

藉可視化模擬檢證 DRY AREA 應用於地下居室的氣流環境設計方法

----以高雄市某社區教會為例

黃琳琳^{*}、葉慈君^{**}

關鍵字：dry area，地下居室氣流環境，室內空氣品質，計算流體力學，被動式設計，可視化

摘 要

位於人口及建築物密度均高的社區中的教會，為了要能以有限的預算，確保足夠的活動空間，租用大樓地下室是不得不的最佳選擇。但為了避免對會友健康造成不良影響、維護其室內空氣品質，完全依賴空調將產生莫大的營運費用(running cost)。近年來被動式設計 (passive design) 在聯合國永續發展指標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 的推動下，重新受到青睞。探索省能且健康的建築設計方法，是建築人不能逃避的社會責任。

本研究透過室內空氣品質實測，掌握地下室主堂一週七天及週日二場禮拜時的二氧化碳濃度的逐時變化，同時找出室內空氣中污染物最有可能積聚的地方(死域)，整理室內氣流的課題，確認本研究主題之必要性。之後利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)解析室內氣流，並套用常見的地下居室開口部與設置方法--- dry area 於既有建築物，模擬並觀察室內氣流的變化。總共模擬了 12 組不同的 dry area 的設置位置、深度和寬度，最後以可視化呈現。嘗試找尋兼顧人員健康又省能的最佳化模式，期待最終能歸納出實現淨零耗能建築 (Net Zero Energy Building, ZEB)的地下居室的理想設計方法。

一、研究緣起與目的

位於人口及建築物密度均高的社區中的教會，為了要能以有限的預算，確保足夠的活動空間，租用大樓地下室是不得不的最佳選擇。但為了避免對會友健康造成不良影響、維護其室內空氣品質，完全依賴空調將產生莫大的營運費用(running cost)。我國室內空氣品質管理法之立法宗旨乃為維護國民健康---第一章第 1 條「為改善室內空氣品質，以維護國民健康，特制定本法。」2021 年 7 月起，為促進公私場所改善室內空氣品質及公眾使用環境，政府鼓勵公私場所取得室內空氣品質自主管理標章。

為減少使用者在地下室所感受到的閉塞感，改善建築物地下室採光與通風條件，提升室內健康環境品質，應用 dry area 的設計方法已經超過一個世紀，常見於英式地下室(English basement)。除了作為地下單元的出入口門廊，也因為可提升室內氣流而降低室內空間之相對濕度、降低室內空氣中汙染物質濃度，使建築物地下層更適合作為居室使用。然而，以提升地下居室室內空氣品質(Indoor Air Quality, IAQ)為主要目的之 dry area 設置時所需之境界條件相關依據依然闕如。

因此本研究擬藉實際建築物做為研究對象，首先紀錄實際使用狀況下的 IAQ，確認研究主題之必要性之後，配合基地長年風向、面前道路寬度、是否有建物遮蔽等外部環境因素，以計算

收件日期：XXXX.XX.XX；接受日期：XXXX.XX.XX

^{*}正修科技大學建築與室內設計系 助理教授

^{**}國立高雄大學建築學系碩士班

流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模擬不同的開口位置與開口尺寸的 dry area 對地下室氣流所帶出的影響，並以可視化呈現。以科學化數據支持 dry area 等被動式設計 (Passive Design) 方法，期待最終能歸納出實現淨零耗能建築 (Net Zero Energy Building, ZEB)的地下居室的理想設計。

二、研究方法

本研究方法分為二大階段如下：

第一階段，首先透過 IAQ 實測，掌握地下室主堂一週七天及週日二場禮拜時的二氧化碳濃度的逐時變化。同時找出室內空氣中污染物最有可能積聚的地方，即死域。並整理室內氣流的課題，確認本研究主題之必要性。本研究根據行政院環境部「公告場所室內空氣品質檢驗測定管理辦法」第三條「巡查檢驗」方法為基礎，使用可直接判讀之巡檢式檢測儀器，以不影響民眾活動為原則，進行簡易檢測室內空氣污染物濃度的巡查作業。

第二階段為利用 CFD 解析室內氣流，並套用常見的地下居室開口部與設置方法---於既有建築物沿街面一層及地下一層，模擬了總共 12 組不同開口位置、尺寸、數量的 dry area；基地外部風速與風向以中央氣象局 10 年觀測資料作為設定數值，觀察從室外藉由 dry area 引進的氣流，何者最能到達地下一層最深處？由於設置 dry area 將減少地面層樓地板的使用面積，從本研究模擬結果可望找出用「Passive Design 方法引進外氣 v.s.最多樓地板面積」的最佳化組合。

2-1 室內空氣品質 (Indoor Air Quality, IAQ) 實測

(1) 實測對象

實測對象為筆者每週固定聚會之高雄某社區教會內最多人聚集的地下一層的禮拜大廳 (Main Sanctuary)，可容納人數為 180 席。週日上午禮拜有二場，分別為 9:00-10:30 及 10:45-12:15。連續三小時以上有大量人潮進出，是一週中人數最多的時段。下午也繼續有達 4、50 人的演講課程在此進行。(表 1)

