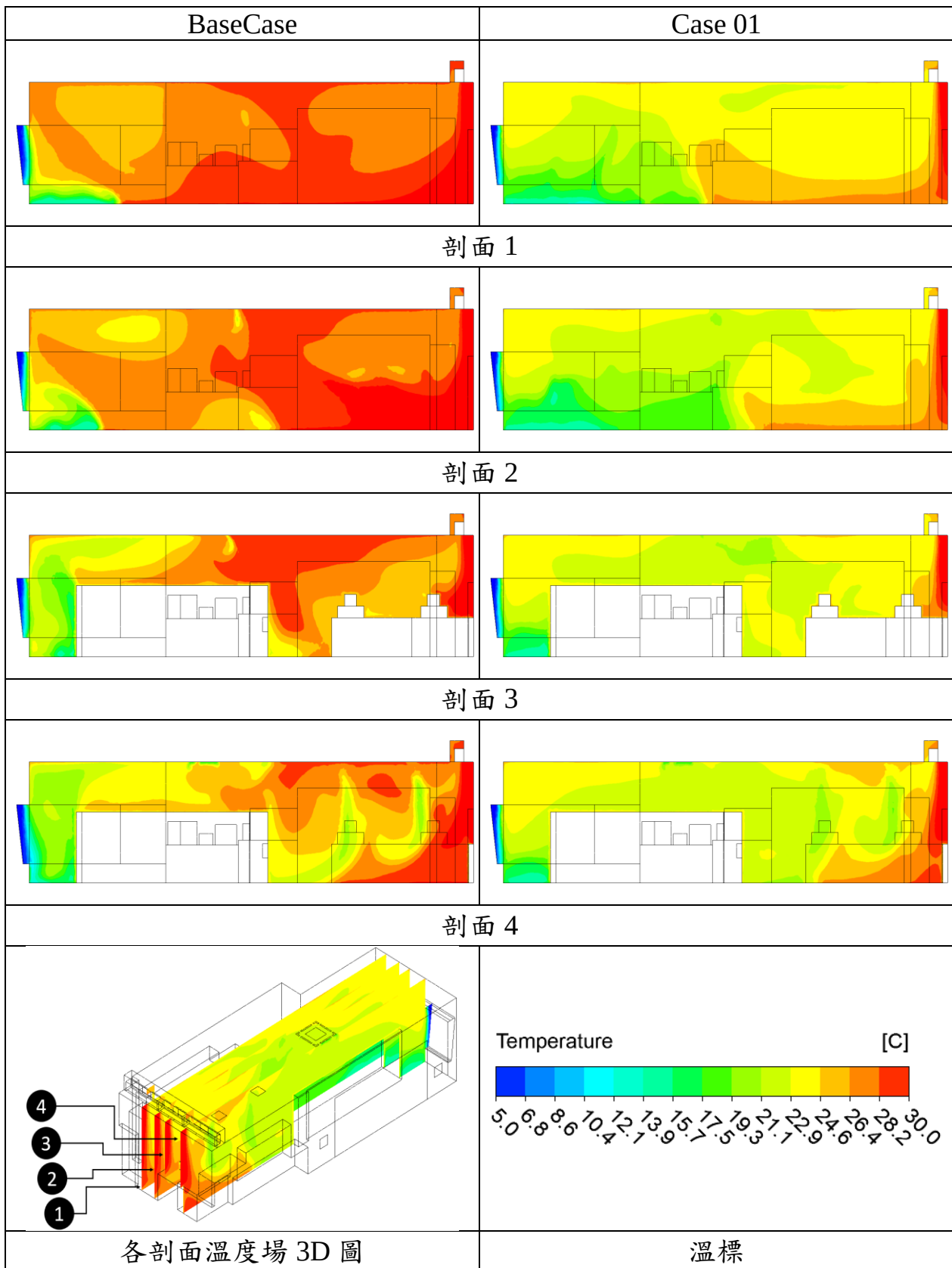


圖 3-3 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面溫度場分佈圖

3.1.2 速度場分析

如圖 3-4 所示，由門前之速度場比較，可以看到當室外風速影響會使整體空氣簾受到影響而被破壞，當沒有被室外風速影響的時候，整體空氣簾較能夠抵達到地面，使得整體空氣簾封閉的效果比較好。

由圖 3-5 以及圖 3-6 中所示，可以明顯看出當沒有受到室外風速影響的情況(Case 01)，整體之空氣簾是能夠送達地面，反而相較於受到室外風速影響之情況(Base Case)，空氣簾受到室外風影響，可以明顯看出空氣簾整體捲曲，使室外之空氣流入室內，可以明顯看出來整體空氣簾是被破壞的。如圖 3-5 分別為離地 0.5、1.0、1.5、2.0m 之水平剖面速度場，而圖 3-6 分別為四個垂直剖面速度場。

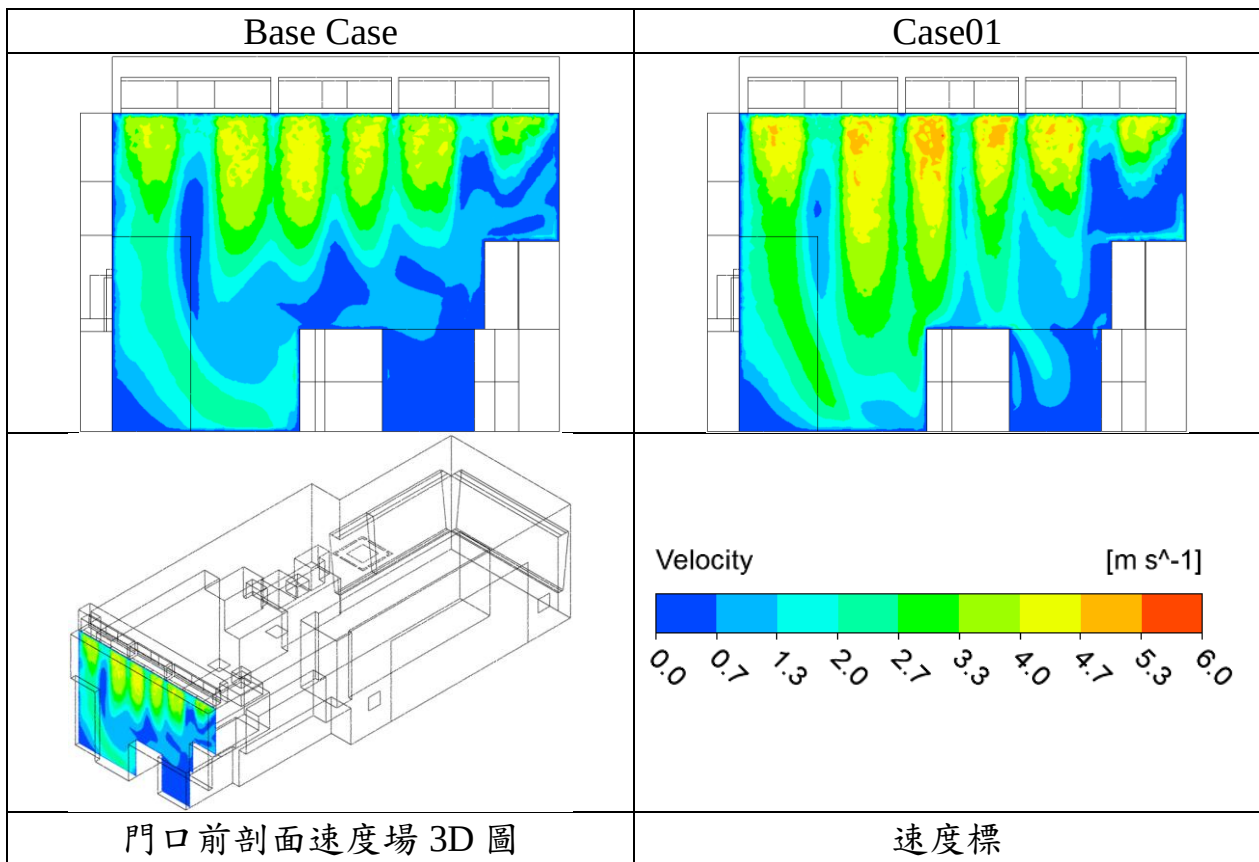


圖 3-4 案例一之 Base Case 與 Case 01 之門口前之速度分佈剖面比較

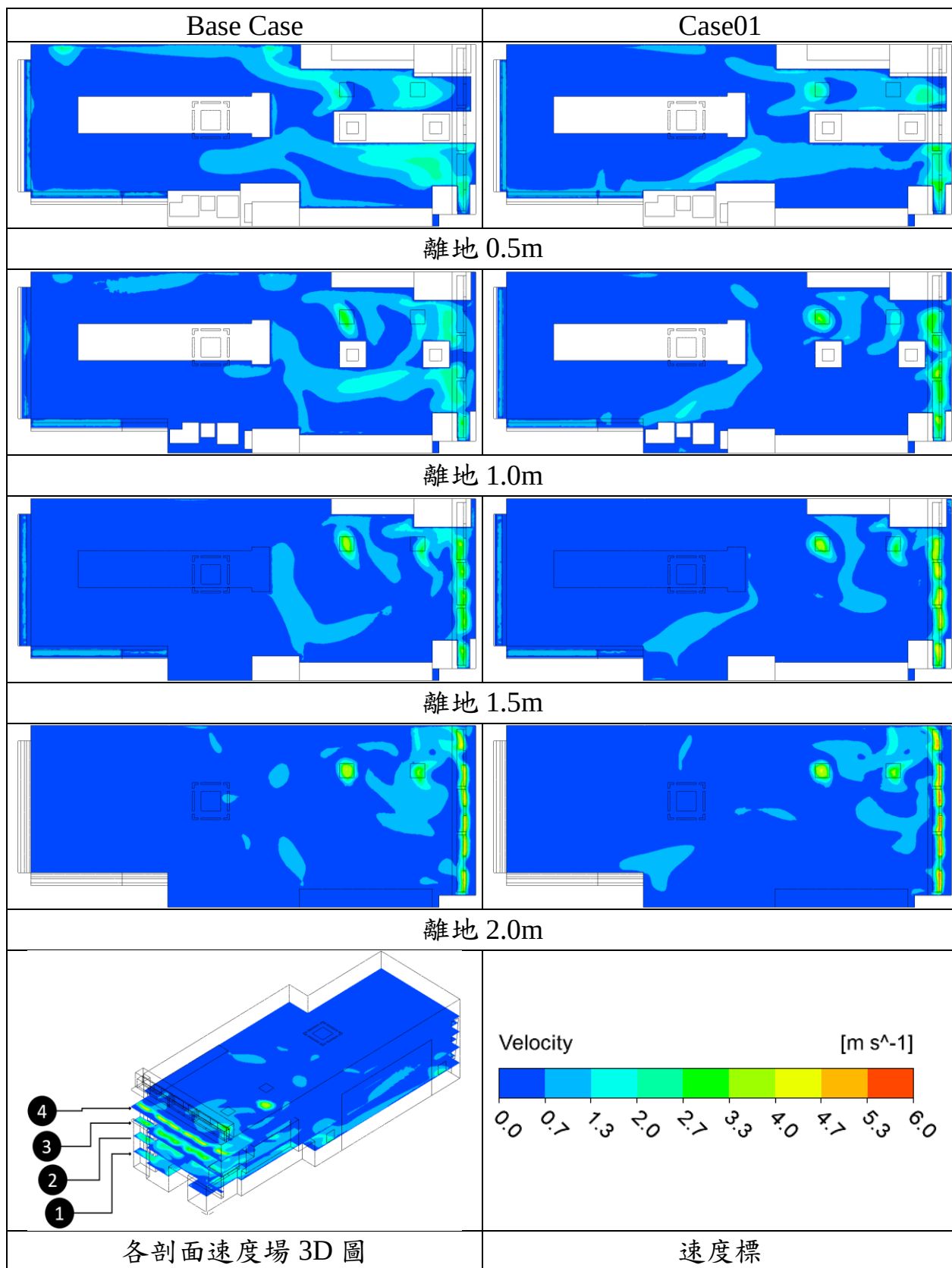


圖 3-5 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面速度場分佈圖

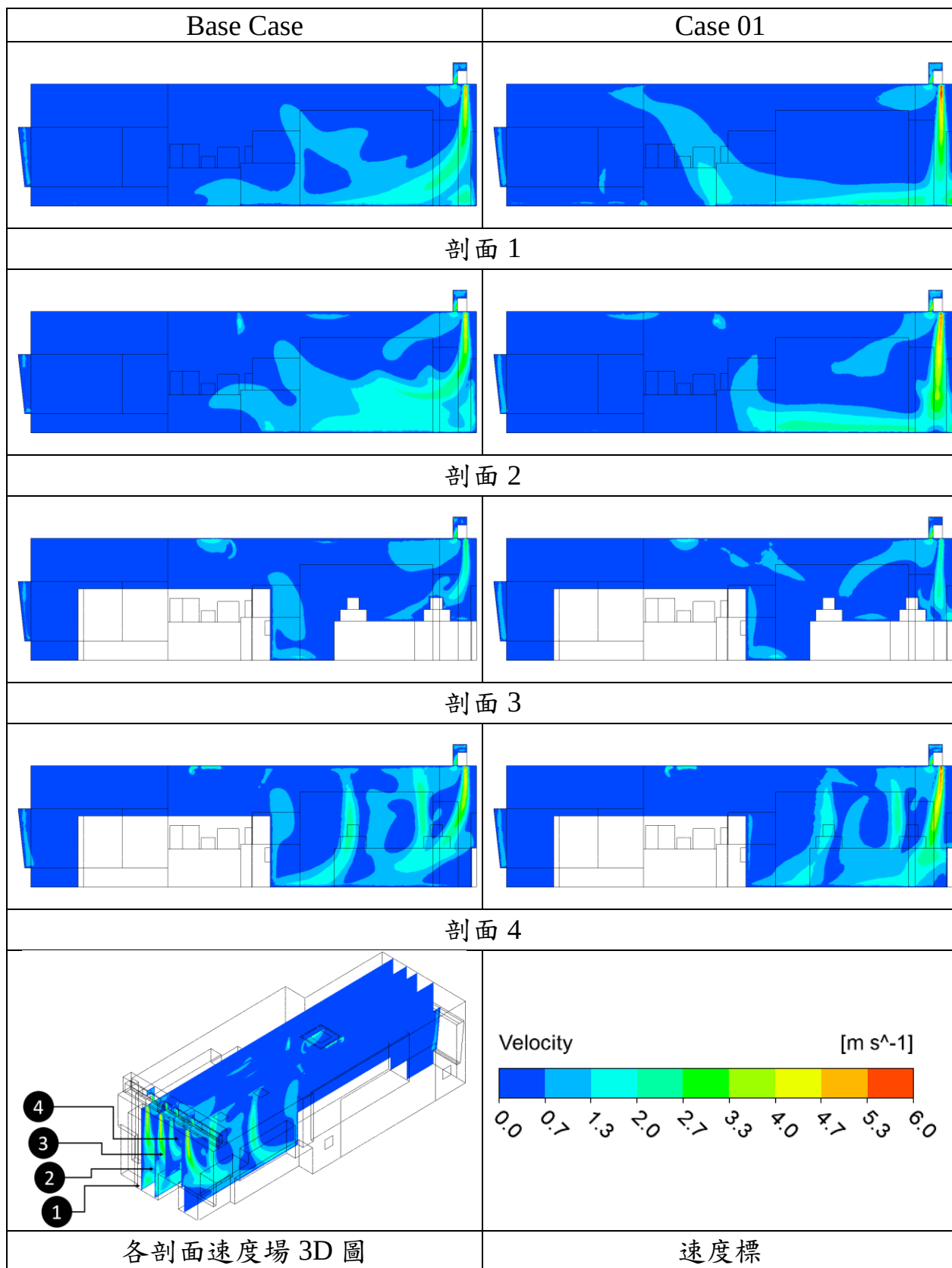


圖 3-6 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面速度場分佈圖

由圖 3-7 之 Base Case 與 Case 01 速度場分佈可以發現，當減少室外流場風速影響時，空氣簾的射流結構明顯較為完整，沒有發生流入突破情況，從 Case 01 圖中發現雖沒有產生室外流入，但空氣簾出風風速過高，使其射流撞擊到地面而往兩邊擴散情形，因此當無室外流場影響時，應降低空氣簾出風風速。

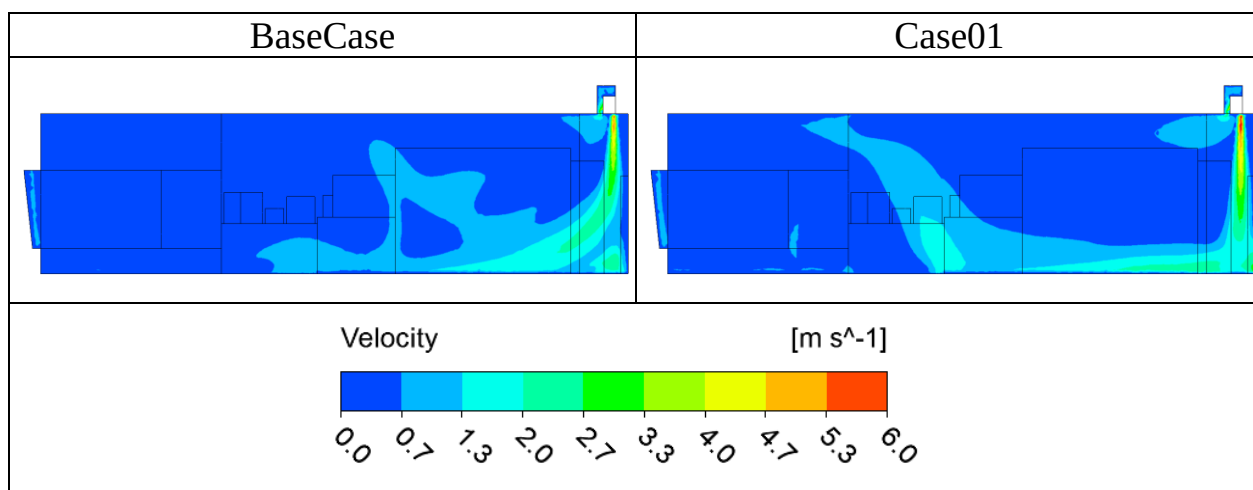


圖 3-7 案例一之 Base Case 與 Case01 速度場分佈

3.1.3 相對濕度分析

圖 3-8 分別為離地 0.5、1.0、1.5、2.0m 之水平剖面相對濕度分佈圖，而圖 3-9 分別為四個垂直剖面相對濕度分佈圖。如圖 3-8 及圖 3-9 所示，於開放櫃附近之區域相對濕度較高，但若比較兩者情況，當受室外風速影響之情況，整體相對濕度較低，因為外部空氣相對濕度相較於內部較低，所以當室外空氣侵入時，會讓室內之相對濕度降低。圖 3-9 之剖面 2 位於走道位置，且與門口相通，可以觀測到相對濕度受室外風速影響，所以相對濕度會提高，然而剖面 4 因為櫃台區域將門口侵入之空氣阻隔，所以兩個案例相差不大。