表 1 實測對象場所概要

所在地	台灣，高雄市
建築物結構 / 屋齡	RC 造 / 32 年
所在樓層/建築物總樓層	地下 1 層/地上 12 層地下 3 層
專用部分樓地板面積	495.07 平方公尺
可容納人數	180 席

(2) 檢測期間

本研究選定活動聚集最多人的時間進行為期一週的實測，觀察室內空氣中污染物質的濃度變化，作為後續模擬開設 dry area 計畫之參考。人潮為每個禮拜日主日崇拜為最多，其次是禮拜六青年團契，以及每個月 1 次的週日晚上活動。實測時間為 2022 年 09 月 11 日禮拜日早上 8 點 09 分至中午 12 點 35 分進行第一次試測，根據第一次測完後的污染物質濃度最高的點位，作為平日下午 1 點 30 分至 4 點 30 分與假日活動期間進行逐時量測的巡檢位置，採樣時間詳圖 1。巡

檢點位詳圖 2。

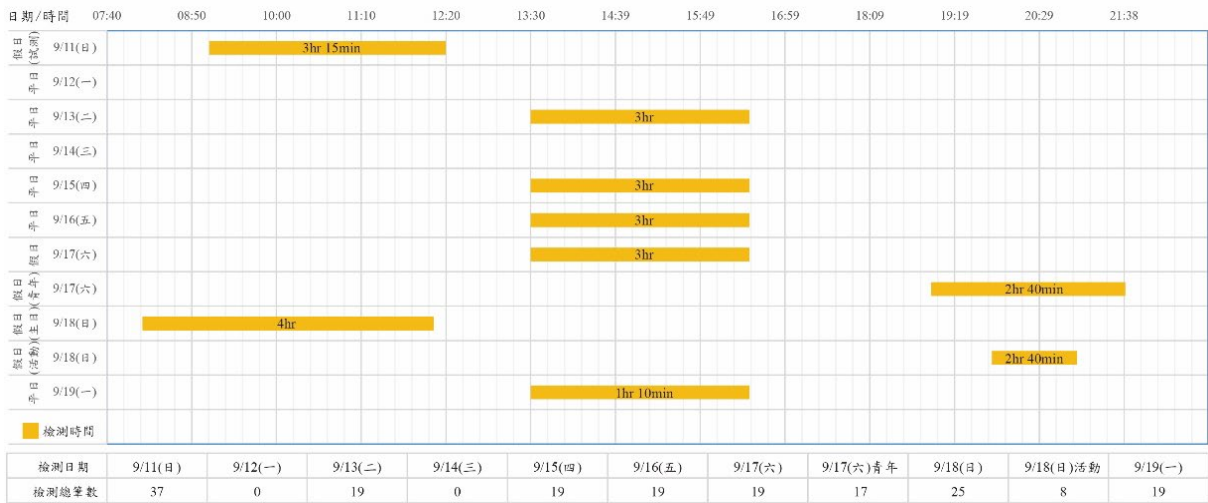


圖 1 檢測時間表

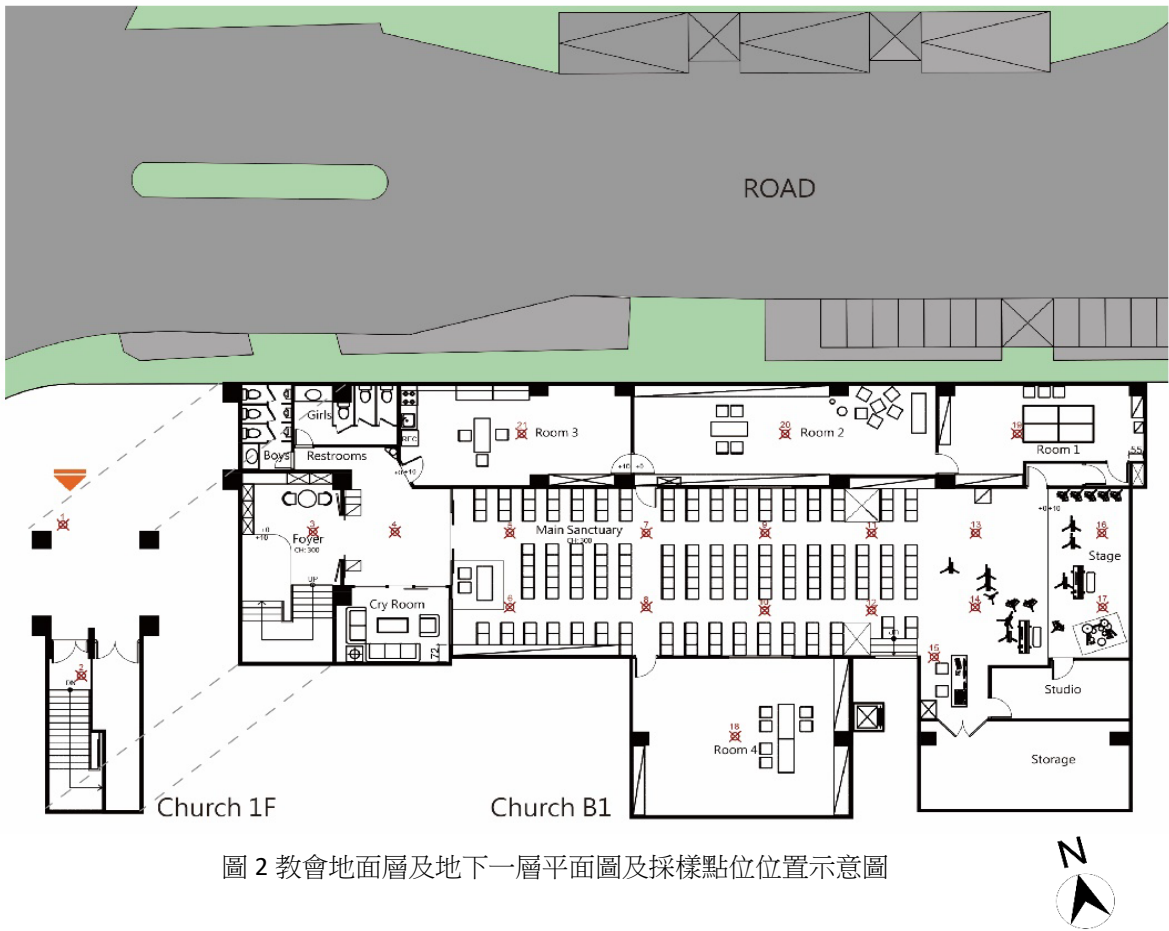


圖 2 教會地面層及地下一層平面圖及採樣點位位置示意圖

(3) 巡檢點位置、高度

在不影響禮拜進行並盡可能將對會友的打擾降至最低的前提下，於走道上以網格模式佈點採樣，共 15 個巡檢點 (圖 2)，可觀測污染物濃度最高聚集處，用以後續逐時觀測與改造模擬的巡檢點。同時也在室外設置 2 個巡檢點，並紀錄當日室外空氣品質(Air Quality Index, AQI)，以觀察各汙染物質之 I/O 比，如大於 1 則可判定汙染源來自室內，反之則來自室外。共測得 315 筆數據。(表 2)

關於巡檢高度，由於禮拜時間會眾均以坐姿為主，故本研究的巡檢高度設定於從地面上來 100cm 處，以模擬人們坐姿呼吸帶高度(圖 3)。採樣時間分成三階段，分別為「開始前」:即週日第一堂禮拜開始前;約為 08:45-09:00 之間，「中間休息」:即週日第一堂禮拜結束至第二堂禮拜開始前，約為 10:30-10:45 之間;「結束」:即週日第二堂禮拜結束後，約為中午 12:00 至 12:10。



圖 3 主日崇拜現況照片(左)及人體坐姿呼吸帶高度(右)

表 2 各巡檢點濃度變化(紅字表示超標)

巡檢點位編號	時段	溫度 (28 °C)	相對溼度 (40-70%)	二氧化碳 (CO ₂) (1000ppm)	甲醛 (HCHO) (0.08ppm)	總揮發性有機化合物 (TVOC) (0.56ppm)	懸浮微粒 (PM10) (75 µg/m ³)	細懸浮微粒 (PM2.5) (35µg/m ³)
3	開始前	26	87	535	0.041	5	44	30
	中間休息	21	70	1784	1.5	5	29	20
	結束	21	69	2276	1.196	5	41	29
4	開始前	26	81	552	0.158	5	41	26
	中間休息	20	71	1837	1.447	5	28	20
	結束	21	69	2595	0.961	5	31	22
5	開始前	26	71	565	0.148	5	34	23
	中間休息	20	70	1819	0.764	5	26	19
	結束	20	69	2884	0.678	5	29	22
6	開始前	26	71	565	0.148	5	34	23
	中間休息	20	69	1840	0.983	5	28	20
	結束	20	69	2600	0.876	5	38	28
7	開始前	25	73	588	0.158	5	32	23
	中間休息	20	70	1846	0.674	5	20	15
	結束	20	69	2739	0.631	5	23	18

8	開始前	24	73	599	0.124	5	39	28
	中間休息	20	68	1864	0.622	5	22	16
	結束	20	70	2778	0.601	5	18	14
9	開始前	22	64	685	0.081	4.427	25	19
	中間休息	20	68	1905	0.497	5	17	11
	結束	20	69	2729	0.633	5	22	17
10	開始前	24	70	607	0.107	5	30	22
	中間休息	20	68	1886	0.538	5	17	12
	結束	20	70	2802	0.575	5	20	15
11	開始前	22	62	687	0.068	3.86	21	16
	中間休息	19	68	1839	0.445	5	5	3
	結束	19	67	2790	0.516	5	17	14
12	開始前	23	68	622	0.079	4.878	28	20
	中間休息	20	70	1858	0.47	5	19	14
	結束	20	68	2814	0.522	5	18	14
13	開始前	23	66	681	0.072	4.492	25	19
	中間休息	20	70	1858	0.47	5	19	14
	結束	20	68	2749	0.605	5	22	17
14	開始前	23	67	663	0.075	4.678	23	17
	中間休息	20	70	1844	0.472	5	21	15
	結束	20	68	2845	0.566	5	24	18
15	開始前	24	60	714	0.223	5	24	18
	中間休息	19	71	1841	0.462	5	10	7
	結束	20	70	2904	0.556	5	28	21
16	開始前	23	62	687	0.07	4.121	25	19
	中間休息	19	70	1890	0.466	5	17	12
	結束	20	70	2924	0.558	5	26	20
17	開始前	23	64	687	0.07	4.091	23	17
	中間休息	20	70	1903	0.463	5	17	12
	結束	20	70	2941	0.558	5	23	18
結束 時點	平均值	20	69	2758	0.669	5	25	19
	中央值	20	69	2790	0.601	5	23	18
	外氣值	25	88	492	0.018	2.937	51	36
	I/O 比	0.8	0.8	5.6	37.2	1.7	0.5	0.5
總計 315 筆								