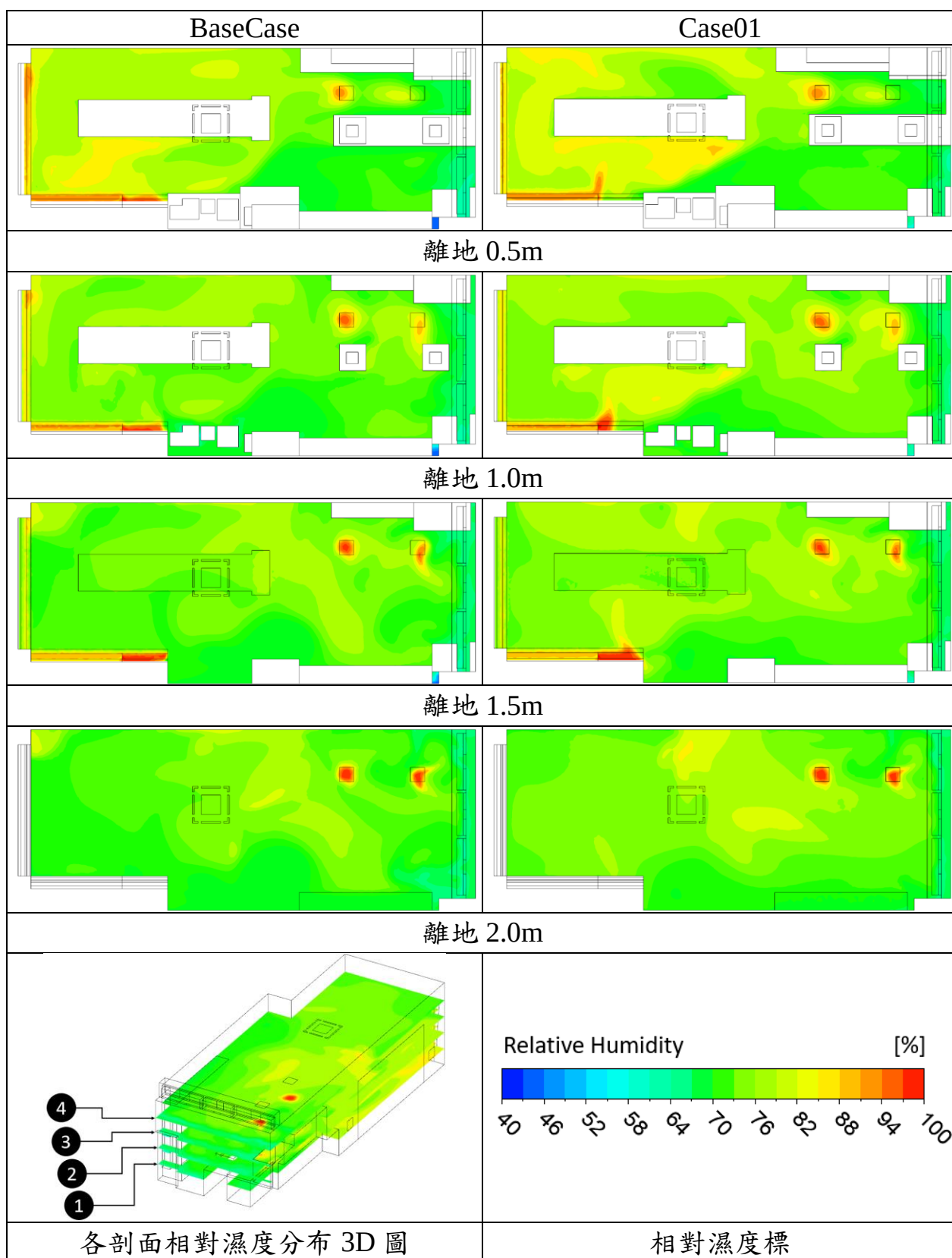


圖 3-8 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面相對濕度分佈圖

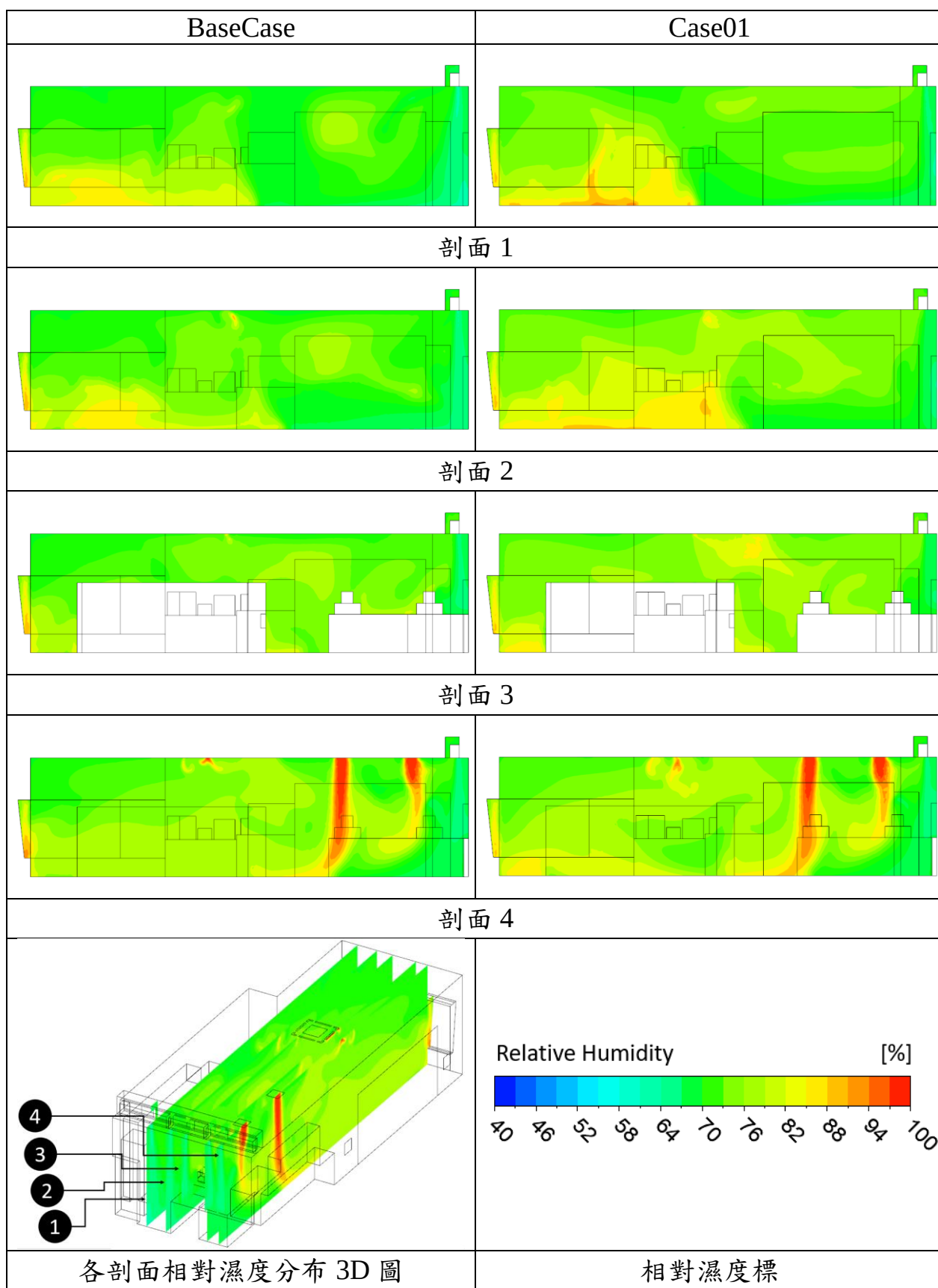


圖 3-9 案例一之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面相對濕度分佈圖

3.1.4 提升空氣簾封閉效果

由前述之分析結果可看出案例一空氣簾受到室外風速影響而被破壞，無法完全封閉，因此若將氣簾出風速度由 5.85 m/s 提高到 7.3 m/s (Case 02)，剛好射流可以達到地面時之改善效益，其模擬結果如所示。

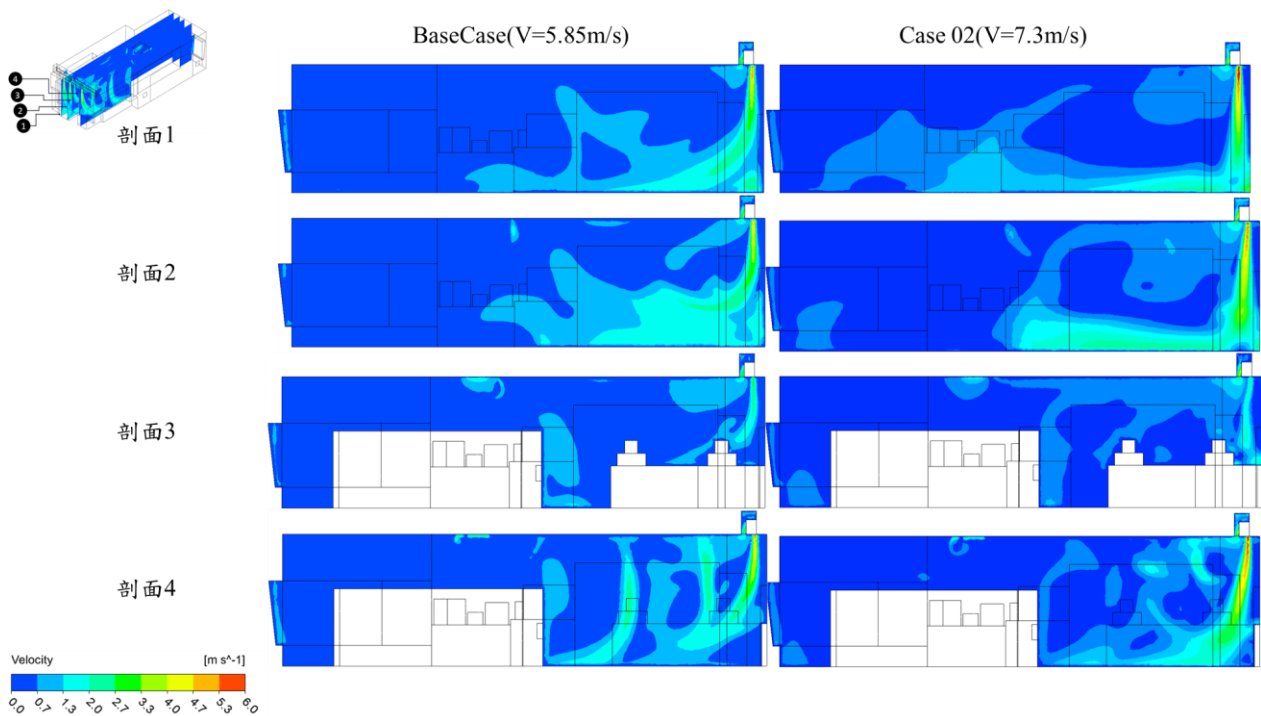


圖 3-10 案例一之 Base Case 與 Case 02 之各垂直剖面速度分佈圖

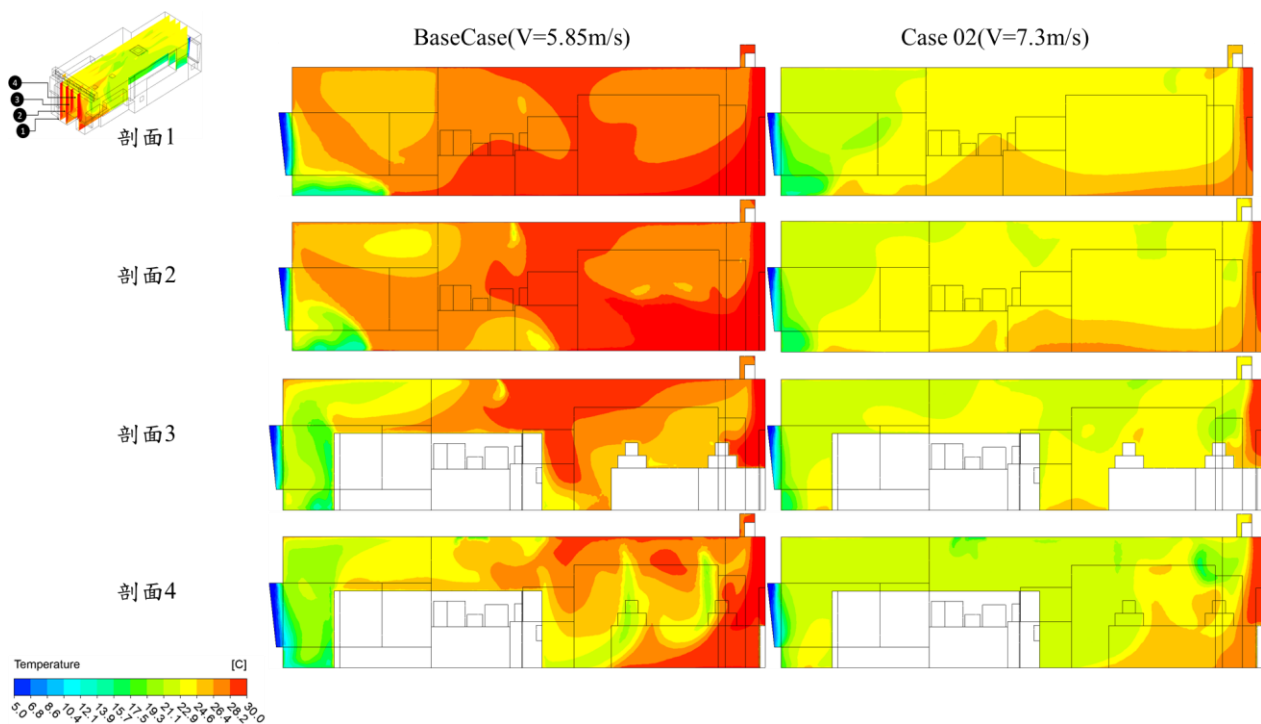


圖 3-11 案例一之 Base Case 與 Case 02 之各垂直剖面溫度分佈圖

3.1.5 節能效益評估

由前述模擬結果所示，室外風速對於室內空間之溫度、風場與相對濕度影響甚鉅，而空氣簾的應用對於整體店家在利用空調設備進行冷房時，可以達到一個良好的隔絕效果避免冷氣外洩。為了量化使用空氣簾可達到之效益，可以利用空調設備之耗電作為節能效益之評估。

本案例所使用之空調機之冷房能力為 13 kW，耗電量為 5 kW，而目前使用之空氣簾之耗電量為 1.12 kW，根據模擬數據所得出，受室外流場影響之案例(Base Case)，藉由室外空氣侵入室內之熱傳量為 2.16 kW，空調為排除該熱負荷所需耗電量為 0.831 kW，而因未調整空氣簾風速，所以空氣簾之耗電量不變，一樣維持 1.12 kW，所以整體因室外高溫空氣侵入室內，為排除室內熱負荷所需之耗電量為 1.951 kW。再依照模擬數據得出，當沒有室外流場影響之案例(Case 01)，整體熱負荷量為 748 W，空調為排除該熱負荷所需耗電量為 288 W，而因未調整空氣簾風速，所以空氣簾之耗電量不變，一樣維持 1.12 kW，

所以整體為排除室內熱負荷所需之耗電量為 1.408 kW。當提升空氣簾出風風速後(Case 02)，整體熱負荷量為 610 W，空調未排除該熱負荷所需耗電量為 235 W，並且因提升空氣簾風速，所以空氣簾之耗電量提升為 1.39 kW，所以整體未排除室內熱負荷所需之耗電量為 1.625 kW。

詳細之節能率計算結果如表 3-3 及表 3-2 所示，由三個案例之分析結果可看出其中 Case 01 在沒有外部風場條件下，空氣簾完美隔絕了室外環境，室內平均溫度降低 3.9℃，室內可以保持在較低溫的環境中，相對於 Base Case，Case 01 整體耗電量節省約為 27.84%，達到良好的節能效益。由 Base case 與 Case 01 速度場分佈可以發現，當減少室外流場風速影響時(Case 01)，空氣簾的射流結構明顯較為完整，沒有發生流入突破情況。另一方面，在外部風場破壞氣簾封閉效果之狀況下，若適當提升氣簾出風速度(Case 02)，則相對於 Base Case 而言，整體耗電量可節省約為 16.72%，效果顯著。

表 3-2 案例一之總耗電量以及節能率計算

CASE	外氣熱負荷	空調			風扇	總耗電量	節能率
	熱傳量	冷房能力	COP	耗電量	耗電量		
	kW	kW		kW	kW	kW	
BaseCase	2.160	13	2.6	0.831	1.12	1.951	--
Case 01	0.748	13	2.6	0.288	1.12	1.408	27.84%
Case 02	0.610	13	2.6	0.235	1.39	1.625	16.72%

表 3-3 案例一之熱傳量計算

CASE	位置	溫度	相對濕度	質量流率	濕度比	焓值	熱傳量	
		°C	%	kg/s	kgw/kga	kJ/kg	kW	
BaseCase	空調出風口	17.45	99.9	0.192	0.0126	49.58	9.51	總熱傳量 2.16kW
	櫃台出風口A	16.40	99.9	0.315	0.0117	46.21	14.56	
	櫃台出風口B	17.10	99.9	0.257	0.0123	48.46	12.45	
	開放櫃出風A	4.40	80.2	0.240	0.0041	14.74	3.53	
	開放櫃出風B	5.10	90.7	0.234	0.0048	17.21	4.02	
	開放櫃出風C	14.50	99.9	0.075	0.0102	40.46	3.02	
	進入店面之空氣	31.30	66.5	0.154	0.0192	80.81	12.40	
	空調回風口	25.40	62.7	0.192	0.0128	58.32	11.18	
	開放櫃回風A	10.10	99.9	0.240	0.0075	29.12	6.98	
	開放櫃回風B	7.90	99.9	0.234	0.0064	24.09	5.62	
	開放櫃回風C	16.60	99.9	0.075	0.0119	46.93	3.51	
	員工門上回風口	22.00	71.3	0.572	0.0119	52.51	30.04	
Case 01	空調出風口	17.45	99.9	0.192	0.0126	49.58	9.51	總熱傳量 0.748kW
	櫃台出風口A	16.40	99.9	0.315	0.0117	46.21	14.56	
	櫃台出風口B	17.10	99.9	0.257	0.0123	48.46	12.45	
	開放櫃出風A	4.40	80.2	0.240	0.0041	14.74	3.53	
	開放櫃出風B	5.10	90.7	0.234	0.0048	17.21	4.02	
	開放櫃出風C	14.50	99.9	0.075	0.0102	40.46	3.02	
	進入店面之空氣	31.30	66.5	0.091	0.0192	80.81	7.37	
	空調回風口	22.40	61.2	0.192	0.0105	49.36	9.46	
	開放櫃回風A	9.90	99.9	0.240	0.0074	28.66	6.87	
	開放櫃回風B	8.10	99.9	0.234	0.0065	24.55	5.73	
	開放櫃回風C	16.30	99.9	0.075	0.0116	45.86	3.43	
	員工門上回風口	20.30	69.8	0.598	0.0105	47.20	28.22	
Case 02	空調出風口	17.45	99.9	0.192	0.0126	49.58	9.51	總熱傳量 0.61kW
	櫃台出風口A	16.40	99.9	0.315	0.0117	46.21	14.56	
	櫃台出風口B	17.10	99.9	0.257	0.0123	48.46	12.45	
	開放櫃出風A	4.40	80.2	0.240	0.0041	14.74	3.53	
	開放櫃出風B	5.10	90.7	0.234	0.0048	17.21	4.02	
	開放櫃出風C	14.50	99.9	0.075	0.0102	40.46	3.02	
	進入店面之空氣	31.30	66.5	0.063	0.0192	80.81	5.07	
	空調回風口	21.50	61.2	0.192	0.0099	46.91	8.99	
	開放櫃回風A	9.70	99.9	0.240	0.0073	28.20	6.76	
	開放櫃回風B	7.90	99.9	0.234	0.0064	24.09	5.62	
	開放櫃回風C	16.20	99.9	0.075	0.0115	45.50	3.40	
	員工門上回風口	20.10	69.8	0.578	0.0104	46.74	27.01	

3.2 適當調降空氣簾出風速度之效益

3.2.1 溫度場分析

由本手冊之案例二的現場訪查結果可知，由於過大空氣簾射流，導致室內的空氣隨著空氣簾回風口的吸入，被噴出室外，使室內冷氣外洩，而且過大的回風口吸力，將使原本靠近回風口的天花板嵌入式全方吹產生的冷氣直接被吸出室外，造成室內的冷卻能力之損失，為此必須將空氣簾射流之風速由 Base Case 之 6.92 m/s 調降到 4.92 m/s 之 Case 01，以避免冷能向室外洩漏。圖 3-12 為離地 1.5m 下 Base case 與 Case 01 溫度場分佈情形，其數值比較如表 3-4 所示，由表中可以當空氣簾射流減少時，室外原本被室內冷能降溫的情形降低，提升室外空氣之溫度，代表室內空氣洩漏至外部之情形得到改善。

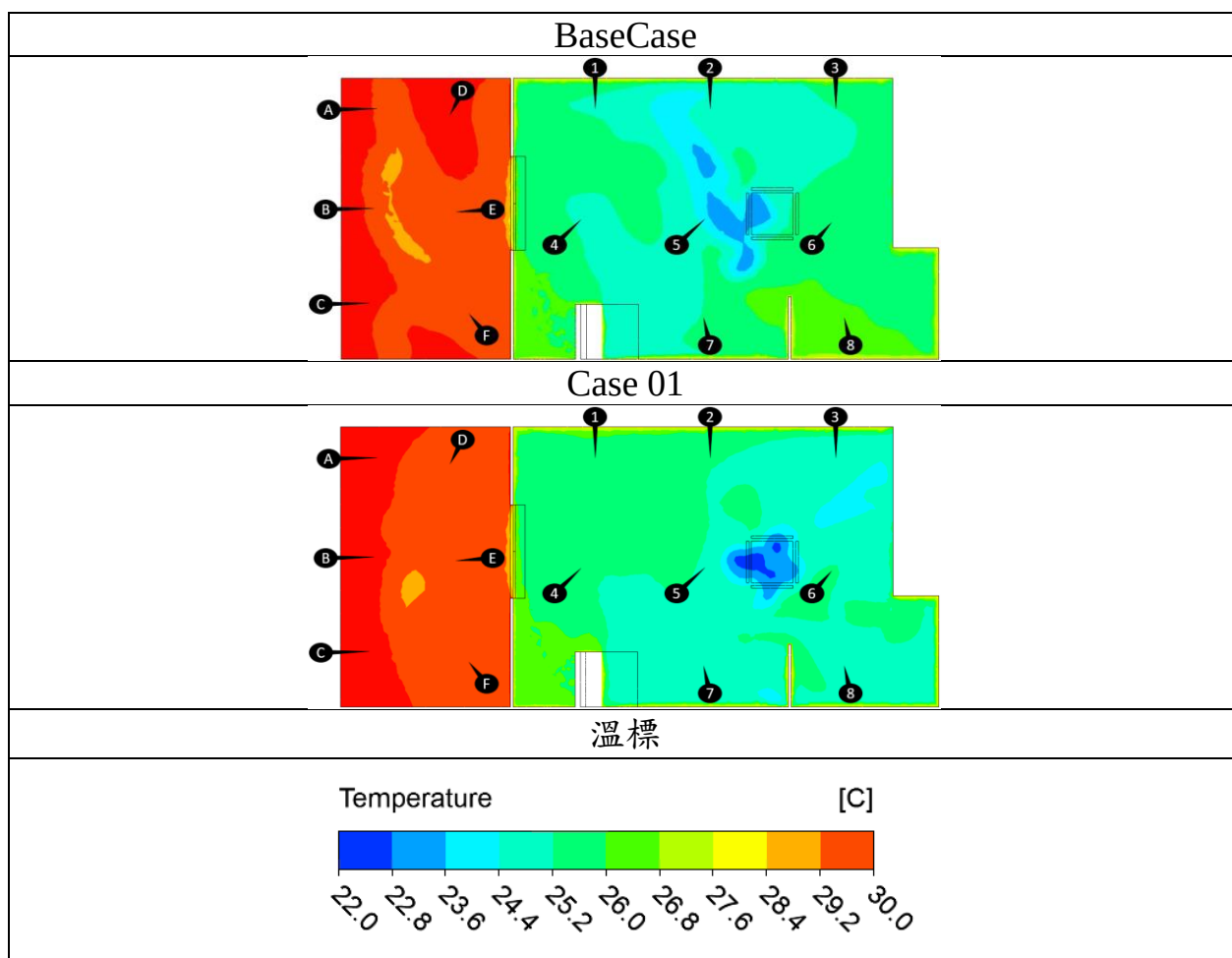


圖 3-12 案例二之離地 1.5m 溫度場分佈

表 3-4 案例二 Base Case 與 Case01 溫度數值比較

點位	Case01	Base case	差值
1	24	25.41	1.41
2	25.1	25.14	0.04
3	25.27	25.8	0.53
4	25.55	25.62	0.07
5	24.45	25.56	1.11
6	24.85	25.61	0.76
7	24.95	25.2	0.25
8	25.01	25.19	0.18
A	28.71	30.08	1.37
B	28.45	30.1	1.65
C	30	29.97	0.03
D	29.47	29.68	0.21
E	28.51	29.23	0.72
F	28.63	28.96	0.33

圖 3-13 分別為離地 0.5、1.0、1.5、2.0m 之水平剖面溫度場，而圖 3-14 分別為四個垂直剖面溫度場。由圖 3-13 以及圖 3-14，及從表 3-4 的點位 1~8 中，可以明顯看出當整體室內溫度狀況是趨近的，這代表其實空氣簾已經達到一定的封閉效率，可以有一定之能力達到室內及室外之空氣阻隔。由表 3-4 的點位 A~B 中，可以觀察出唯一差別是室外溫度的變化，當將空氣簾射流調降時，室內之冷空氣比較無法因過大的空氣簾射流，被洩漏至室外，從而使天花板嵌入式全方吹的效率降低，整體室外空氣回歸原來室外溫度之條件。

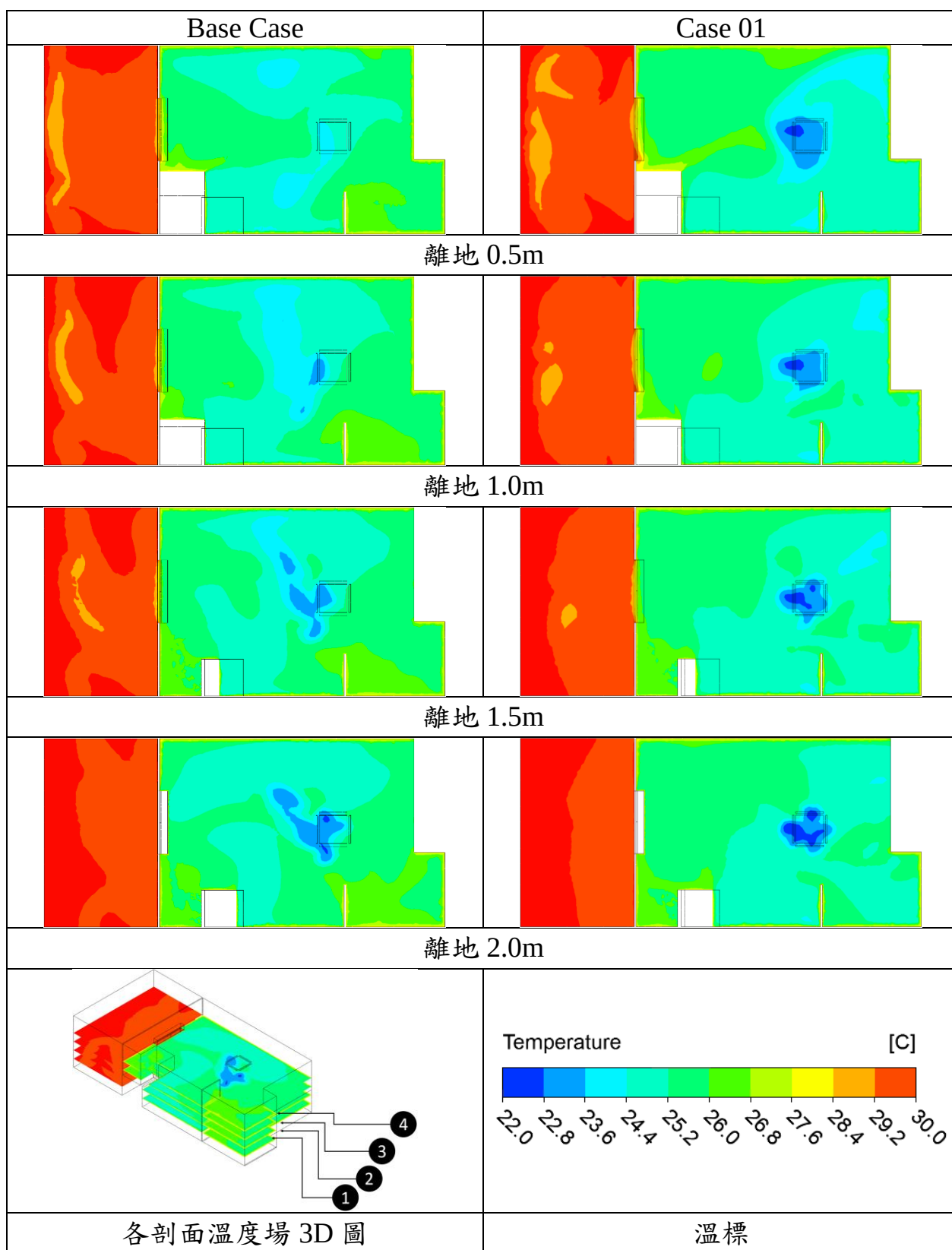


圖 3-13 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面溫度場分佈圖

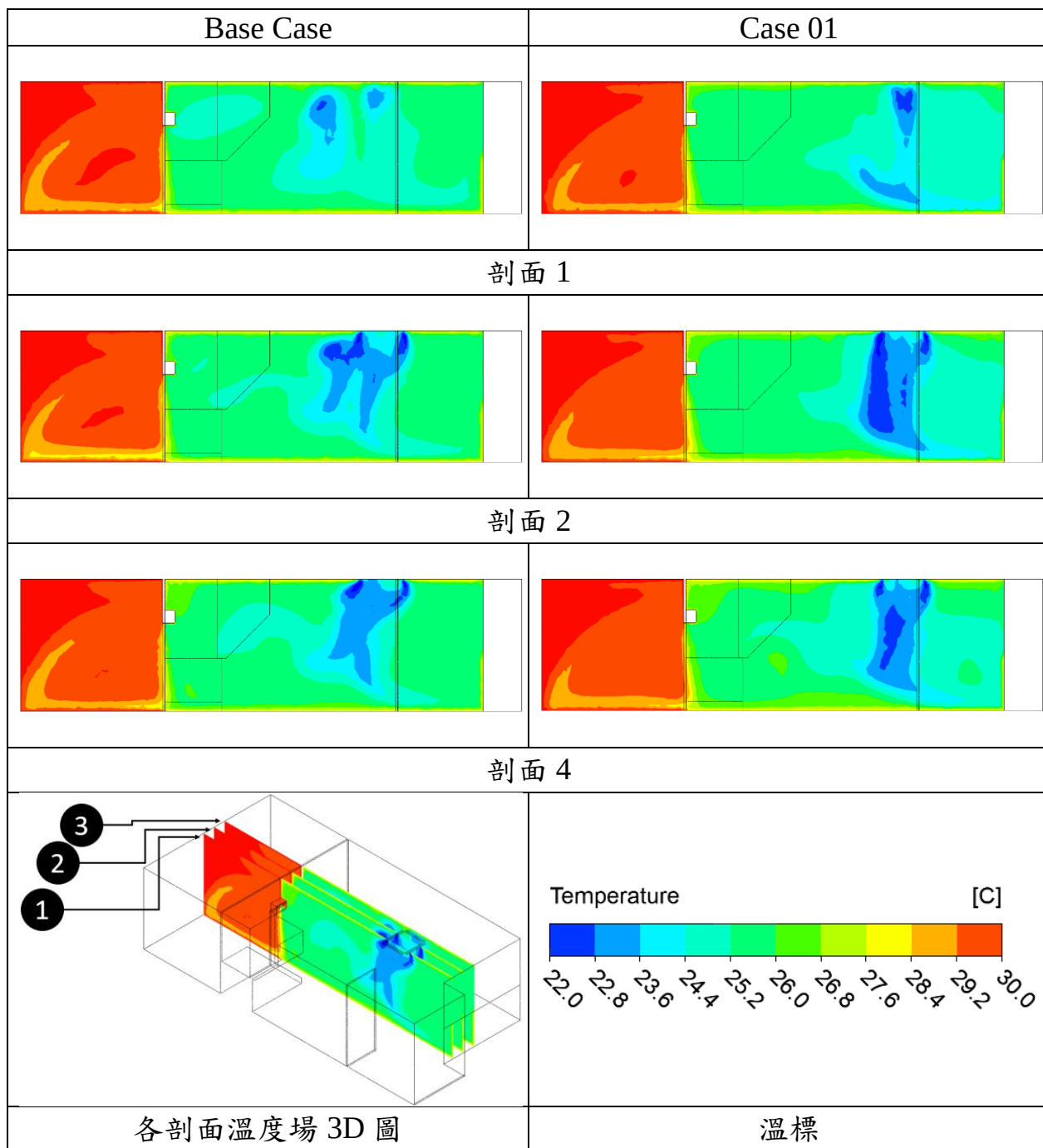


圖 3-14 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面溫度場分佈圖

3.2.2 速度場分析

由圖 3-15 所示門前之速度場比較，可以看到空氣簾之整體出風風速大幅降低。圖 3-16 分別為離地 0.5、1.0、1.5、2.0m 之水平剖面速度場，而圖 3-17 分別為四個垂直剖面速度場。由圖 3-16 以及圖 3-17 中所示，可以明顯看出當降低氣簾出風風速時(Case 01)，外部流場及室內流場會受到空氣簾氣流之影響與干擾，可降低冷能洩漏。