(4) 巡檢採樣項目


本研究根據我國環境部提出之室內空氣中污染物質定義，除去細菌及真菌等培養後需要專業滅菌設備之生物性污染物質後，進行量測。又因為該空間亦無燃燒行為及辦公機器，因此也省略了一氧化碳(CO)及臭氧(O₃)之量測。針對溫度、相對溼度、二氧化碳(CO₂)、甲醛(HCHO)、總揮發性有機化合物(TVOC)、懸浮微粒(PM₁₀)、細懸浮微粒(PM_{2.5})等進行實測並紀錄之。

因考慮在地下室原本就比在地上層的通風較不足，又加上教會主要人群屬瞬間聚集與離場於室內空間的現象，藉由二氧化碳(CO₂)濃度為觀察室內空氣汙染物曝露之代表。

(5) 本研究使用之巡檢儀器

以盡可能不影響現場禮拜進行為原則，本研究採用之巡檢式儀器如表 2 所示。

表 3 檢測儀器規格

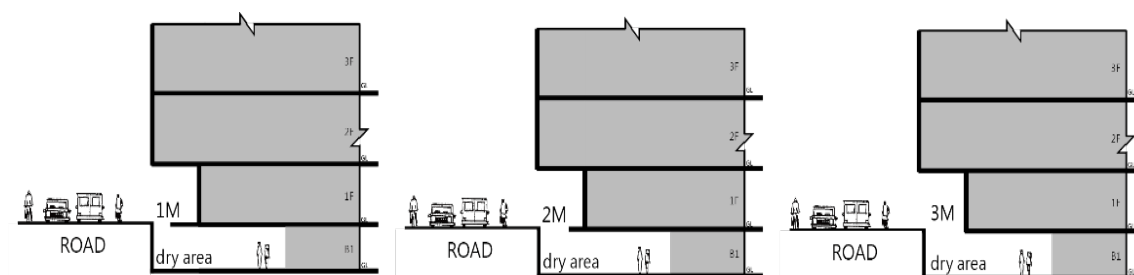
儀器名稱	檢測項目	單位	檢測範圍值	儀器照片
Air Mentor 2S	1. 溫度	1. °C	1. -20°C ~80°C	
	2. 相對溼度	2. %	2. 0%~100%	
	3. 二氧化碳(CO ₂)	3. ppm	3. 400ppm~10000ppm	
	4. 甲醛(HCHO)	4. ppm	4. 0ppm~1.5ppm	
	5. 總揮發性有機化合物(TVOC)	5. ppm	5. 0.020ppm~10ppm	
	6. 懸浮微粒(PM ₁₀)	6. µg/m ³	6. 0~1000µg/m ³	
	7. 細懸浮微粒(PM _{2.5})	7. µg/m ³	7. 0~1000µg/m ³	

2.2 計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)解析於建築流場

計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)，於建築流場預測方式經紊流預測模型(Turbulence Model)近似運算，其可進行建築室內外流場之細部狀態解析。藉由電腦 CFD 運算之操作，可預測建築室內氣流及通風路徑可視化呈現，是近十年來相當普遍的分析預測工具。

為實踐淨零能耗建築(Net Zero Energy Building, ZEB)，以被動式設計(passive design)手法運用自然通風進行地下居室之氣流。本研究使用 Wind Perfect DX¹模擬自然通風，進行 dry area 設置可行性分析。檢測完室內空氣污染物濃度數據後，找出汙染物質濃度最高的點位，而後進行基地自然通風風向位置模擬，再進行 dry area 的設置實驗。dry area 的開挖長寬比，分別設定寬度 1 公尺、2 公尺、3 公尺進行 CFD 模擬自然通風路徑(圖 4)，並設定 4 個不同的 dry area 區域，以觀察最佳化選項。

¹ Wind Perfect DX 是一套針對建築資訊模型 (Building Information Modeling, BIM) 和地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 設計開發的 3 維熱流體解析軟體，透過 AutoCAD、Revit 等 3 維 CAD 系統 (3D CAD) 的資料連結，以往需要耗費相當時間的模型建置或邊界條件的設定都可以簡單迅速進行，完成 DXF、STL、GIS 屬性資料等的讀取。



三、研究結果

3.1 污染物濃度檢測結果

(1) CO₂ 濃度實測結果

主日崇拜大廳在剛開放時(8 點 10 分共 5 人)，濃度在 535~714ppm，還未超過基準值；到了中場休息---第一場要換第二場(10 點 40 分共 70 人)時，每個巡檢點濃度值範圍則到了 1784~1903ppm，與禮拜開始前增加 1189~1249ppm，已大幅超過基準值 1000ppm；在主日崇拜結束(12 點 35 分共 90 人)時更達到 2276~2941ppm，與中場休息再增加 492~1038ppm，許多巡檢點二氧化碳濃度值都均勻增加，已大幅超過標準值。逐時變化詳圖 5。15 個巡檢點之二氧化碳濃度逐時變化數據記錄詳表 4。

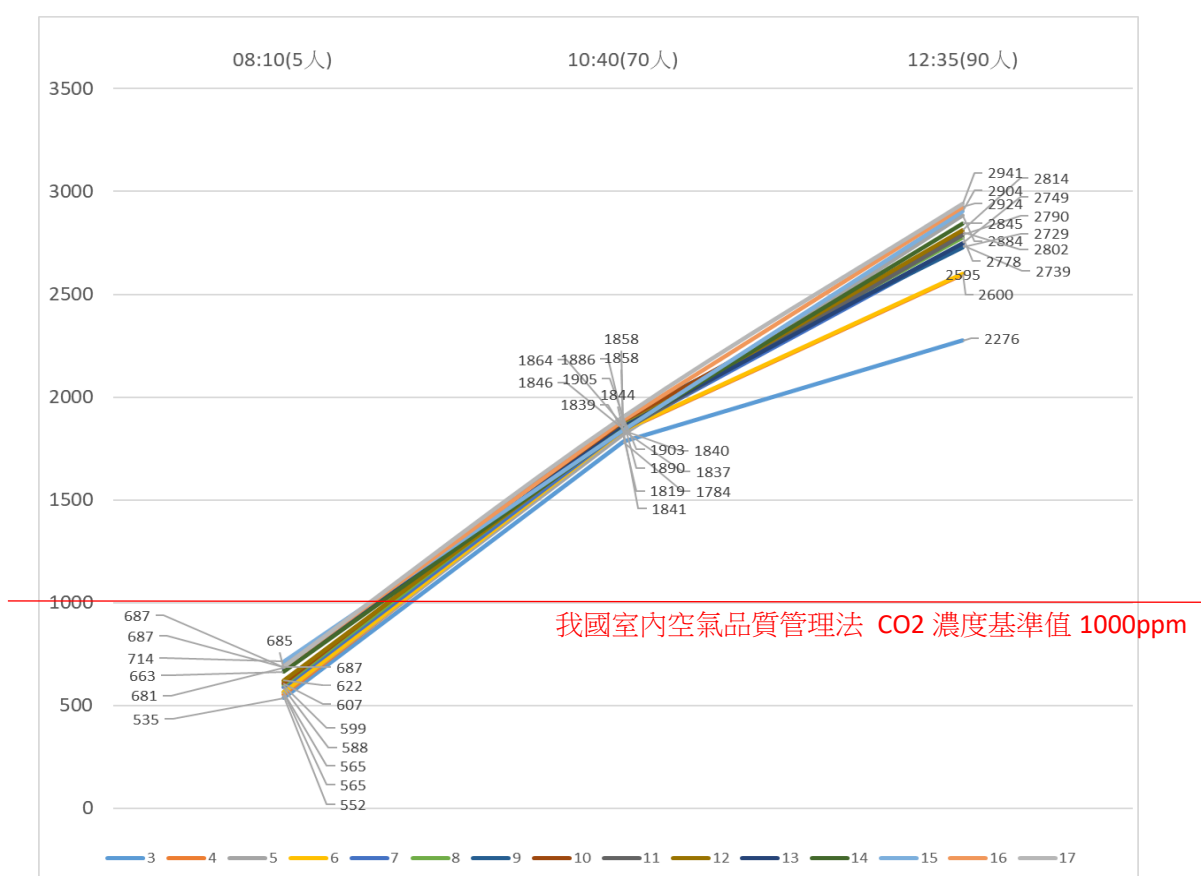


表 4 地下一層禮拜大廳 15 個巡檢點之二氧化碳濃度逐時變化紀錄表(單位:ppm)

巡檢點位編號	剛開放時 08:10(5 人)	中場休息 10:40(70 人)	主日崇拜結束 12:35(90 人)
3	535	1784	2276
4	552	1837	2595
5	565	1819	2884
6	565	1840	2600
7	588	1846	2739
8	599	1864	2778
9	685	1905	2729
10	607	1886	2802
11	687	1839	2790
12	622	1858	2814
13	681	1858	2749
14	663	1844	2845
15	714	1841	2904
16	687	1890	2924
17	687	1903	2941

(2) CO₂ 定點連續一週監測結果

連續一週監測的巡檢點因為必需不影響活動的進行，選為巡檢點 11 作為此次連續監測的定點；平日下午禮拜堂開放時間均維持在 485ppm~795ppm 之間，均在標準值內；但在禮拜六有活動時，人數從 5 人至 23 人時，CO₂ 就已逼近標準值，禮拜六晚上活動開始前已到 800ppm，結束時已上升至 2001ppm，為標準值 1000ppm 的 2 倍。