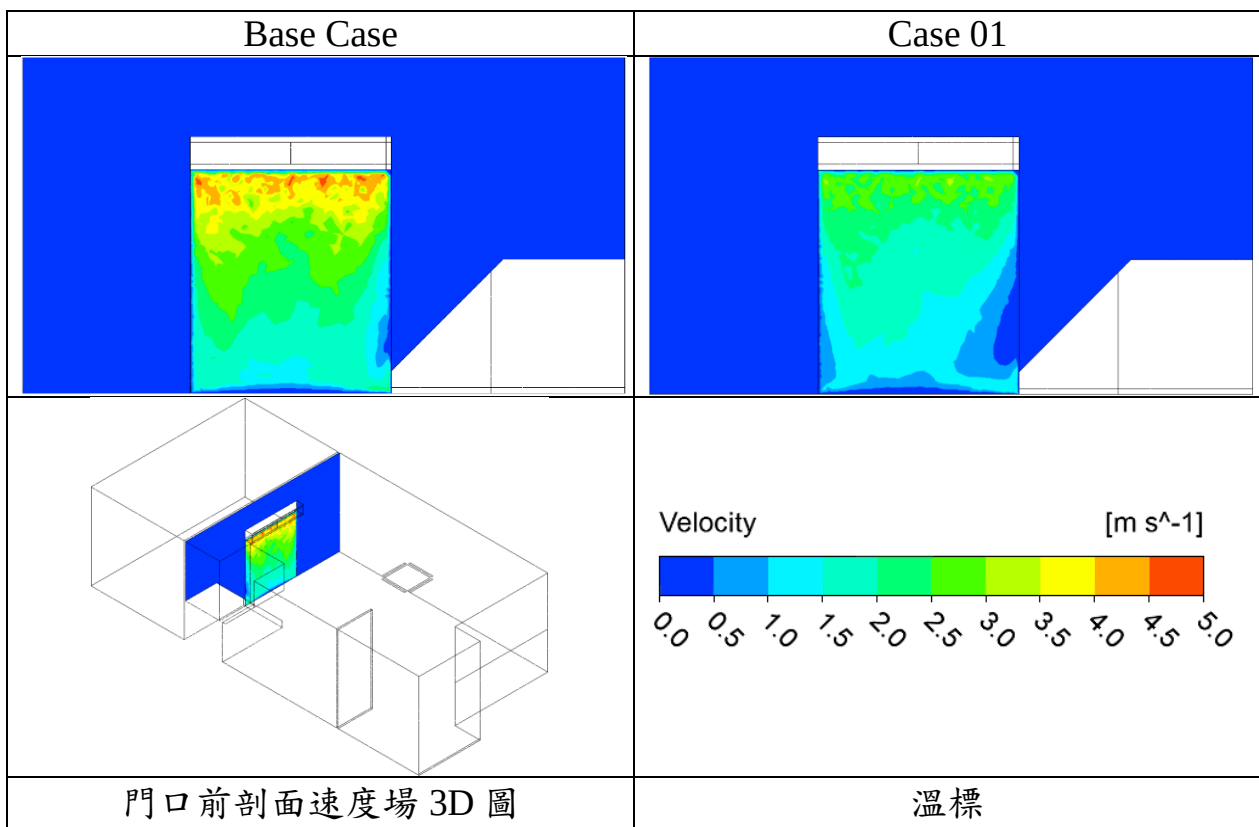


圖 3-15 案例二之 Base Case 與 Case 01 之門口前之速度分佈剖面比較

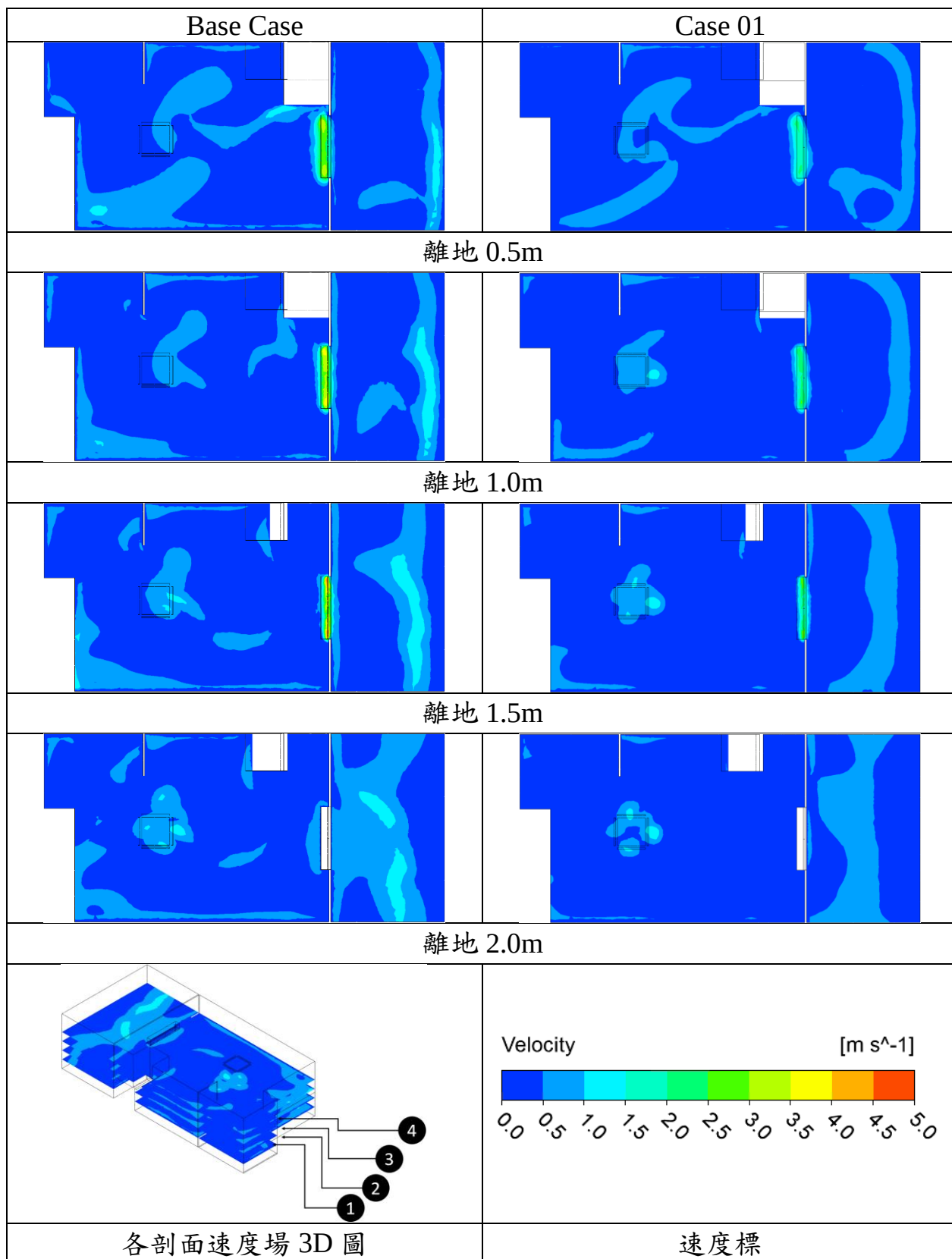


圖 3-16 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各水平剖面速度場分佈圖

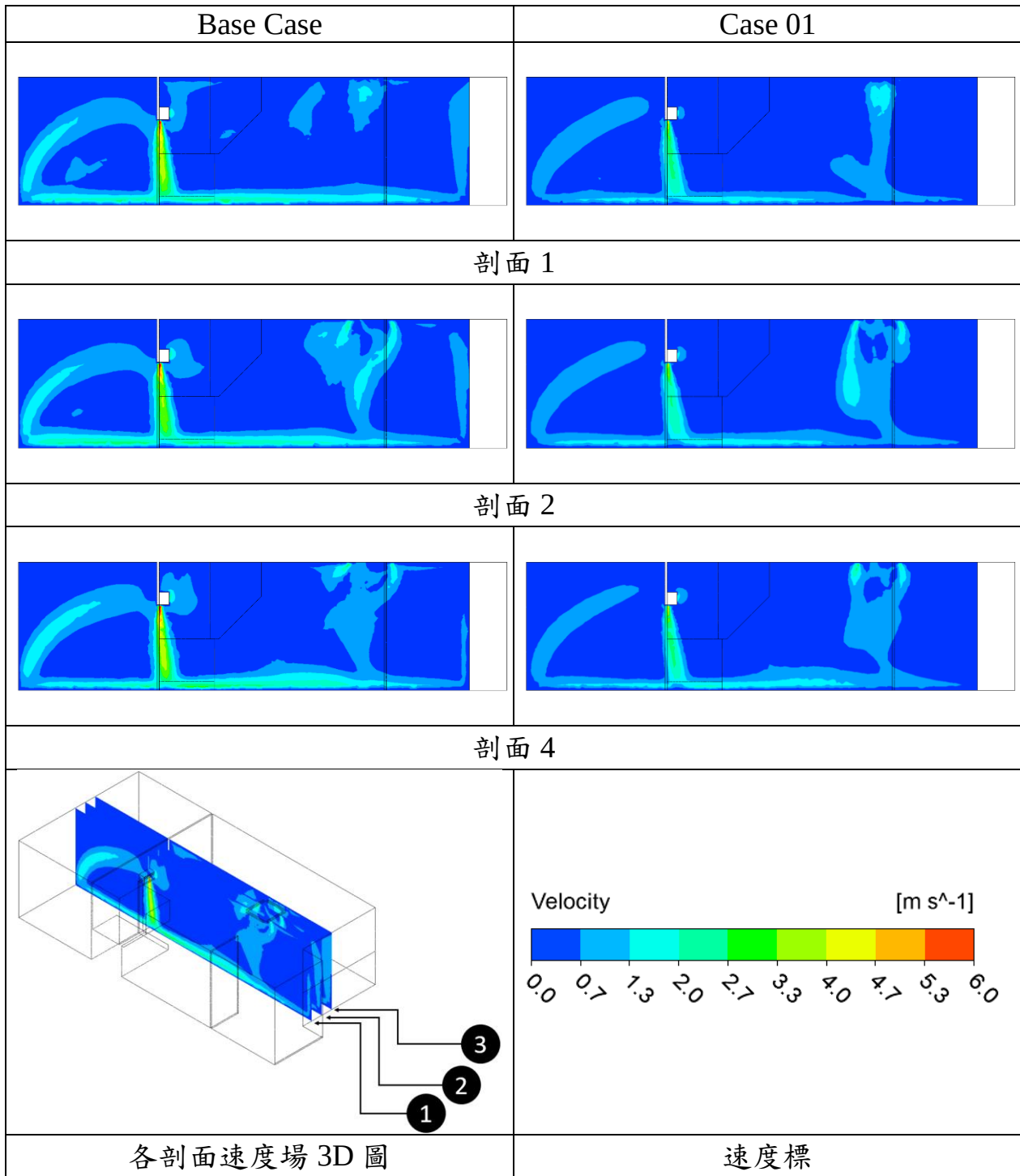


圖 3-17 案例二之 Base Case 與 Case 01 之各垂直剖面速度場分佈圖

由圖 3-18 之 Base Case 與 Case 01 速度向量分佈可以發現，當空氣簾射流較大(Base Case)時，室內之天花板嵌入式全方吹之供風會受到空氣簾回風口負壓影響而被吸過去，從而導致冷能之浪費，反之，當空氣簾設速適當(Case 01)時，上述之現象較為微弱，且天花板嵌入式全方吹之流場趨於穩定並向下吹拂。

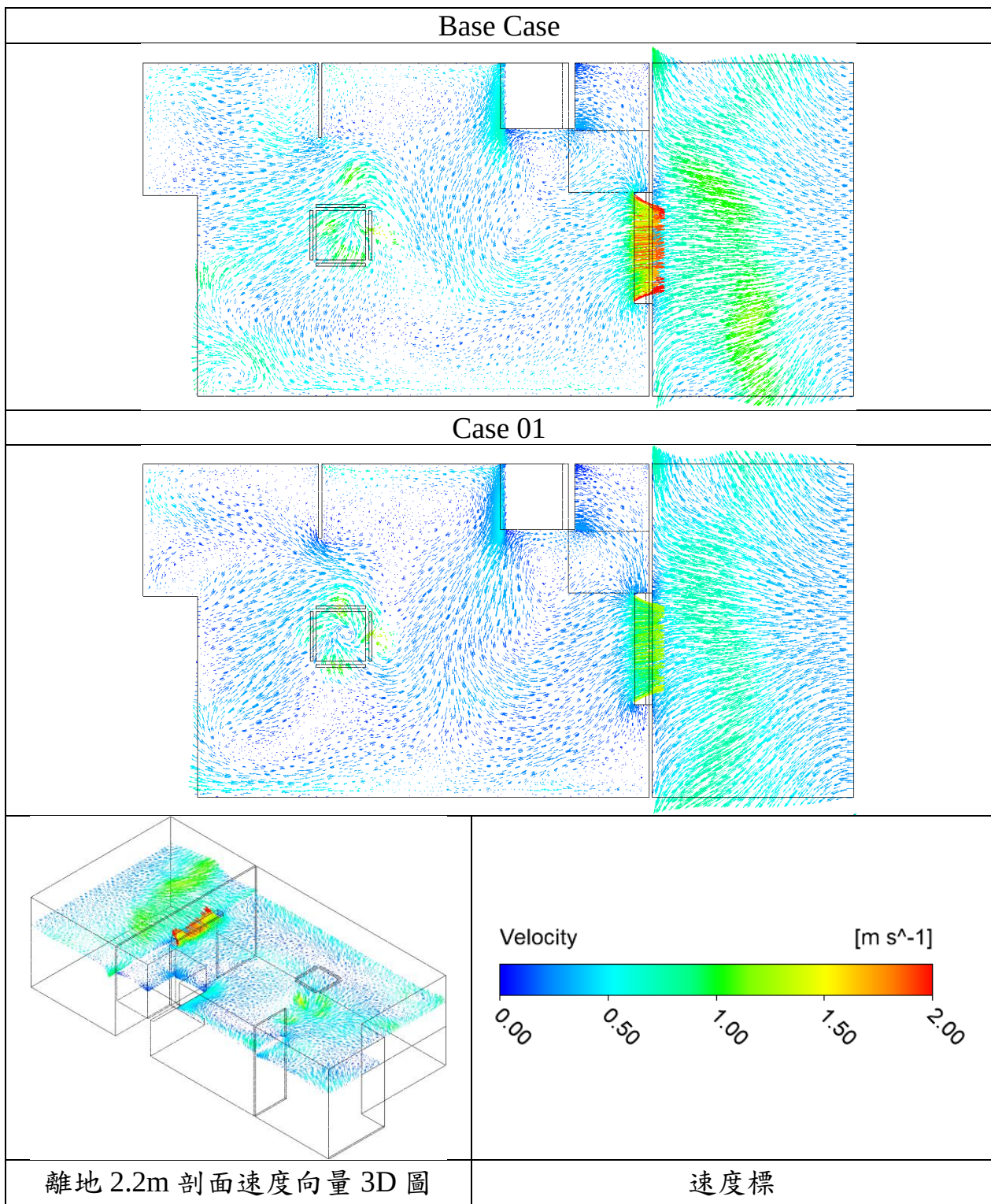


圖 3-18 案例二之 Base case 與 Case 01 於離地 2.2m 之速度向量分佈剖面比較

3.2.3 相對濕度分析

由於兩個案例皆屬於空氣簾封閉之狀態，故皆可與室外空氣達到完善之隔絕，室內之相對濕度變化不大，詳如圖 3-19 所示。

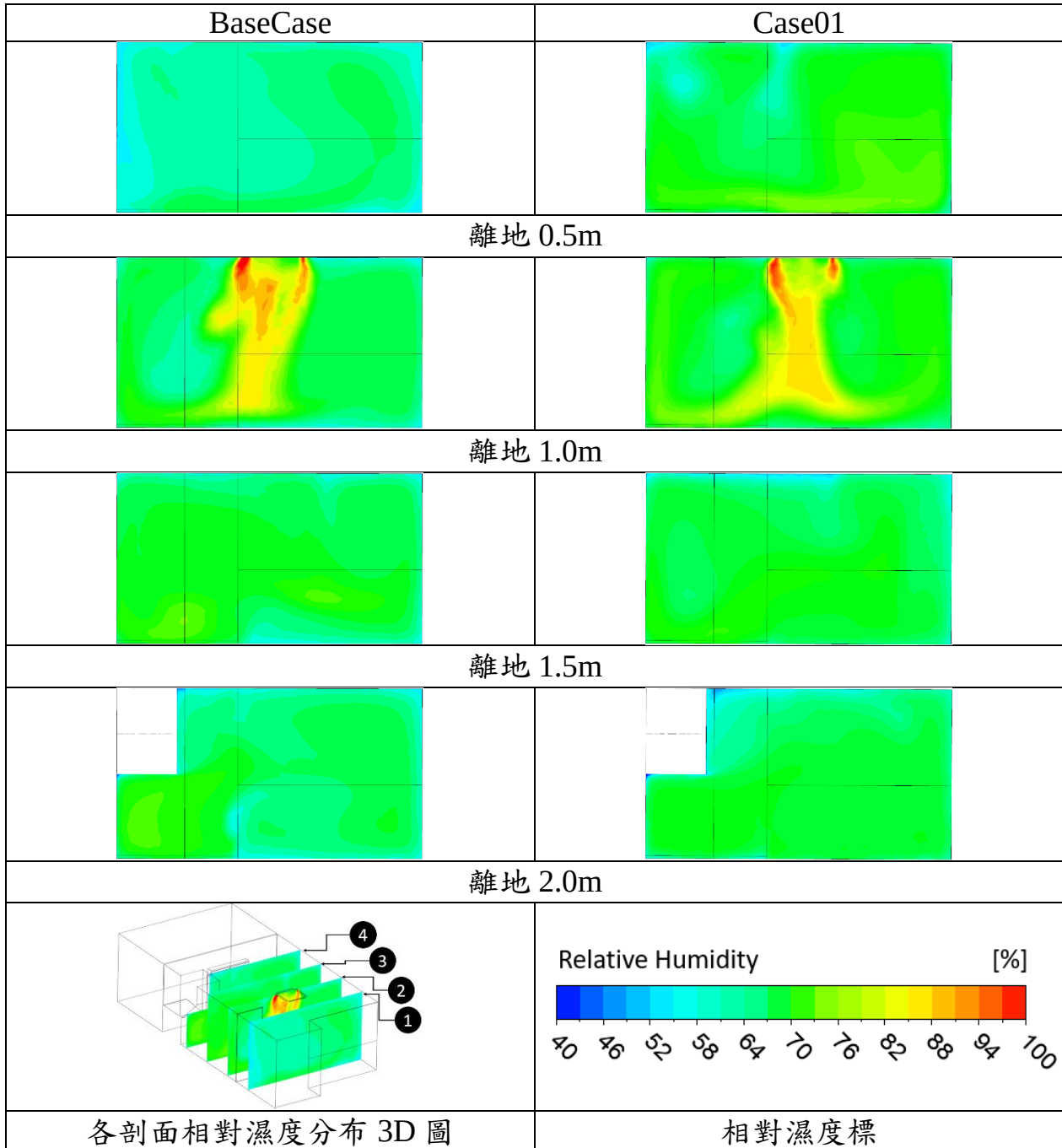


圖 3-19 案例二之 BaseCase 與 Case 01 之各水平剖面相對濕度分佈圖

3.2.4 節能效益評估

由前述模擬結果所示，室外風速對於室內空間之溫度、風場與相對濕度影響甚鉅，而空氣簾的應用對於整體店家在利用空調設備進行冷房時，可以達到一個良好的隔絕效果避免冷氣外洩。為了量化使用空氣簾可達到之效益，可以利用空調設備之耗電作為節能效益之評估。

本案例所使用之空調機之冷房能力為 7.2 kW，耗電量為 3 kW，而目前使用之空氣簾之耗電量為 0.75 kW，根據模擬數據所得出，受室外流場影響之案例(Base Case)，藉由室外空氣侵入室內之熱傳量為 810.43 W，空調為排除該熱負荷所需耗電量為 337.68 W，空氣簾之耗電量為 750W，所以整體因室外高溫空氣侵入室內，為排除室內熱負荷所需之耗電量為 1087 W。再依照模擬數據得出，當調降空氣簾轉速以降低空氣簾之射流影響之案例(Case 01)，整體熱負荷降為 642.8 W，空調為排除該熱負荷所需耗電量為 267.8 W，而因調降空氣簾風機轉速，所以空氣簾之耗電量亦下降為 384 W，所以整體為排除室內熱負荷所需之耗電量為 651.8 W。

詳細之節能率計算結果如表 3-5 及表 3-6 所示，最後比較兩個案例之總耗電量，Base Case 之耗電量為 1087 W，Case 01 之耗電量為 651.8 W，整體耗電量節省約為 40%，節能效果顯著。

表 3-5 案例二之總耗電量以及節能率計算

CASE	外氣熱負荷	空調			風扇	總耗電量	節能率
	熱傳量	冷房能力	COP	耗電量	耗電量		
	kW	kW		kW	kW	kW	
BaseCase	0.810	7.2	2.4	0.338	0.750	1.088	--
Case 01	0.643	7.2	2.4	0.268	0.384	0.652	40.06%

表 3-6 表案例二之熱傳量計算

CASE	位置	溫度	相對濕度	質量流率	濕度比	烔值	熱傳量	
		°C	%	kg/s	kgw/kg	kJ/kg	kW	
BaseCase	空調出風口	19.50	95.0	0.526	0.0134	53.57	28.17	總熱傳量 810W
	進入店面之空氣	30.10	60.0	0.519	0.0161	71.53	37.14	
	空調回風口	26.20	68.2	0.526	0.0144	62.89	33.08	
	樓梯口	26.00	68.2	0.245	0.0144	62.89	15.40	
	櫃台出口	24.70	68.2	0.272	0.0133	58.89	16.02	
Case 01	空調出風口	19.50	95.0	0.526	0.0134	53.57	28.17	總熱傳量 642.8W
	進入店面之空氣	30.10	60.0	0.513	0.0161	71.53	36.76	
	空調回風口	26.20	68.2	0.526	0.0144	62.89	33.08	
	樓梯口	26.00	68.2	0.237	0.0144	62.89	14.96	
	櫃台出口	24.70	68.2	0.276	0.0133	58.89	16.25	

四、空氣簾設備規劃及設計原則

藉由延續前一節之模擬分析結果，分析比較案場有無室外流場影響下空氣簾之節能效益，以及整理歸納適用於國內空氣簾應用之場域、節能技術與關鍵技術之報告，提供後續設計者之參考。

在前述文獻回顧中，Yang[8]等人通過實驗得知室外氣流的風速與風向會對空氣簾性能產生重大的影響，尤其在高風速下會穿透空氣簾下部，導致大量的氣流滲透，而較大的空氣簾出風風速與出風角度或增加室內壓力，有助於阻隔室外氣流的流入。Tomas Gil-Lopez[9]研究顯示，當空氣簾出風風速度太低時，空氣射流無法到達地面，導致空氣簾無法將室內空氣與外界環境隔離開來，且由於持續使用空調系統而產生的正壓，它會迫使室內空氣通過開口流至室外，導致空調系統更多的能耗；相反，當空氣簾出風風速的增加往往會與地面產生碰撞，在這種情況下，空氣從外到內的混合也會造成明顯的熱損失。根據李國仲[10]研究亦顯示，當空氣簾出風風速太強時，空氣簾產生之射流會與室內外氣流互相衝擊擾動，造成室內冷熱氣流混雜，影響室內環境舒適度；當空氣簾出風風速太弱時，無法有效隔絕室外空氣的滲透，若能與自動門的搭配，更可以維持室內冷(暖)氣效果，更可發揮空調系統效率達到節能效果。

由上述文獻顯示，當室外風場風速太大時，容意造成下半部的流入突破，使室外高溫高濕之氣流流入室內導致熱負荷增加，而當空氣簾出風風速過高時，射流撞擊地面空氣從外到內的混合造成明顯的熱損失，因此透過本次的輔導量測與模擬，適當的空氣簾出風風速有助於減少因空氣內外的混合所造的熱負荷增加，不管從模擬結果或文獻中都反應出室外流場對空氣簾有相當嚴重的影響，而如何降低空氣簾射流被室外所影響，是本手冊探討的主題之一。

4.1 空氣簾出風速度估計方法

由 Hayes and Stoecker [19] 等人，開發一種輔助空氣簾設計的分析模型-撓曲模型方程式，用以表示空氣簾射流的撓度 D_m ，如公式(4.1)所示，其中 ρ_0 空氣簾出風密度(kg/m^3)、 b_0 為空氣簾出風口寬度(m)、 v_0 為空氣簾出風風速(m/s)、 g 為重力加速度(m/s^2)、 H 為門口高度(m)、 ρ_c 與 ρ_w 分別為室內與室外空氣密度(kg/m^3)，並且將空氣簾射流剛好達到地面定義為最佳條件，射流未到達地面定義為突破條件。

$$D_m = \frac{\rho_0 b_0 v_0^2}{g H^2 (\rho_c - \rho_w)} \quad (4.1)$$

為確保空氣簾射流能以最小出風風速運行以達到最好效率，Hayes and Stoecker[19]提出最小撓曲模型方程式 $D_{m.\min}$ ，如公式(4.2)與(4.3) 所示，其中公式(4.2) α_0 為空氣簾出風角度、 α_f 為射流撞擊地面角度，如圖 4-1 所示。公式(4.3)正負號取決於相對於阻隔環境的內部或外部（+用於外部，-用於內部），本手冊主要探討阻隔室外環境，因此公式(4.3)採用+號。

$$D_{m.\min} = \frac{-\sin\alpha_f - \sin\alpha_0 + 2 - 2\sqrt{(1 - \sin\alpha_f)(1 - \sin\alpha_0)}}{2(\sin\alpha_f - \sin\alpha_0)^2} \quad (4.2)$$

$$\sin\alpha_f = \pm 2.4 \sqrt{\frac{b_0}{H}} \left(1 - 2.56 \frac{b_0}{H}\right) \quad (4.3)$$

由公式(4.2)所計算之 $D_{m.\min}$ 帶回公式(4.1)經移項後可得出 $V_{0.\min}$ 方程式，如公式(4.4)所示，在一般無室外流場風速條件下，式(4.4)計算之 $V_{0.\min}$ 足以確保空氣簾射流可達到地面，產生良好的阻隔效果。

$$V_{0.\min} = \sqrt{\frac{g H^2 (\rho_c - \rho_w) D_{m.\min}}{\rho_0 b_0}} \quad (4.4)$$