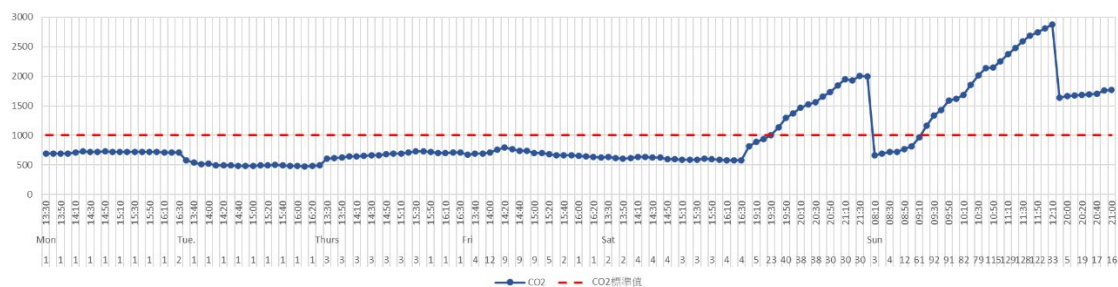


圖 6 CO₂ 一週逐時變化折線圖

禮拜日主日崇拜時開始前 8 點 10 分，CO₂ 一度降至標準值之下的 669ppm，但活動開始後不斷上升，到結束前 12 點 10 分已上升至 2873ppm，已接近標準值的 2.9 倍。禮拜日晚上為一個月會舉辦 1 次的活動，活動時間在晚上 8 點至晚上 9 點，活動開始前 CO₂ 在 1666ppm，雖然比早上活動結束前下降了 1207ppm，但仍然超過標準值，在活動期間，CO₂ 數值不斷升高，結束前到了 1770ppm，超過標準值近 1.8 倍。CO₂ 一週逐時變化詳圖 6。

3.2 CFD 自然通風與 dry area 設置模擬結果

(1) 基地 CFD 自然通風模擬結果

根據中央氣象局十年觀測資料及 9/11(日)測試日當日風向與當日平均風速取得自然通風數值，作為基地現況與設置 dry area 的 CFD 自然通風模擬之數據參考。根據基地 CFD 模擬結果(圖 7)，在基地騎樓前的風速已超過 1.5m/s 以上。

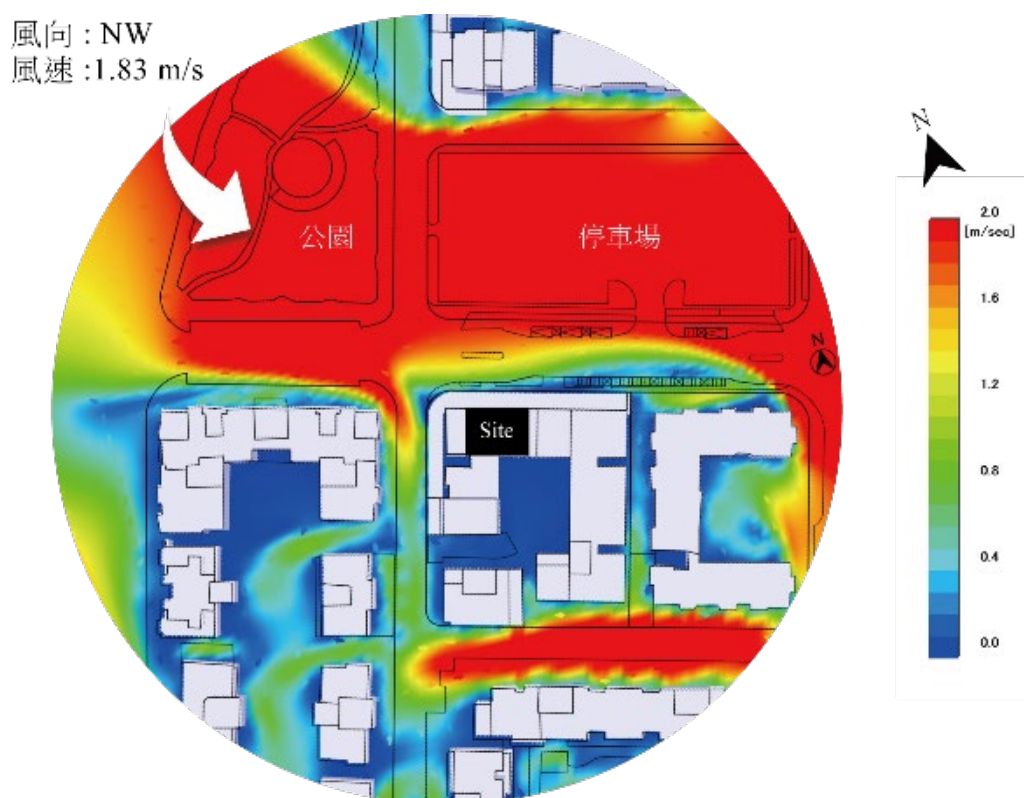


圖 7 基地 CFD 自然通風模擬圖

(2) 設置 dry area CFD 自然通風模擬結果

依據地下室一樓開口可對應地下室的位置為目前騎樓位置，寬度為既有柱距，給予 1 公尺、2 公尺、3 公尺的不同深度之開口，模擬外氣進到地下一樓時的風速與氣流分佈情形(圖 8)。可以知道在開口深度為 2 公尺與 3 公尺時，風場較能均勻地分佈至室內空間中。

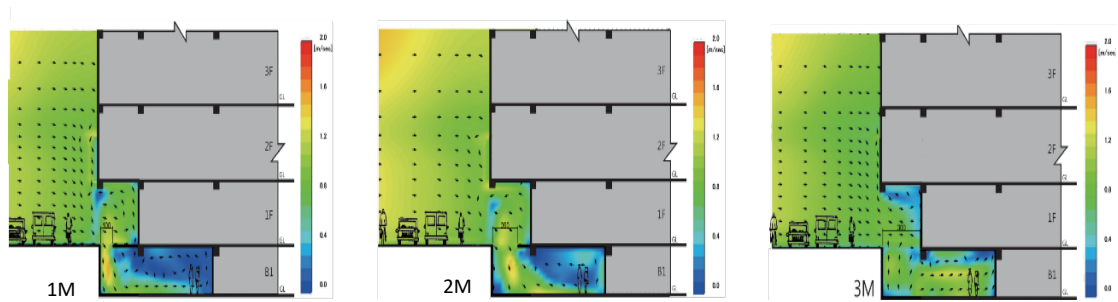


圖 8 Dry Area 開口深度 1 公尺、2 公尺及 3 公尺之自然通風 CFD 模擬

此外，本研究總共模擬了 12 種 dry area 設置位置，自然通風 CFD 模擬結果詳圖 9~圖 12。分別為柱距較小、全開開口時呈現正方形 9M² 樓板挖空的 A 區與 B 區。另外 A,B 區之間有一區柱距較大，實驗設計西半區為 A'區，東半區為 B' 區。因為有可能將大柱距區不分區使用，同時希望能盡可能確保地面層樓地板可使用面積，因此實驗模擬分成「A+B」、「A'+B」、「A+B'」、「A'+B'」等四種模矩，平面開口寬度相同，測試不同位置及深度所帶出之不同影響。當開口深度挖 1 公尺時，地面層樓地板損失為 6 M²，2 公尺時，地面層樓地板損失為 12 M²，3 公尺時則為 18 M²。

CFD 模擬 A+B 的 1 公尺深至 3 公尺深 3 個、開口 A'+B 的 1 公尺深至 3 公尺深 3 個、A+B' 的 1 公尺深至 3 公尺深 3 個、以及 A'+B' 的 1 公尺深至 3 公尺深 3 個，總共 12 種不同設置位置及開口深度的 dry area。

結果整理如下：

- I. 開口 A(柱距較小，開口三公尺深時，平面為正方形)因為距十字路口很近，是外氣主要通風路徑，開口方向也與基地長年風向呈垂直位置，因此在開口深度 1 公尺時，便能引進外氣達室內居室最深處。隨著開口部變大，開口深度 3 公尺時已能有效照顧到禮拜堂後區的空氣需求。但因為開口部越大，犧牲的地面層可用樓地板面積越大，如果能在地下居室角落設置循環扇，則開口 A 之

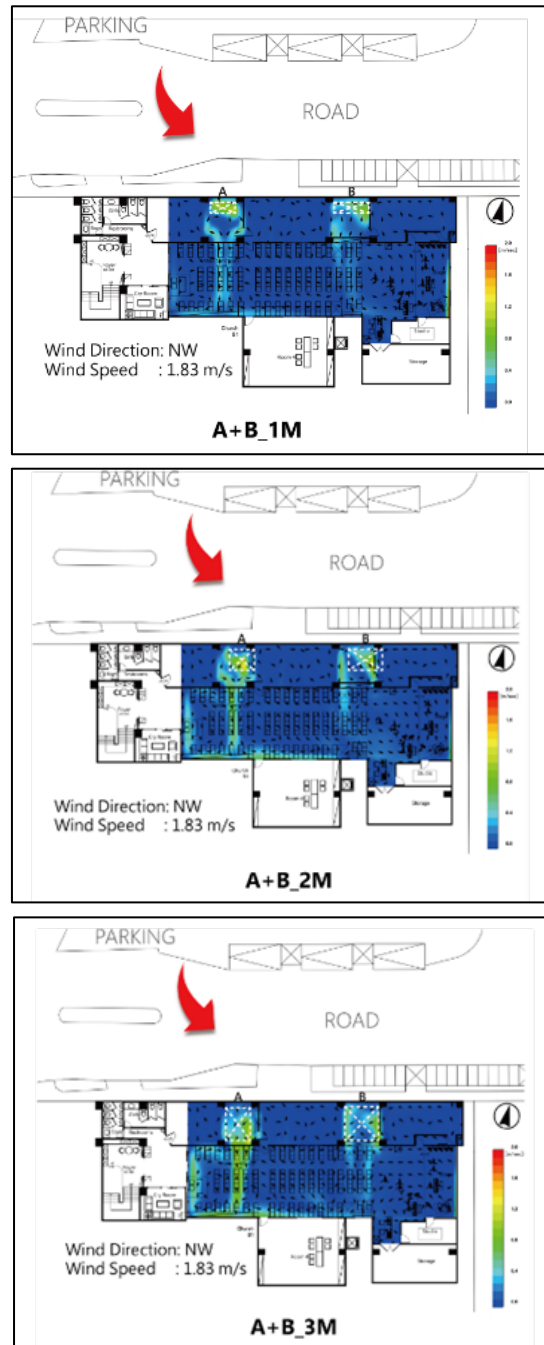


圖 9 Dry Area 設置位置 A+B 搭配深度 1 公尺~3 公尺之 CFD 風場模擬

開口深度 2 公尺應是最佳選項。(圖 9)