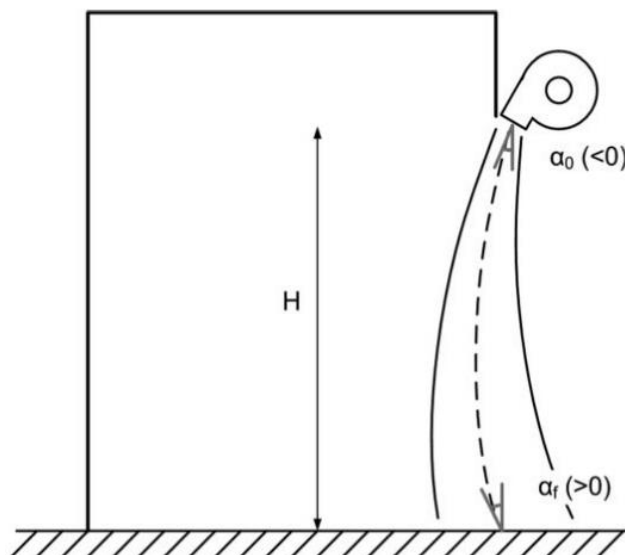


圖 4-1 空氣簾設計的分析模型

4.2 空氣簾封閉效率計算方法

為將空氣簾封閉效率量化，根據 Gregory[15]等人研究，提出空氣簾封閉效率計算公式如公式(4.5)所示，其中 q 為空氣簾運轉時由室外流場風速與空氣簾射流熱對流所造成之熱負荷(kW)、 q_{open} 為空氣簾關閉時室外流場風速通過門口之熱負荷(kW)。

$$\eta = 1 - \frac{q}{q_{open}} \quad (4.5)$$

q_{open} 計算如公式(4.6)所示，其中 v 為通過門口時之平均風速(m/s)、 A 為門口面積(m^2)、 ρ_w 為室外環境密度(kg/m^3)、 h_w 與 h_c 為室外與室內環境焓值(kJ/kg)。ASHRAE-Handbook 中 Gosney and Olama[20]研究提出在冷藏室條件下 $q_{open.ashrae}$ 之計算方程式如公式(4.7)。

$$q_{open} = v \times A \times \rho_w \times (h_w - h_c) \quad (4.6)$$

$$q_{open.ashrae} = 0.221A(gH)^{0.5}(h_w - h_c)\rho_c \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_c}\right)^{0.5} \left(\frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^{1.5} \quad (4.7)$$

q 主要傳熱方式為室外流場與空氣簾出風射流之熱對流所引起，故其計算如公式(4.8)所示， h_{conv} 為熱對流係數(W/m^2K)、 ΔT 為室內外的溫差 $\Delta T = T_w - T_c$ 。本手冊將藉由模擬分析，可求得在各種條件下之 h_{conv} ，並且可將其將帶入公式(4.9)計算紐賽森數，獲得相關空氣簾熱損失計算之對流係數預測方程式，其中 λ 為空氣熱傳導係數($W/m-K$)。

$$q = h_{conv} \times A \times \Delta T \quad (4.8)$$

$$N_u = \frac{h_{conv} H}{\lambda} \quad (4.9)$$

4.3 空氣簾最佳出風速度評估

由既有之相關文獻得知，當空氣簾出風風速太低時，射流無法達到地面產生嚴重流入突破，當出風風速過大時，射流撞擊地面造成室內外空氣嚴重的混合增加室內熱負荷。由於 Hayes and Stoecker [19]提出撓曲參數 D_m 計算公式(4.1)，以推算導最小出風風速之公式並無考量室外風場影響，為了確保在有外部風場及台灣本土氣候條件下，空氣簾出風射流可以完整達到地面，不會發生流入或流出突破的情形發生，本手冊參考綠基會委託臺北科技大學執行之研究報告(李魁鵬[21])，說明針對不同垂直於商店門口之騎樓外部戶外風場風速、出風高度、出風口寬度、室內外溫差等參數，利用田口直交表進行參數組合設計，對於影響氣簾封閉效率之主要參數進行模擬評估，得出各組設計條件下，空氣簾之射流可以順利達至地面而沒被破壞之所需最小出風風速。該研究直交表採 $L_{32}(2^1 \times 4^3)$ ，兩水準因子 1 個，四水準的因子 3 個，一共模擬 32 組，以最少的實驗成本獲得最佳結果。

4.3.1 空氣簾設計模擬分析方法

為觀察不同室外流場對空氣簾射流影響情形，並且考慮不同門口高度與空氣簾出風口寬度之組合，該研究建立本土一般騎樓常見之典型商店模型，門口開口大小為寬 1.2m*高 2.0m，在室內門口位置上方設置一台與門口等寬的空氣簾，其空氣簾尺寸為長 1.2m*寬 0.2m*高 0.3m，如圖 4-2 所示紅色框為門口、橘色框為空氣簾。本模擬主要探討單一商家門口，所以左右兩旁相鄰的商家被假設為牆面，不納入模擬考量裡，室外空間只考慮騎樓的空間，其長度為 10 倍的室內寬度，依照建築技術規則建築設計施工編第 57 條：寬度自道路境界線至建築物地面層外牆面，不得小於 3.5 公尺，故室外空間寬度採用 3.5m，騎樓樓高則與商家高度同為 3m，示意圖如圖 4-3 所示。室內環境溫度為 26 °C、相對濕度 60%之空調環境。詳細之氣流模擬理論與方法，請參見綠基會委託國立臺北科技大學執行之計畫報告書(李魁鵬[21])。

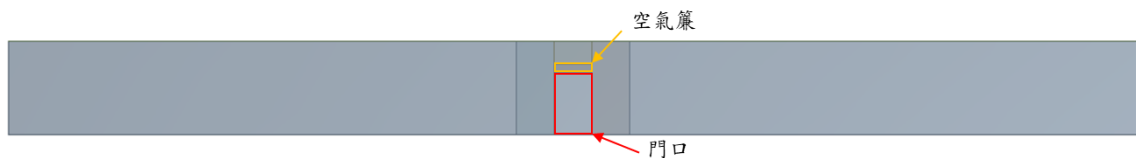


圖 4-2 氣流模擬分析模型平面圖

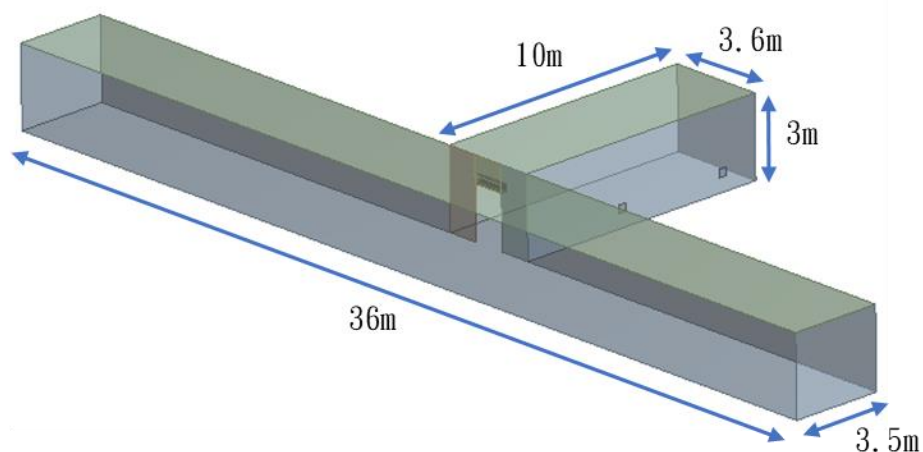


圖 4-3 氣流模擬分析模型與尺寸

4.3.2 空氣簾性能影響參數與模擬實驗設計

參考前述之相關研究文獻，主要影響空氣簾性能之參數包含空氣簾出風口寬度、室內外溫差、空氣簾架設高度以及室外流場風速等 4 個因子。由於參數較多，因此採用田口法進行模擬實驗之設計，針對這 4 個因子之組合變化，模擬計算出對應之空氣簾最小出風風速，各因此之編號代碼分別為：

1. 因子 A：空氣簾出風口寬度
2. 因子 B：室內外溫差
3. 因子 C：空氣簾架設高度
4. 因子 D：室外流場風速

為取得各不同參數組合下空氣簾最小出風風速，以便能達到良好氣簾阻隔效果，該研究採用兩水準的因子一個與四水準的因子三個，各因子之水準值如表 4-1 所示，其模擬實驗之直交表採用 L_{32} ，如表 4-2 所示。

表 4-1 模擬因子水準表

因子編號	因子種類	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4
A	出風口寬度(m)	0.06	0.1		
B	室內外溫差(°C)	6	8	10	12
C	架設高度(m)	2	2.2	2.4	2.6
D	室外風速(m/s)	0	0.3	0.6	0.9

表 4-2 模擬 L_{32} 直交表

NO	A	B	C	D
01	1	1	1	1
02	1	1	2	2
03	1	1	3	3
04	1	1	4	4
05	1	2	1	1
06	1	2	2	3
07	1	2	3	4
08	1	2	4	2
09	1	3	1	2
10	1	3	2	1
11	1	3	3	4
12	1	3	4	3
13	1	4	1	3
14	1	4	2	4
15	1	4	3	2
16	1	4	4	1
17	2	1	1	4
18	2	1	2	1
19	2	1	3	3
20	2	1	4	2
21	2	2	1	3
22	2	2	2	1
23	2	2	3	2
24	2	2	4	4
25	2	3	1	1
26	2	3	2	2
27	2	3	3	3
28	2	3	4	4

NO	A	B	C	D
29	2	4	1	2
30	2	4	2	4
31	2	4	3	3
32	2	4	4	1

4.3.3 室外風速 0m/s 模擬結果分析

圖 4-4 為當無室外流場時，各不同因子組合下在 x 軸向 18m 處之速度分布圖，由公式(4.2)所計算各組之 $V_{0.min}$ 足以匹配在室外風速為 0m/s 時空氣簾最小出風風速之模擬值 V_0 ，相關數值如表 4-3 所示。由圖 4-5 溫度分布情形可以發現空氣簾有效的將室外熱空氣阻隔在外，僅因空氣簾出風與室外空氣產生一些熱對流，造成在門口處室外高溫往室內擴散之情形。

表 4-3 室外風速 0m/s - V_0 計算表

NO	$D_{m.min}$	$V_{0.min}$	模擬 V_0	平均 $V_{0.min}$	平均 V_0
01	0.1569	1.46	1.46	1.79875	1.79875
05	0.1569	1.70	1.70		
10	0.1552	2.09	2.09		
16	0.1525	2.69	2.69		
18	0.1651	1.28	1.28		
22	0.1651	1.49	1.49		
25	0.1671	1.53	1.53		
32	0.1616	2.15	2.15		

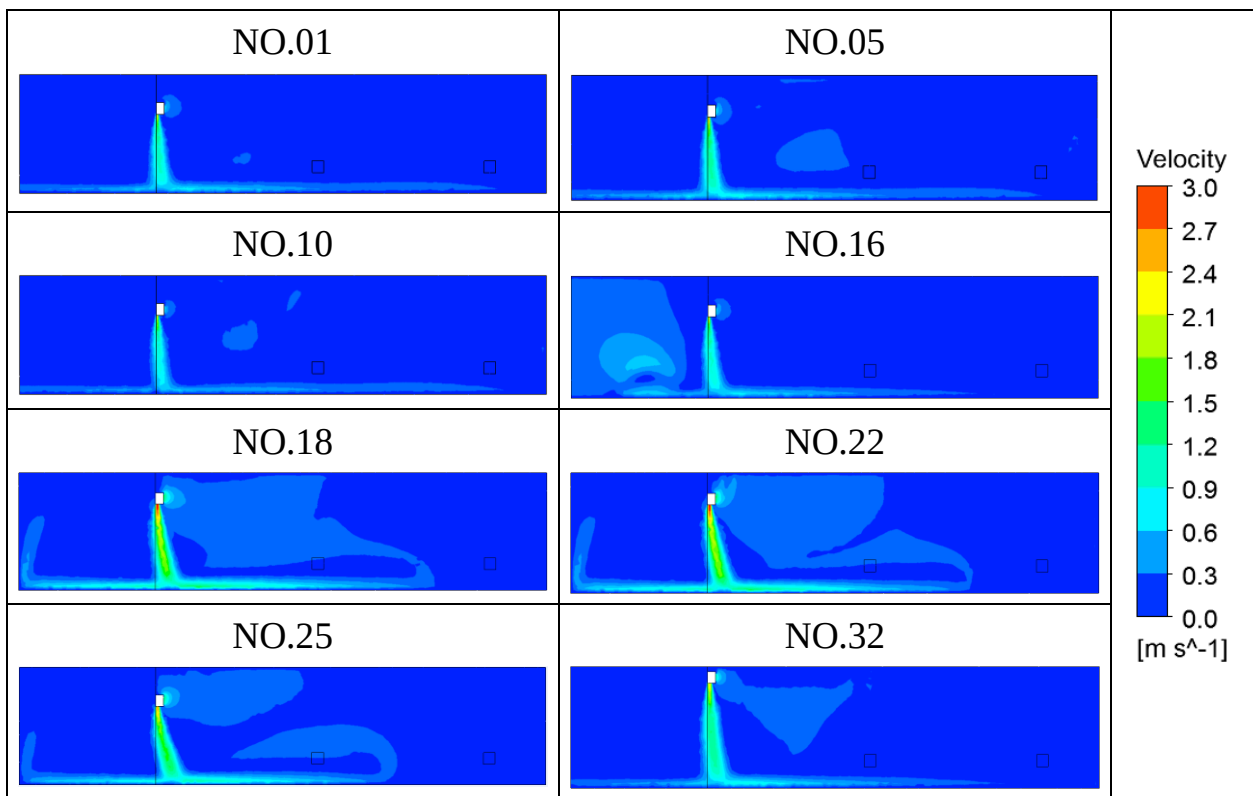


圖 4-4 室外風速 0m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖

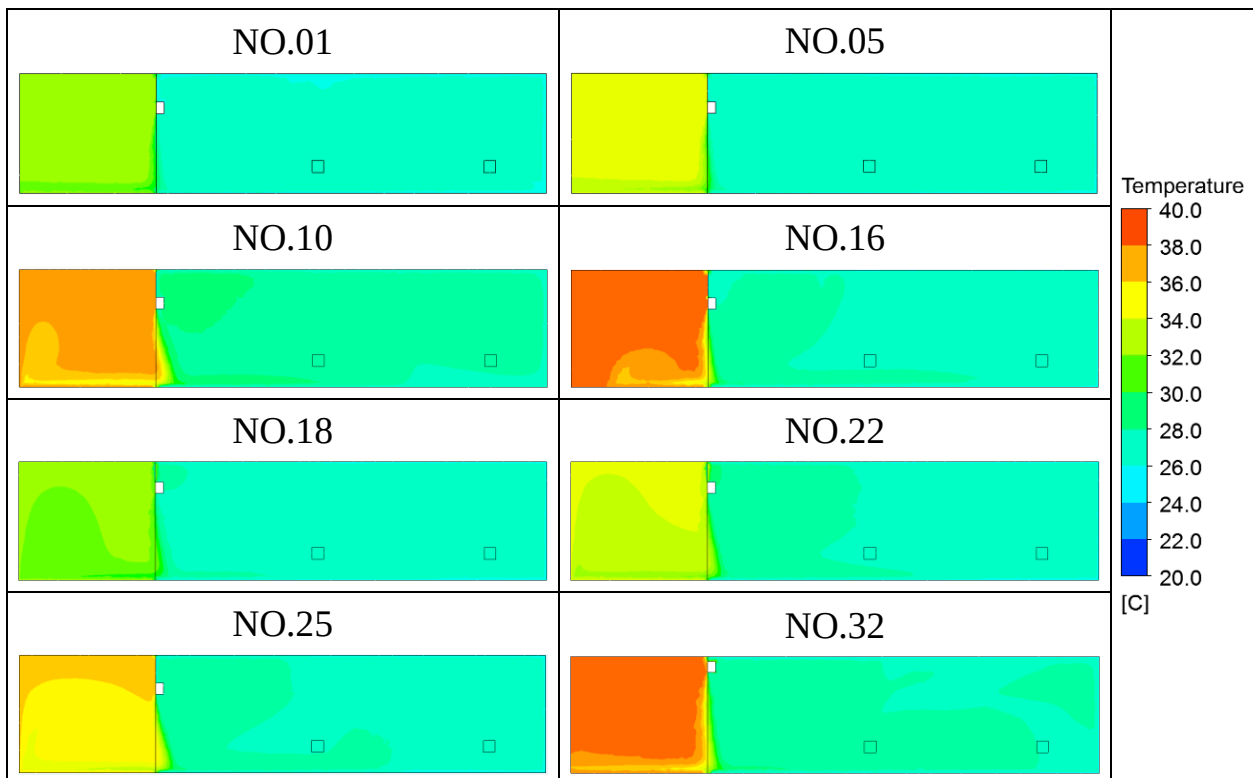


圖 4-5 室外風速 0m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖

4.3.4 室外風速 0.3m/s 模擬結果分析

圖 4-6 為當室外流場 0.3m/s 時，各不同因子組合下在 x 軸向 18m 處之速度分布圖，由圖 4-7 之 NO.02 不同空氣簾出風風速分布結果可以看出，當出風風速為 1.6m/s 時，空氣簾射流受室外風速影響無法達到地面，產生嚴重的流入突破，因此由表 4-4 所計算各組之 $V_{0.min}$ 不足以匹配在室外風速為 0.3m/s 時空氣簾最小出風風速之模擬值 V_0 ， $V_{0.min}$ 應平均乘上 1.407 的修正係數，才能確保在室外風速 0.3m/s 影響下，空氣簾射流可以完整達到地面沒被破壞。圖 4-8 亦可以發現空氣簾有效阻隔室外熱空氣，因空氣簾出風與室外風速產生較強烈熱對流，造成室外高溫往室內擴散情形較無室外風速下相對較為嚴重。

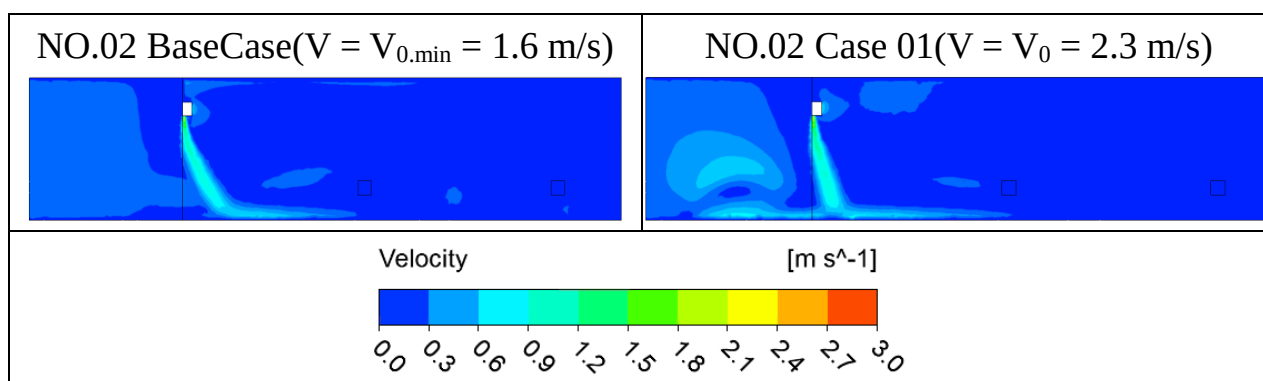


圖 4-6 NO.02 $V_{0.min}$ 與 V_0 - X 軸向 18m 處速度分布圖

表 4-4 室外風速 0.3m/s - V_0 計算表

NO	$D_{m.min}$	$V_{0.min}$	模擬 V_0	平均 $V_{0.min}$	平均 V_0
02	0.1553	1.60	2.30	1.83	2.575
08	0.1525	2.18	3.50		
09	0.1569	1.91	2.20		
15	0.1538	2.49	3.70		
20	0.1616	1.50	1.80		
23	0.1633	1.61	2.70		
26	0.1651	1.67	2.50		
29	0.1672	1.68	1.90		

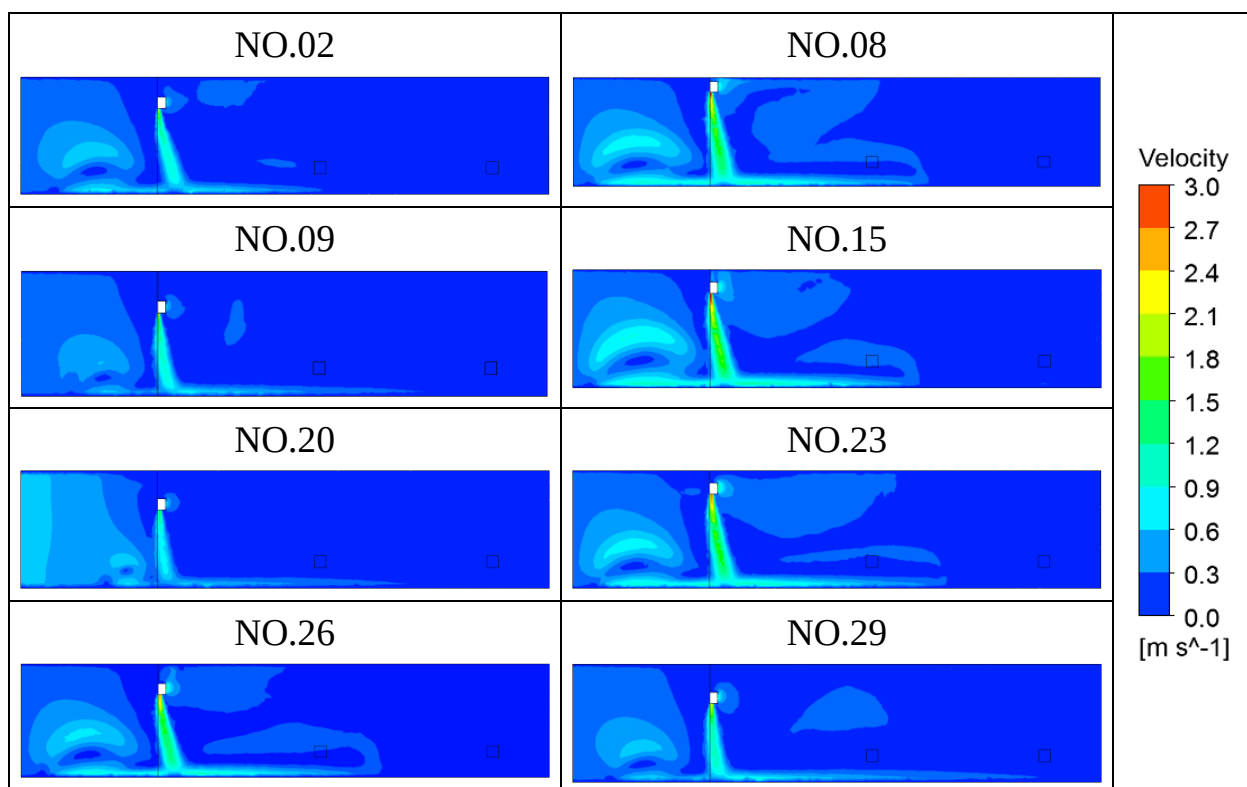


圖 4-7 室外風速 0.3m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖

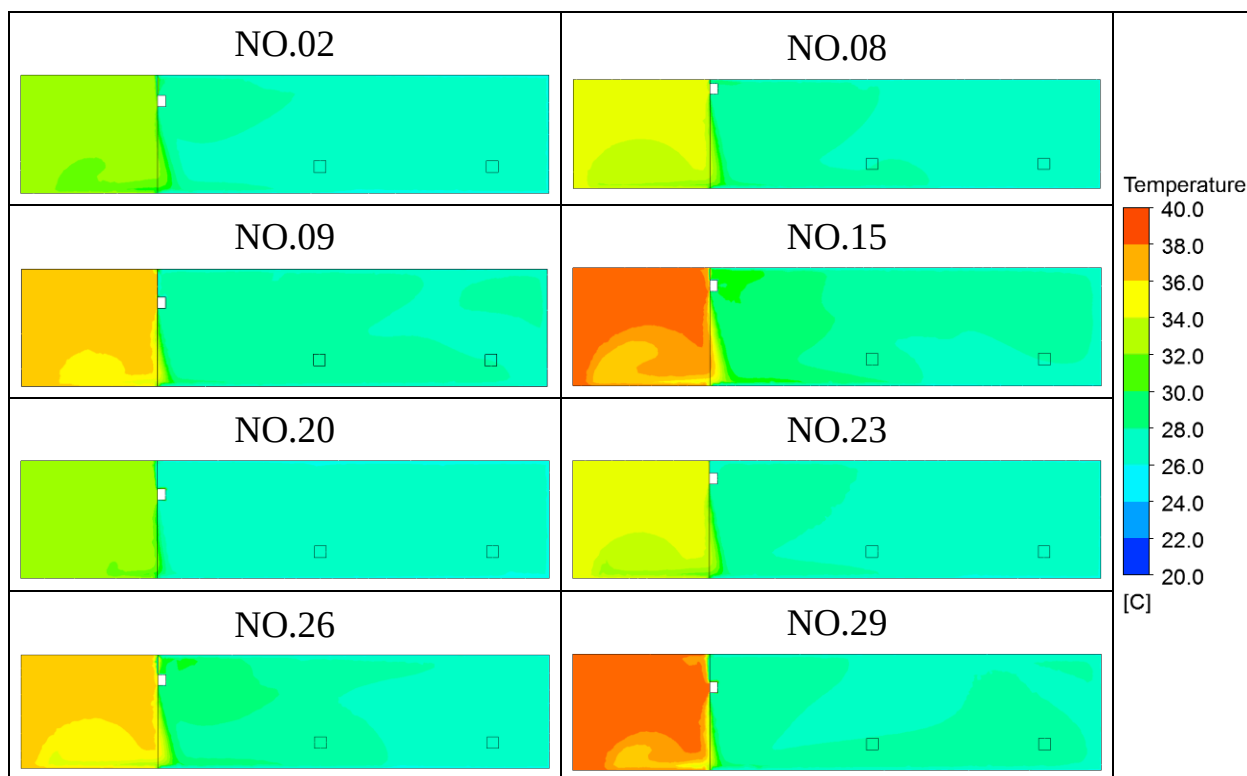


圖 4-8 室外風速 0.3m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖

4.3.5 室外風速 0.6m/s 模擬結果分析

圖 4-10 為室外流場 0.6m/s 時，各不同因子組合下在 x 軸向 18m 處之速度分布圖，由圖 4-9 之 NO.03 不同空氣簾出風風速分布結果亦可以看出與圖 4-10 相仿的情形，因此由表 4-5 所計算各組之 $V_{0.min}$ 亦不足以匹配在室外風速為 0.6m/s 時空氣簾最小出風風速之模擬值 V_0 ， $V_{0.min}$ 應平均應乘上 1.673 的修正係數，才能確保在室外風速 0.6m/s 影響下，空氣簾射流可以完整達到地面沒被破壞。圖 4-11 可以發現空氣簾亦可以有效阻隔室外熱空氣。

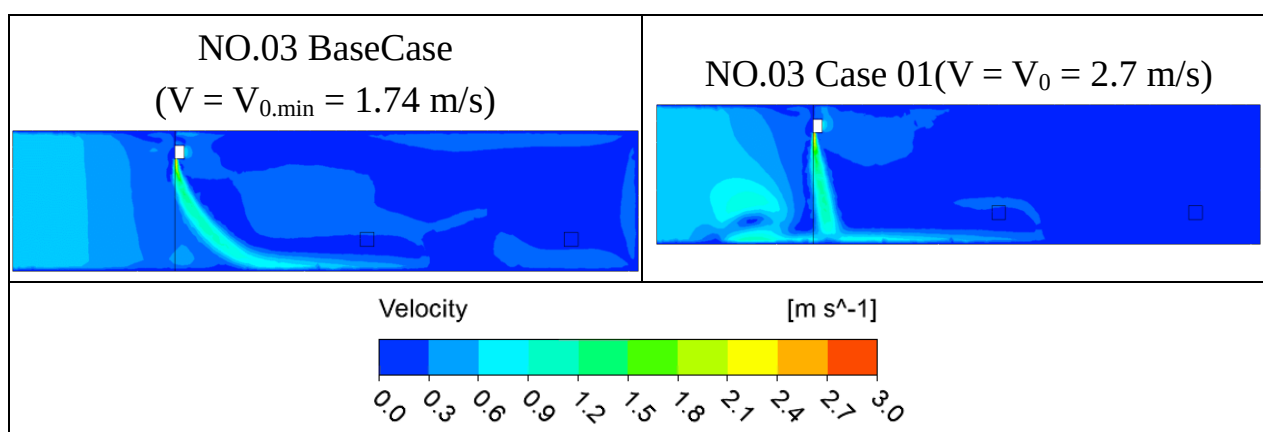


圖 4-9 NO.03 $V_{0.min}$ 與 V_0 - X 軸向 18m 處速度分布圖

表 4-5 室外風速 0.6m/s - V_0 計算表

NO	$D_{m.min}$	$V_{0.min}$	模擬 V_0	平均 $V_{0.min}$	平均 V_0
03	0.1538	1.74	2.70	1.8375	3.075
06	0.1553	1.86	3.20		
12	0.1525	2.45	4.30		
13	0.1569	2.10	2.60		
19	0.1633	1.39	2.40		
21	0.1672	1.36	2.60		
27	0.1633	1.81	3.20		
31	0.1633	1.99	3.60		

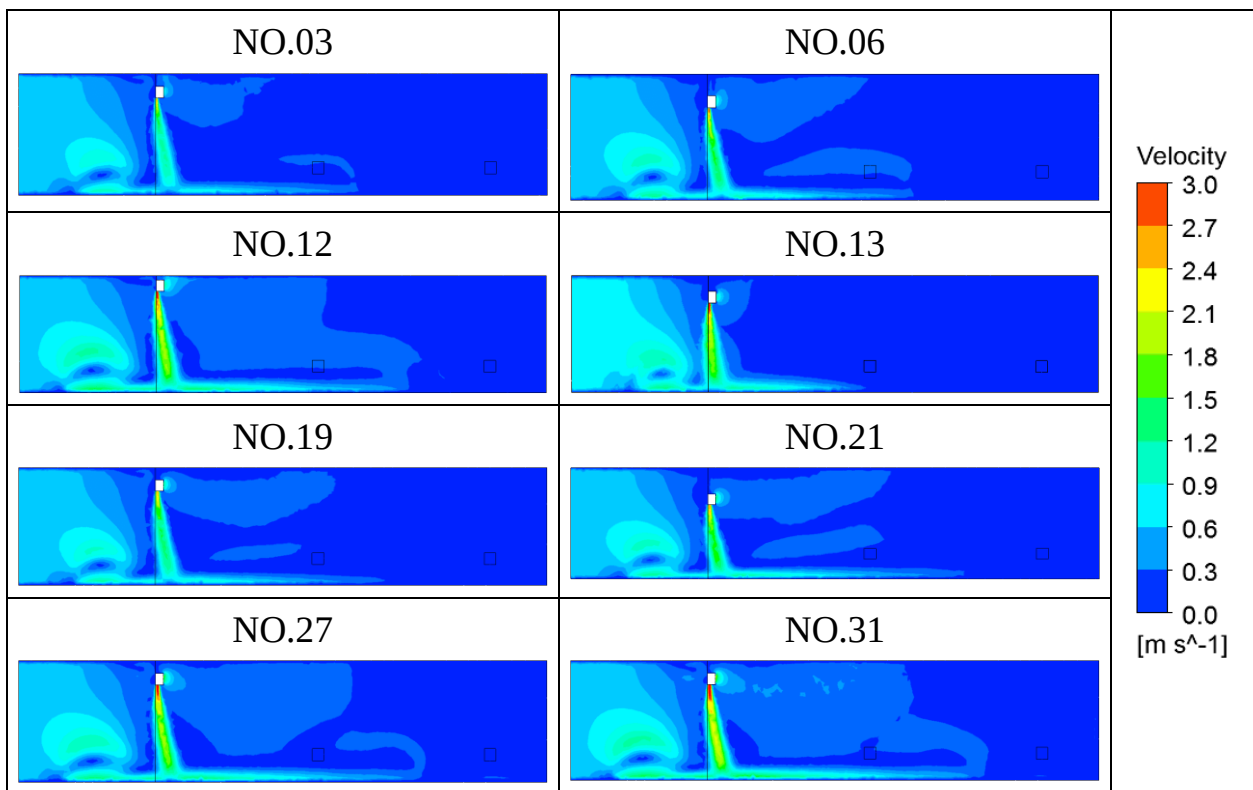


圖 4-10 室外風速 0.6m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖

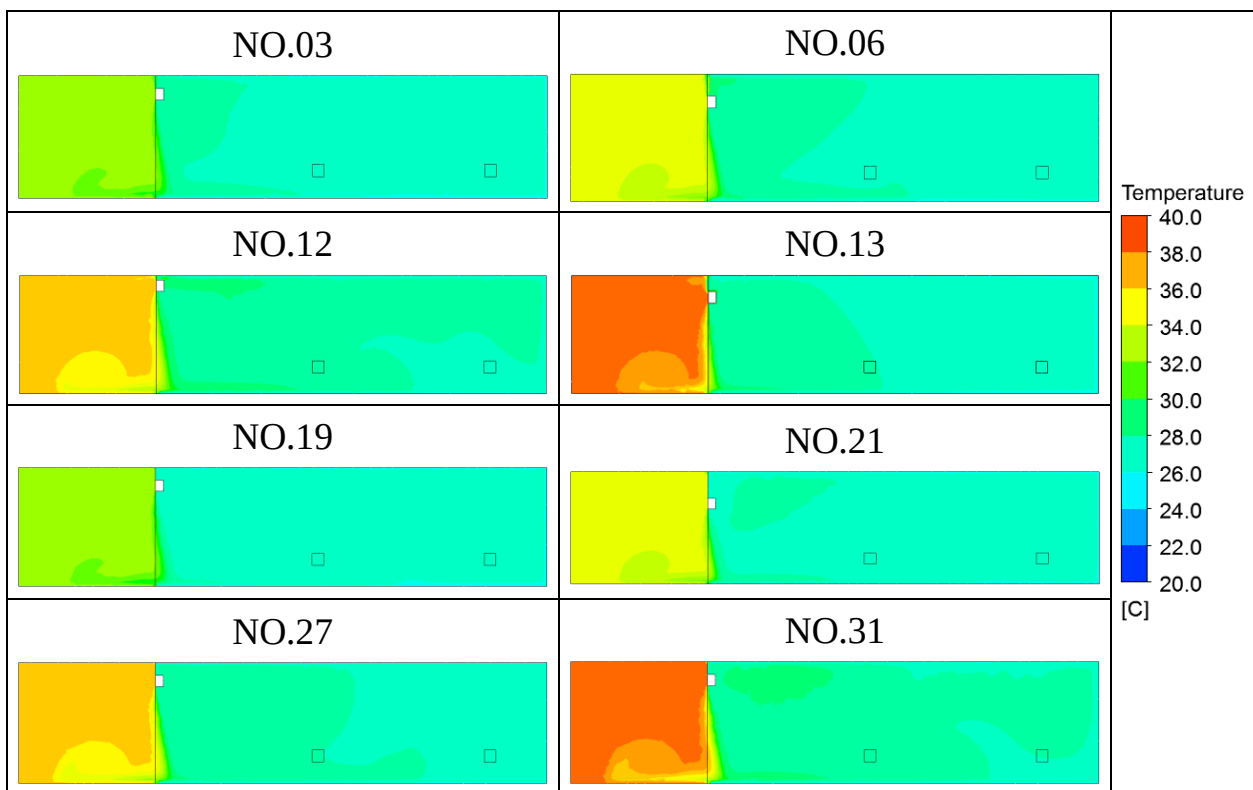


圖 4-11 室外風速 0.6m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖

4.3.6 室外風速 0.9m/s 模擬結果分析

圖 4-13 為室外流場 0.9m/s 時，各不同因子組合下在 x 軸向 18m 處之速度分布圖，由圖 4-12 之不同空氣簾出風風速分布結果亦可以看出與圖 4-7 以及圖 4-10 相仿的情形，因此由表 4-6 所計算各組之 $V_{0.min}$ 亦不足以匹配在室外風速為 0.9m/s 時空氣簾最小出風風速之模擬值 V_0 ， $V_{0.min}$ 應平均應乘上 2.196 的修正係數，才能確保在室外風速 0.9m/s 影響下，空氣簾射流可以完整達到地面沒被破壞。圖 4-14 可以發現空氣簾亦可以有效阻隔室外熱空氣。

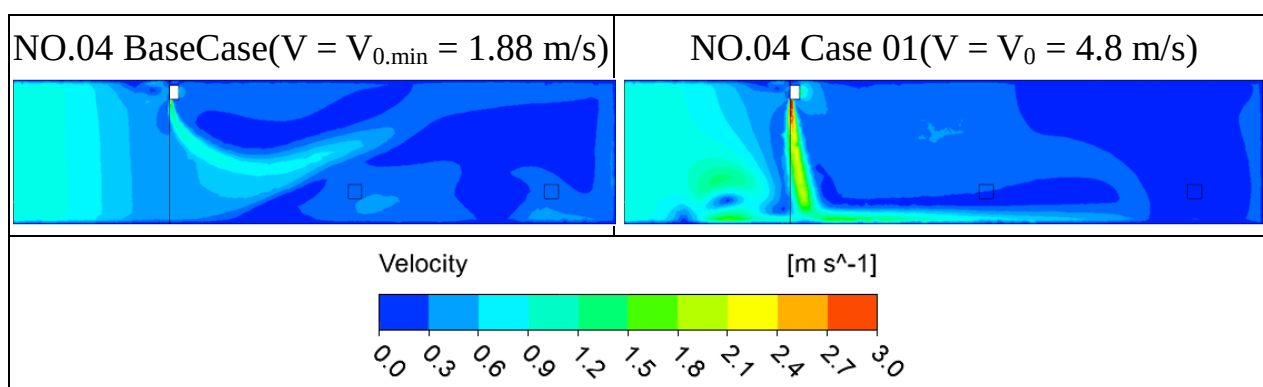


圖 4-12 NO.04 $V_{0.min}$ 與 V_0 - X 軸向 18m 處速度分布圖

表 4-6 室外風速 0.9m/s - V_0 計算表

NO	$D_{m.min}$	$V_{0.min}$	模擬 V_0	平均 $V_{0.min}$	平均 V_0
04	0.1538	1.88	4.80	1.895	4.1625
07	0.1553	2.02	3.80		
11	0.1525	2.27	4.50		
14	0.1569	2.30	4.00		
17	0.1633	1.17	2.50		
24	0.1672	1.74	4.80		
28	0.1633	1.95	5.20		
30	0.1633	1.83	3.70		

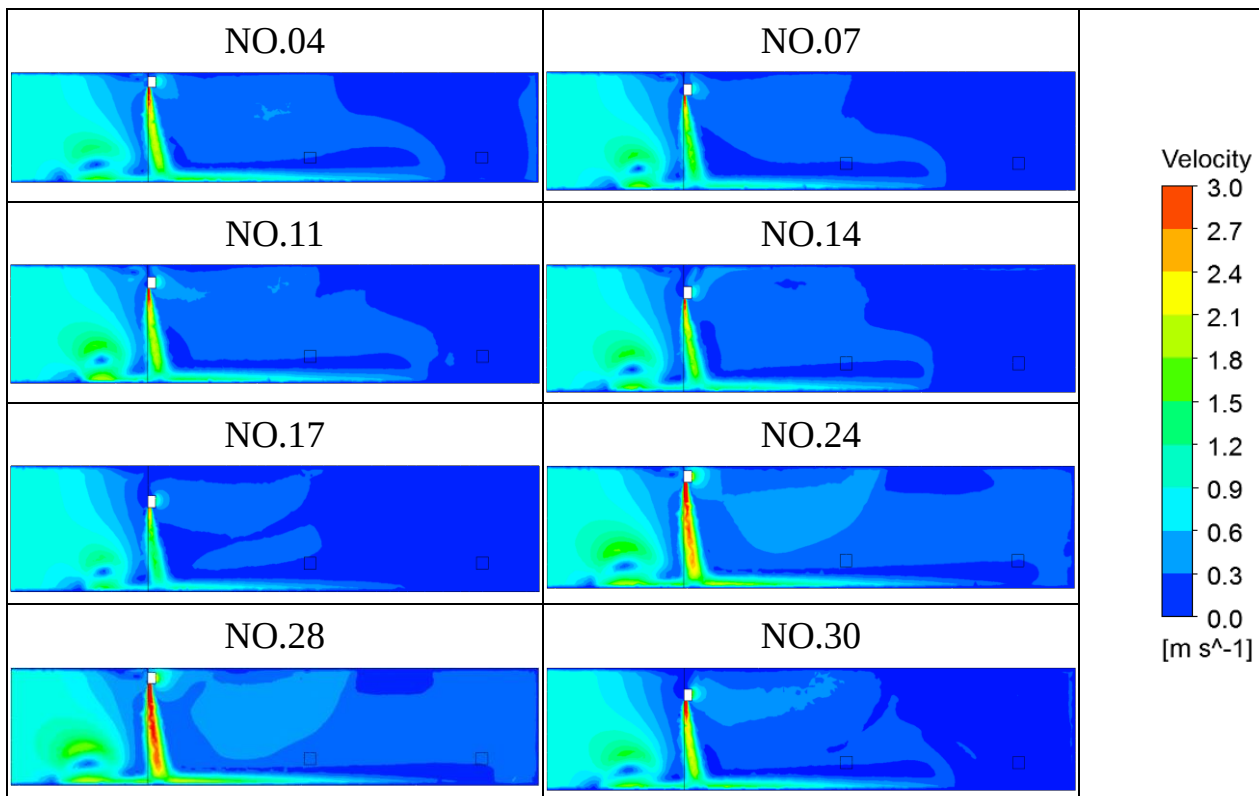


圖 4-13 室外風速 0.9m/s - X 軸向 18m 處速度分布圖

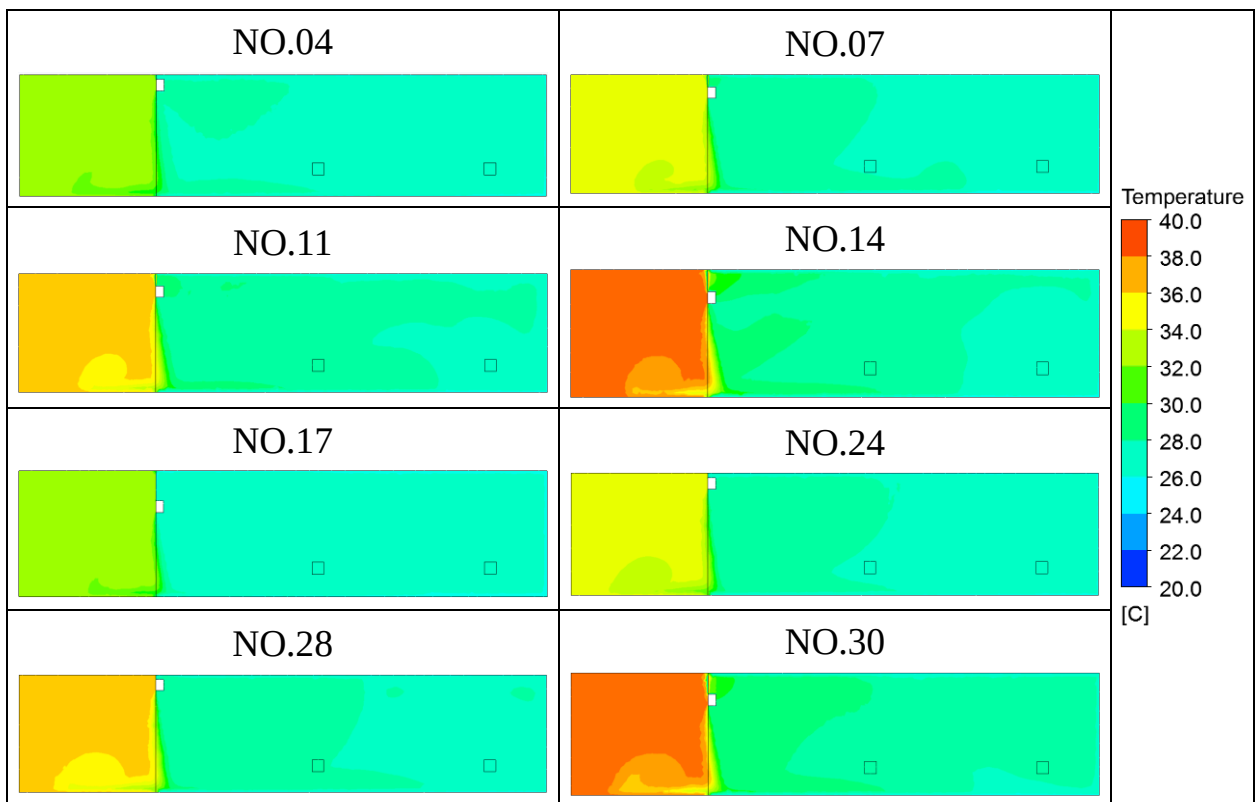


圖 4-14 室外風速 0.9m/s - X 軸向 18m 處溫度分布圖

4.3.7 空氣簾出風風速之關鍵參數

本文探討重點為在不同參數影響下求得空氣簾的最低風速，依照田口法實驗設計採用空氣簾出風風速為品質特性 Y，為求得最小空氣簾出風風速 S/N 比採望小做計算。

由綠基會委託國立臺北科技大學執行之計畫研究結果(李魁鵬[21])，如表 4-7 所示為各種設計因子組合之模擬最小空氣簾出風風速 S/N 比。由此表中的 S/N 比，推導出個因子對最小空氣簾出風風速的影響力，其差異越大代表著改變該因子對於空氣簾出風風速有較顯著的影響。

由表 4-7 可看出，影響空氣簾最小出風風速最為顯著的因子為因子 D 室外風速，是影響空氣簾最小出風風速的關鍵，其次影響最大的是因子 C 架設高度，最後對於空氣簾最小出風風速影響較小的為因子 B 溫差以及因子 A 出風口深度。

表 4-7 最小出風風速 S/N 比 模擬因子效應表

望小特性 最小出風風速 S/N 比					
因子		出風口深度(m)	溫差(°C)	架設高度(m)	室外風速(m/s)
		A	B	C	D
水準	1	-9.32	-6.94	-6.07	-4.85
	2	-7.97	-8.90	-7.58	-7.95
	3	--	-9.38	-10.26	-9.60
	4	--	-9.37	-10.68	-12.19
差異		1.35	2.43	4.61	7.34
排序		4	3	2	1

4.3.8 封閉效率之關鍵參數

接下來探討重點為在不同參數影響下求得空氣簾之封閉效率，依照田口法實驗設計採用空氣簾封閉效率為品質特性 η ，為求得最大空氣簾封閉效率 S/N 比採望大作為計算。

由上表 4-8 可看出，影響空氣簾最大封閉效率最為顯著的因子依然為因子 D 室外風速，為影響空氣簾最大封閉效率的關鍵，其次影響最大的是因子溫差，最後影響較小的為因子 C 架設高度以及因子 A 出風口深度。

表 4-8 最大封閉效率 S/N 比 模擬因子效應表

望大特性 最大封閉效率 S/N 比					
因子		出風口深度(m)	溫差(°C)	架設高度(m)	室外風速(m/s)
		A	B	C	D
水準	1	-1.35625	-1.5113	-1.3938	-1.5088
	2	-1.36	-1.3963	-1.3725	-1.4175
	3	--	-1.3175	-1.3213	-1.3175
	4	--	-1.2075	-1.345	-1.1888
差異		0.00375	0.30375	0.0725	0.32
排序		4	2	3	1

由上表 4-7 以及表 4-8 我們可以得知，影響空氣簾之最小出風風速以及最大封閉效率之關鍵為室外風速，其次影響空氣簾最小風速為空氣簾架設之高度，然而有著其次影響最大封閉效率的因子為溫差。對於出風口寬度而言，其影響力是最小的。

4.4 空氣簾建議之最小出風速度

由前述 4.1 節相關空氣簾撓度計算公式，針對模擬結果提出相關 $V_{o.min}$ 修正係數來確保在室外流場風速下，射流依舊能順利達到地面，沒有發生突破情形。公式(4.2)之 α_0 為 0° 角，所求得 $\sin\alpha_f$ 帶回公式(4.2)求出最小空氣簾撓度 $D_{m.min}$ 值，將 $D_{m.min}$ 帶入公式(4.1)求得 $V_{o.min}$ ，由模擬結果得知在一般無室外風速下，公式(4.1)所計算出最小出風風速足以確保空氣簾射流達到地面，當有室外風速影響時，公式(4.1)所計算之最小出風風速 $V_{o.min}$ 已無法確保射流能順利達至地面，因此由模擬結果針對室外風速在 0.3m/s、0.6m/s 與 0.9m/s 的情形下對式(4.1)進行修正，修正係數如表 4-9 所示，修正後方程式如公式(4.10)、(4.11)以及(4.12)所示。

因為影響空氣簾封閉效率主要關鍵因子室外氣風場，若考量針對不同戶外風速的條件下，其他因子之綜合組合所需之最小空氣簾出風風速與 Hayes and Stoecker [19]之預測值關係圖，如圖 4-15 所示。為簡化計算最小空氣簾出風風速，可轉化為圖 4-16 之 F 因子曲線圖，依據戶外風速查詢 F 因子值之後，代入(4.13)、(4.1)、(4.2)式，即可求得最小空氣簾出風風速建議值。

另外，針對一般常見之騎樓商店，其空氣簾最小出風風速可查詢圖 4-17 所示之建議值。

$$V_{o.min.0.3} = 1.407 \sqrt{\frac{gH^2(\rho_c - \rho_w)D_{m.min}}{\rho_o b_o}} \quad (4.10)$$

$$V_{o.min.0.6} = 1.673 \sqrt{\frac{gH^2(\rho_c - \rho_w)D_{m.min}}{\rho_o b_o}} \quad (4.11)$$

$$V_{o.min.0.9} = 2.196 \sqrt{\frac{gH^2(\rho_c - \rho_w)D_{m.min}}{\rho_o b_o}} \quad (4.12)$$

$$V_o = F * \sqrt{\frac{gH^2(\rho_c - \rho_w)D_{m.min}}{\rho_o b_o}} \quad (4.13)$$

表 4-9 $D_{m.min}$ 修正係數表

NO	室外風速 (m/s)	理想 $V_{0.min}$ (m/s)	模擬 V_0 (m/s)	平均 $V_{0.min}$ (m/s)	平均 V_0 (m/s)	修正係數
1	0	1.46	1.46	1.79875	1.79875	1
5		1.7	1.7			
10		2.09	2.09			
16		2.69	2.69			
18		1.28	1.28			
22		1.49	1.49			
25		1.53	1.53			
32		2.15	2.15			
2	0.3	1.6	2.3	1.83	2.575	1.407
8		2.18	3.5			
9		1.91	2.2			
15		2.49	3.7			
20		1.5	1.8			
23		1.61	2.7			
26		1.67	2.5			
29		1.68	1.9			
3	0.6	1.74	2.7	1.8375	3.075	1.673
6		1.86	3.2			
12		2.45	4.3			
13		2.1	2.6			
19		1.39	2.4			
21		1.36	2.6			
27		1.81	3.2			
31		1.99	3.6			

NO	室外風速 (m/s)	理想 $V_{0.min}$ (m/s)	模擬 V_0 (m/s)	平均 $V_{0.min}$ (m/s)	平均 V_0 (m/s)	修正係數
4	0.9	1.88	4.8	1.895	4.1625	2.196
7		2.02	3.8			
11		2.27	4.5			
14		2.3	4			
17		1.17	2.5			
24		1.74	4.8			
28		1.95	5.2			
30		1.83	3.7			

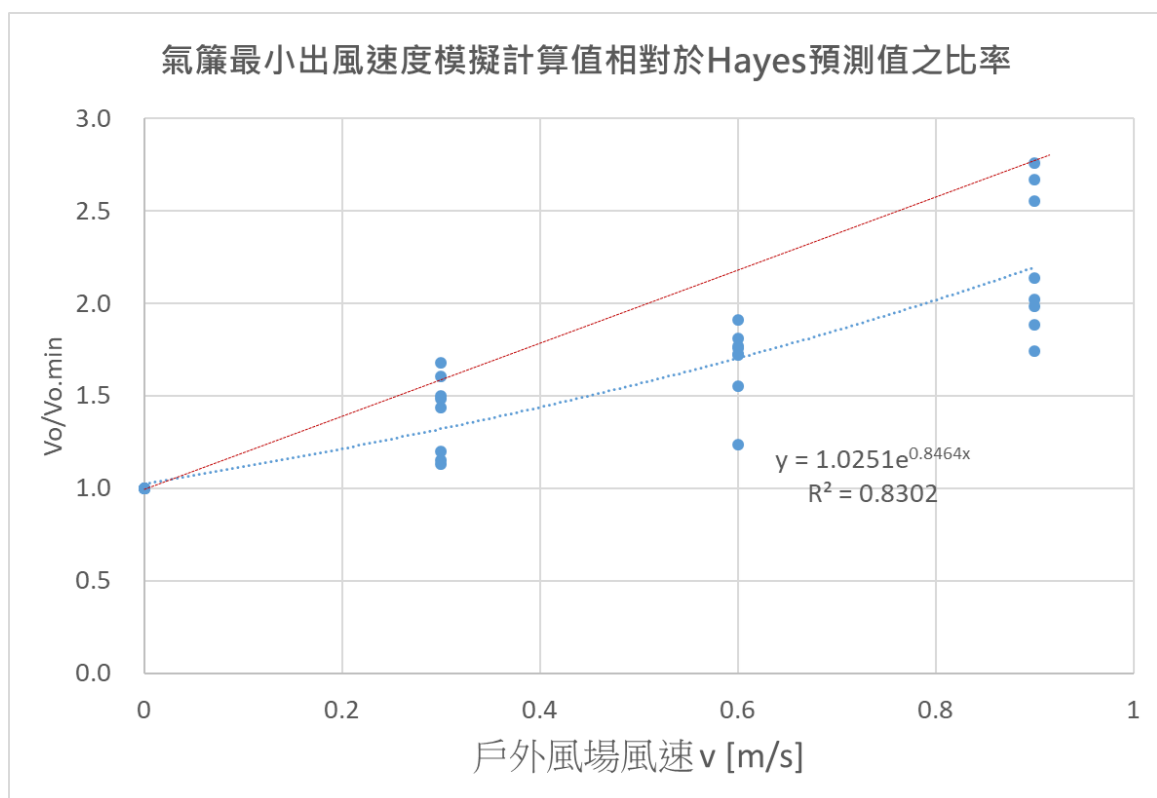


圖 4-15 空氣簾最小出風風速與 Hayes and Stoecker 預測之比值

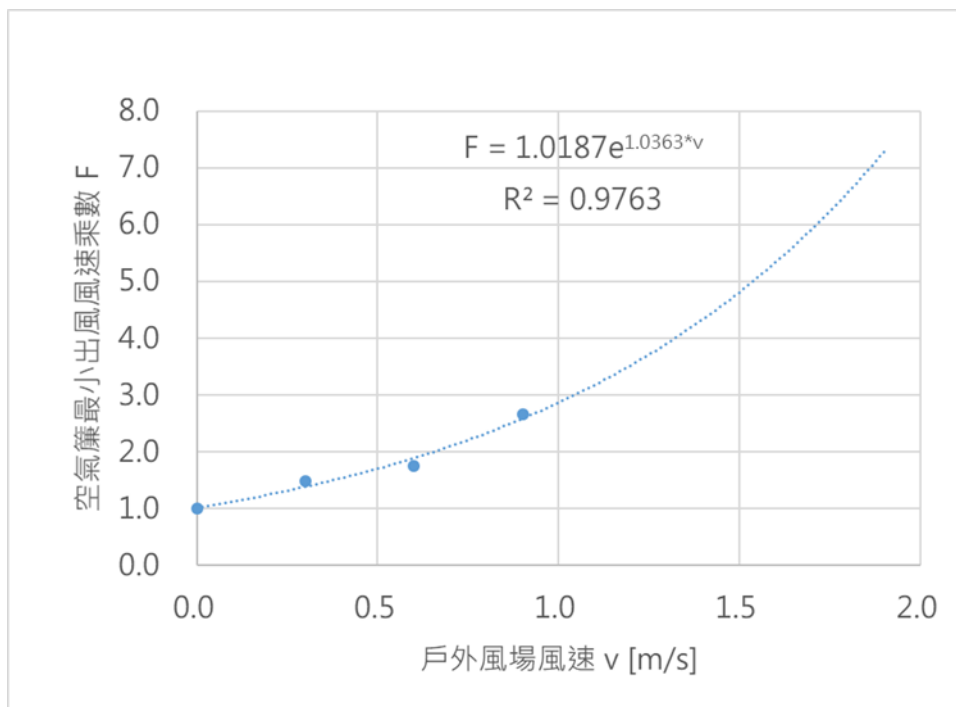


圖 4-16 空氣簾最小出風風速 F 修正因子

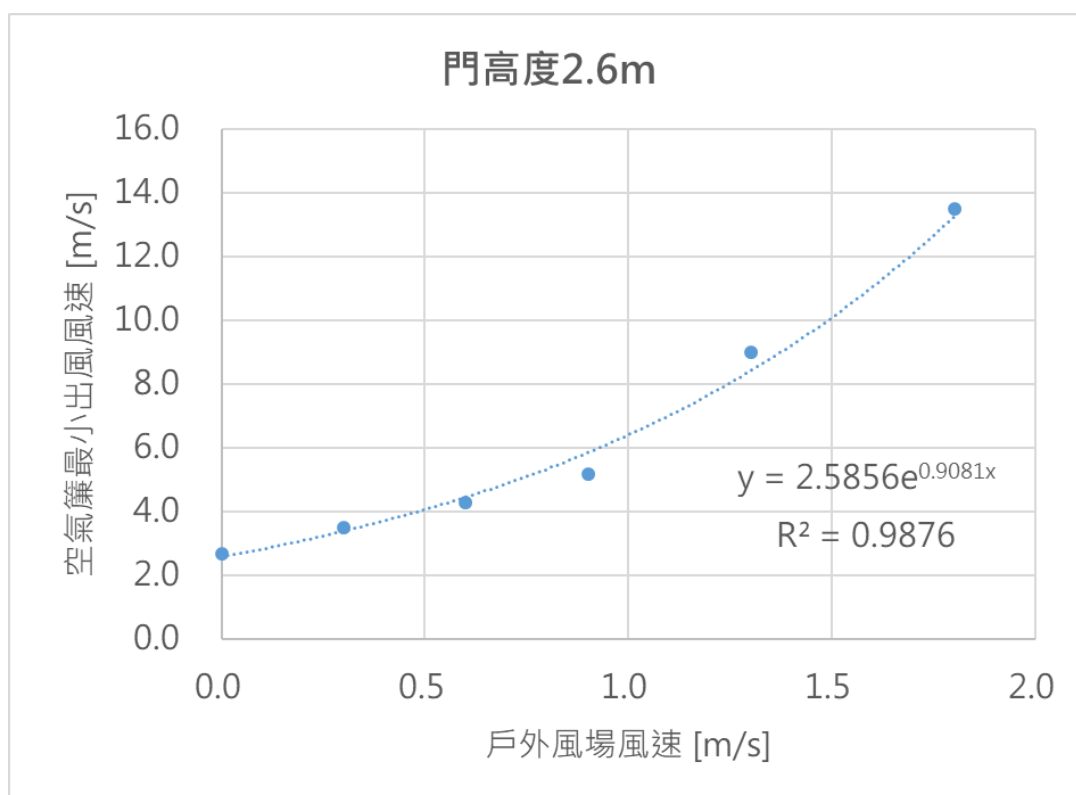


圖 4-17 一般騎樓商店之空氣簾最小出風風速建議值

4.5 設計參數對空氣簾封閉效率之影響

由上述 4.2 節空氣簾封閉效率計算介紹，將各組不同參數下之模擬結果數據計算空氣簾封閉效率，室內初始條件維持在 26°C、RH 60%，其餘基本相關參數有對應之室外溫度與密度，由模擬結果得到室內外焓值與空氣簾出風熱對流係數，帶入公式(4.6)與(4.8)分別計算 q_{open} 與 q ，最後帶回公式(4.5)求得空氣簾封閉效率 η ，各組空氣簾封閉效率結果如表 4-10 所示，由模擬結果整體空氣簾平均封閉效率為 85.54%。

表 4-10 空氣簾封閉效率

NO	$h_w(\text{kJ/kg})$	$h_c(\text{kJ/kg})$	$h_{conv}(\text{W/m}^2\text{K})$	$q_{open}(\text{kW})$	$q(\text{kW})$	$\eta(\%)$
1	78.56	54.94	5.13	0.394	0.065	83.44
2	78.42	55.35	8.5	0.710	0.116	83.72
3	78.46	55.47	9.62	0.887	0.141	84.06
4	86.12	58	14.52	1.344	0.19	85.88
5	85.65	54.79	6.57	0.704	0.116	83.52
6	86.17	56.29	11.4	1.416	0.205	85.54
7	86.2	56.58	12.59	1.853	0.243	86.89
8	88.8	58.19	13.74	1.710	0.263	84.65
9	94.5	55.98	8.75	1.254	0.187	85.07
10	93.96	59.41	8.08	1.050	0.164	84.36
11	94.53	57.66	13.53	2.614	0.324	87.61
12	90.21	59.03	14.89	2.643	0.364	86.24
13	103.83	56.86	9.17	1.896	0.233	87.70
14	103.6	57.98	12.93	3.000	0.348	88.40
15	103.28	58.24	10.7	2.235	0.311	86.06
16	103.83	58.45	9.86	2.200	0.309	85.97
17	78.49	54.96	8.77	0.754	0.111	85.24
18	78.23	55.49	11.2	0.920	0.151	83.62

NO	$h_w(\text{kJ/kg})$	$h_c(\text{kJ/kg})$	$h_{\text{conv}}(\text{W/m}^2\text{K})$	$q_{\text{open}}(\text{kW})$	$q(\text{kW})$	$\eta(\%)$
19	78.45	55.21	9.13	0.869	0.137	84.26
20	78.56	55.95	5.86	0.558	0.09	83.86
21	86.17	55.59	8.32	0.995	0.141	85.83
22	85.85	56.28	10.8	1.210	0.194	83.95
23	86.02	55.93	9.46	1.202	0.189	84.29
24	86.14	56.45	18.98	3.053	0.4	86.91
25	90.1	58.1	11.95	1.489	0.234	84.29
26	94.4	57.02	9.27	1.451	0.209	85.60
27	94.44	56.9	10.21	1.886	0.252	86.62
28	94.46	57.35	19.12	3.906	0.502	87.14
29	103.83	57.8	6.93	1.239	0.171	86.23
30	103.64	58.12	9.41	2.463	0.252	89.76
31	103.43	57.79	10.7	2.509	0.316	87.39
32	103.83	58	8.25	1.715	0.262	84.71

4.6 空氣簾熱損失計算方程式

由 Gregory[15]等人研究，利用 CFD 模擬在不同的空氣簾參數下，最後，提出一種估算通過空氣簾的傳熱速率方程式，不過由於該方程式是在冷藏室之條件下模擬得來，與本手冊所針對一般室外環境對室內空氣簾的影響條件範圍有所差異，因此透過模擬結果數據資料線性回歸得出一條方程式，此方程式基本參數只需透過現場量測便能估算該空氣簾封閉效率，其回歸方程式如式(4.13)所示，回歸之線性方程式 $R^2=0.9587142$ ，正規化均方根誤差(NRMSD)為 7.75%，回歸曲線如圖 4-18，其中 H 為門口高度(m)， b_0 為空氣簾出風口寬度(m)。

$$\frac{Nu}{RePr} = 0.002983 \frac{H}{b_0} - 0.00302 \quad (4.13)$$

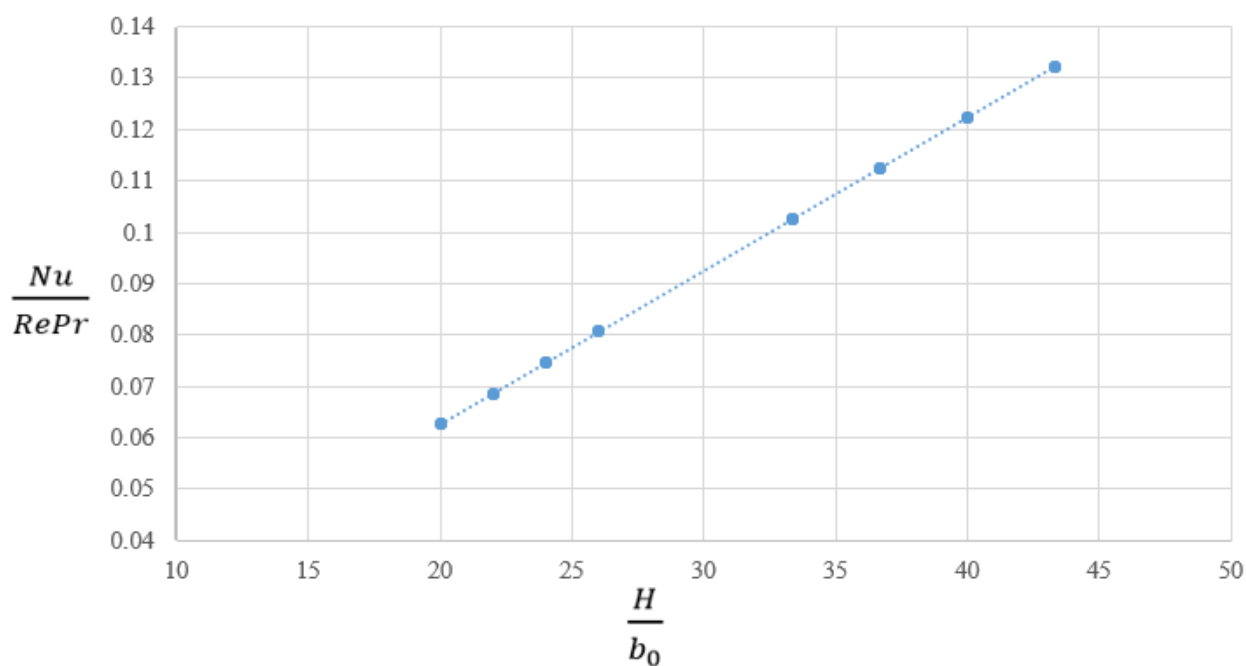


圖 4-18 空氣簾熱對流係數回歸曲線圖

4.7 空氣簾之性能功能驗證

美國冷凍空調學會 ASHRAE Std. 90.1-2019 之『低層住宅建築以外的建築物的能源標準』(Energy Standard for Buildings Except Low Rise Residential Buildings)，可允許安裝置空氣簾，以取代防止冬天暖氣熱損失而須設置風除室之規定。因此，關於空氣簾之性能功能驗證，可參考並規範空氣簾應按照 ANSI / AMCA 220 或 ISO 27327-1 進行測試，並按照製造商的說明進行安裝和調試，以確保正常運行，並且氣流速度在地面以上 15 公分(6.0 英寸)處不得小於 6.6 英尺/秒 (2.0 m/s)。應提供自動控制，該自動控制將隨著門的打開和關閉來操作氣簾。

由於 ASHRAE Std. 90.1-2019 之規範允許安裝置空氣簾以取代風除室之規定，僅針對冬天需要暖氣之氣候區，而台灣屬於亞熱帶氣候，因此除非屬於高山地區，否則要求氣流速度在地面以上 15 公分處不得小於 2.0 m/s 之標準可能不適用。鑑於此，本手冊依據前述之模擬分析結果，彙整各模擬案例在不同戶外風場之風速及空氣簾最佳出風風速的條件下到達距離地面 15 公分之氣流垂直向下速度值，以作為空氣簾現場性能驗證之參考，如圖 4-19 所示。保守建議可採用各組戶外風速條件，所對應之最大值，其範圍大約為 0.7 m/s~1.3 m/s。

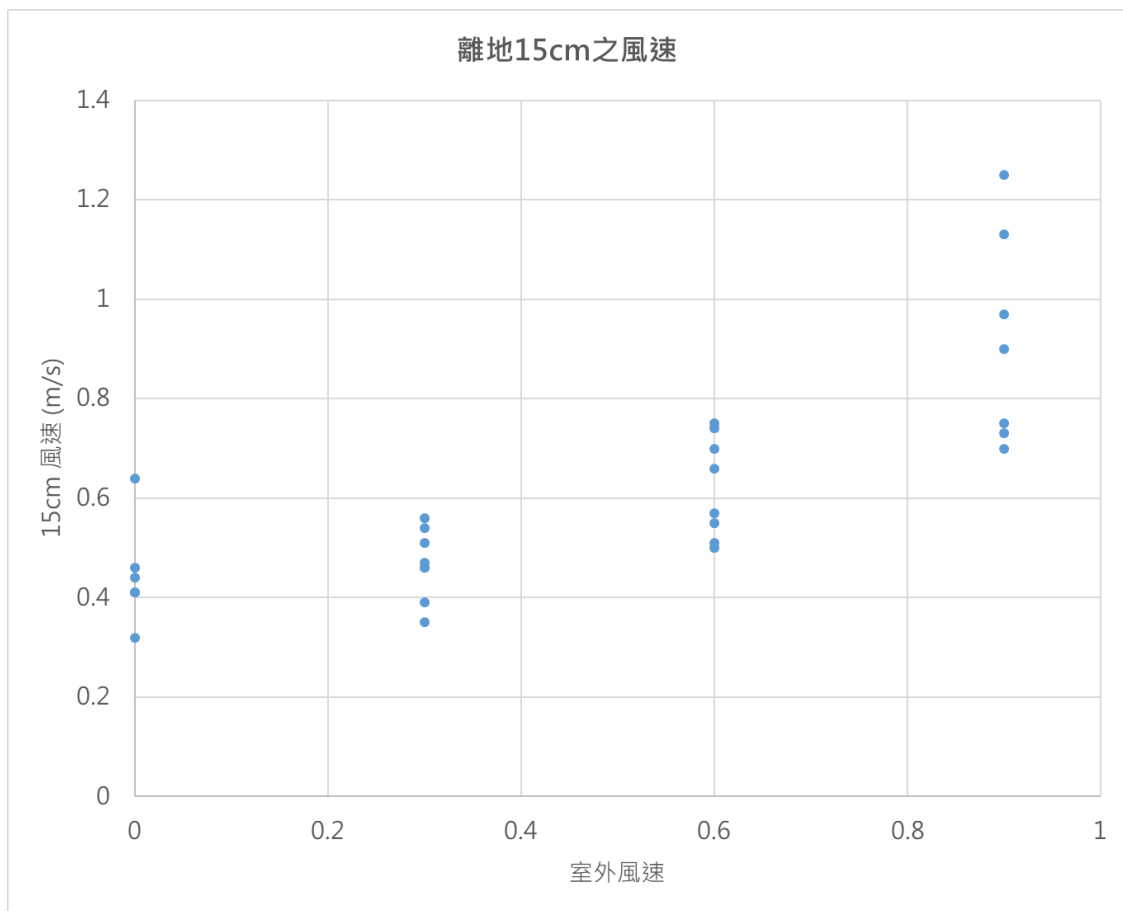


圖 4-19 空氣簾距離地面 15 公分之氣流速度

五、結語

根據前述之訪查、實驗與模擬，本手冊藉由建立 CFD 數值模型，進行分析模擬，針對在不同室外風場風速與其他參數組合條件下，探討為了阻隔冷氣外洩，空氣簾所需之最小出風風速，主要歸納的結論與建議如下：

1. 經由現場之訪視與量測，關於空氣簾在使用上或安裝上之問題，主要包含：出風不均勻、空氣簾設備間的縫隙造成氣流不連續而造成外氣侵入、安裝位置不理想而使空氣簾風速沒達到其規格及理想效果；再者，理論上空氣簾之射流速度需依據室外流場特徵進行調整，以達空氣簾理想的封閉效果，但目前市售產品並未有風速之可自動調變功能。
2. 室外之風速對於空氣簾的最小出風風速是最具影響力的，其次是空氣簾架設高度對於最小出風風速的影響較大，室內外溫差以及空氣簾出風口寬度的影響範圍變化不大。
3. 室外之風速對於空氣簾的封閉效率是最具影響力的，其次是室內外溫差對於封閉效率的影響較大，空氣簾架設高度以及出風口寬度的影響變化不大。
4. 在無室外風速下，既有文獻 Hayes and Stoecker [19]所提出最小出風風速之計算公式 $V_{0.min}$ ，足以確保空氣簾射流達到地面阻隔冷氣外洩，但是當有室外風速影響時，原式所計算之最小出風風速 $V_{0.min}$ 已無法確保能達至地面阻隔冷氣外洩。
5. 在室外風速 0.3m/s、0.6m/s 與 0.9m/s 下，原本 $D_m.min$ 公式計算之 $V_{0.min}$ 不足以抵抗室外風速，而產生嚴重流入突破，因此在此室外風速下，應修正 $D_m.min$ 公式，需分別乘以 1.407、1.673 與 2.196 的修正係數。
6. 依據本手冊所提之 $V_{0.min}$ 修正值，空氣簾可以以最低風速下達到最好的阻隔效果，相對於沒有空氣簾之案例，其整體空氣簾封閉效率可達 85.54%。
7. 本手冊建議之方程式 $\frac{Nu}{RePr} = 0.002983 \frac{H}{b_0} - 0.00302$ ，只需取得現場相關參

數便可以估算該空氣簾封閉效率，將有助於空氣簾之設計及節能法規之制定參考。

8. 由研究案例一可以得知室外風速對於整體封閉效率以及最小出風風速之影響甚鉅，並比較有無外部風場之情形對於室內之空調設備耗電量之變化以及節能效益評估，最終得出整體耗電量能夠節省 31%。
9. 由研究案例二可以得知雖然風速大之射流能夠維持一定之封閉以及空氣隔絕效果，但是過大的風速將會使室內之冷空氣藉由空氣簾之回風口吸入，並隨著空氣簾之射流排出室外，所以選定一個恰當的射流風速對於空氣簾而言是非常重要的，本手冊比較了較高氣流速度與最佳氣簾速度兩種情形對於室內之空調設備耗電量之變化以及節能效益評估，最終得出整體耗電量能夠節省 40%。
10. 本手冊提供依不同戶外風速條件，查詢空氣簾最小出風風速 F 修正因子，乘以 Hayes and Stoecker 之空氣簾射流最小速度預測方程式，即可求得空氣簾射最小出風速度，以確保空氣簾之封閉效果。
11. 本手冊依據前述之模擬分析結果，彙整各模擬案例在不同戶外風場之風速及空氣簾最佳出風風速的條件下到達距離地面 15 公分之氣流垂直向下速度值，以作為空氣簾現場性能驗證之參考。保守建議可採用各組戶外風速條件所對應之最大值，其範圍大約為 0.7 m/s~1.3 m/s。

參考文獻

- [1] Wang Liangzhu Leon, Zhipeng Zhong, (2014), “An approach to determine infiltration characteristics of building entrance equipped with air curtains”. *Energy and Buildings*, Volume 75, pp. 312-320
- [2] Juraeva Makhsuda, Lee Jun-ho, Song Dong-Joo, (2011). ” A computational analysis of the train-wind to identify the best position for the air-curtain installation”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* ,Volume 99, Issue 5,, pp. 554-559
- [3] Downing, Meffert, (1993). “Effectiveness of cold-storage door infiltration protective devices”. *ASHRAE Transact.*, 99 (2), pp. 356-366
- [4] Howell, R., Rosario, L., Riiska, D., & Bondoc, M, (1999) .” Potential savings in display case energy with reduced supermarket relative humidity”. 20th international congress of refrigeration, Sydney, Australia
- [5] P.D. Gaspar, L.C. Carrilho Gonçalves, R.A. Pitarma, (2011), “ Experimental analysis of the thermal entrainment factor of air curtains in vertical open display cabinets for different ambient air conditions”. *Appl. Therm. Eng.* 31 ,pp. 961–969.
- [6] Gil-Lopez, Tomas, Galvez-Huerta, Miguel A, Castejon-Navas, Juan, Gomez-Garcia, Virginia, (2013) . “Experimental analysis of energy savings and hygrothermal conditions improvement by means of air curtains in stores with intensive pedestrian traffic”. *Energy and Buildings*, Volume 67, pp. 608-615
- [7] 蘇郁涵，2008，“冷氣外洩防護對零售商家整體節能效益之研究”，國立台北 科技大學
- [8] Yang, Senwen, (2019) .”Wind effects on air curtain performance at building entrances”. *Building and Environment*, Volume 151, pp. 75-87
- [9] Tomas Gil-Lopez, Miguel A. Galvez-Huerta, Juan Castejon-Navas, Virginia Gomez-Garcia, (2013), “ Experimental analysis of energy savings and hygrothermal conditions improvement by means of air curtains in stores with

intensive pedestrian traffic”. Energy and Buildings, Volume 67 ,pp. 608-615

[10]李國仲、郭鴻森、李基禎，2006，“空氣簾流場模擬與節能效益研究”

[11]Amin Mazyar, Dana Dabiri, Homayun K. Navaz, (2019), “Effects of secondary variables on infiltration rate of open refrigerated vertical display cases with single-band air curtain”. Applied Thermal Engineering, Volume 35, pp. 120-126

[12]謝文德、王榆鑫、郭鴻森、李基禎，2004，“自動門氣簾設置對便利店之整體節能效益研究”，《冷凍與空調》25期：45-51。

[13]Goubran Sherif, (2016), “Experimental study on the flow characteristics of air curtains at building”. CONCORDIA UNIVERSITY, Building Engineering

[14] Ye Hong, (2017), “Study on the influence of air curtain barrier efficiency on infiltration air volume and temperature distribution in large space in winter”. Procedia Engineering, Volume 205, pp. 2509-2516

[15] Gregory Verhaeghe, M. Van Belleghem, C. T'Joel, H. Huisseune, P. De Jaeger, M. De Paepe, (2012), “Heat transfer through vertically downward-blowing single-jet air curtains for cold rooms”, Taylor & Francis, Heat Transfer Engineering ,Volume 33, Issue 14, pp 1196-1206

[16] Stamou, A., Katsiris, I., (2006), "Verification of a CFD model for indoor airflow and heat transfer," Building and Environment, vol. 41, pp.1171-1181.

[17] Patankar, Suhas V., (1980), “Numerical heat transfer and fluid flow (14. printing. ed.)”, Bristol, PA: Taylor & Francis

[18] AMCA Standard 220-05, “Laboratory Methods of Testing Air Curtain Units for Aerodynamic Performance Rating”

[19] Hayes, F. C., and Stoecker, W. F., “Heat Transfer Characteristics Of Air Curtains”, ASHRAE Journal, vol. 11, no. 6, 1969.

[20] Patankar, Suhas V., (1980), “Numerical heat transfer and fluid flow (14. printing. ed.)”, Bristol, PA: Taylor & Francis

[21] 李魁鵬，2020，服務業營業場所空氣簾流場模擬及節能設計研析計畫期末報告書，財團法人台灣綠色生產力基金會委託國立臺北科技大學執行