- II. 開口 B 的位置相較其他開口風速流動速率較差，雖然前方並無建築物遮蔽，是路邊停車位 3 格，加上一整片停車場。但由於車輛經常停滿，自然形成高度 130 公分左右的屏障，相較靠近十字路口的 A 開口，相對風速較低，也較難以進到地下居室，對地下居室空氣中汙染物質的移除能力亦較差。(圖 9)
- III. 開口 A' 是相鄰開口 A 之較長柱距區的西半邊，與室外十字路口僅僅移動 3 公尺左右，在開口深度 1 公尺時，從 CFD 模擬就可看出風速差非常多，與最遠的開口 B 已經差不多。可見

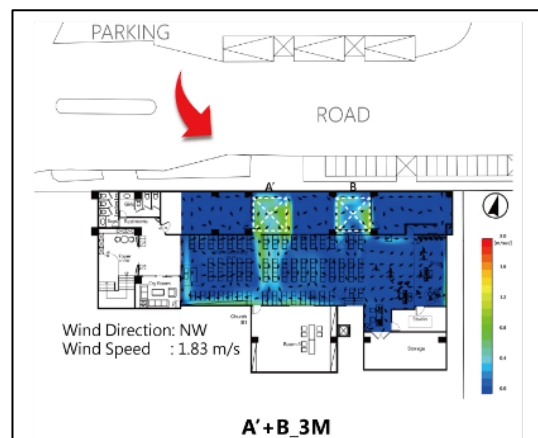
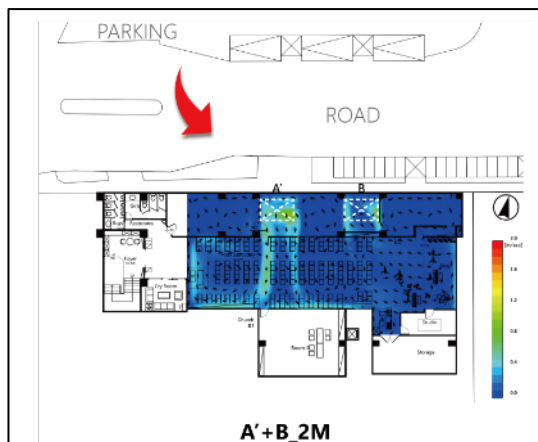
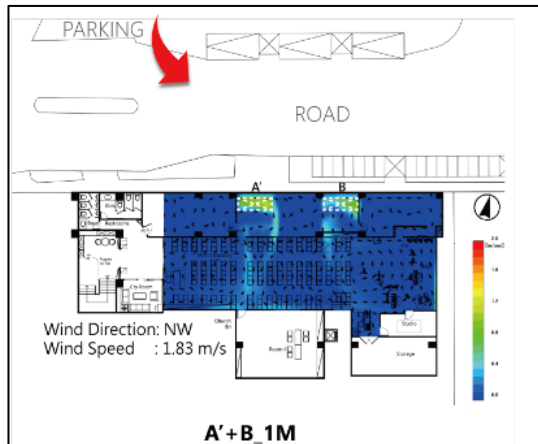


圖 10 Dry Area 設置位置 A'+B 搭配深度 1 公尺~3 公尺之 CFD 風場模擬

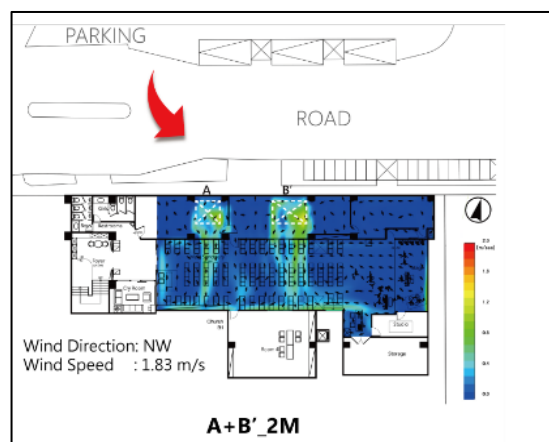
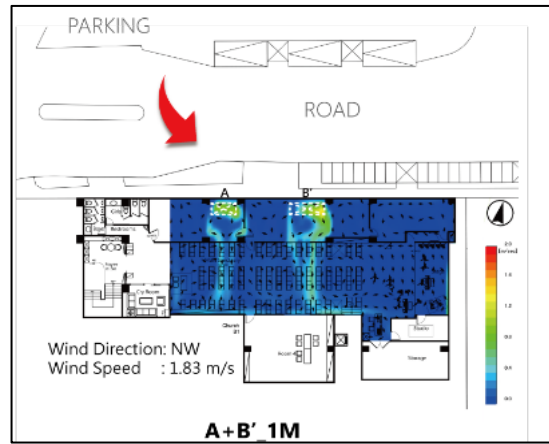


圖 11 Dry Area 設置位置 A+B' 搭配深度 1 公尺~3 公尺之 CFD 風場模擬

建築物開口部設置位置與長年風向關聯至為重要。當 A'開口深度達 3 公尺時，CFD 模擬結果可知，進入主堂中央座位區之風速可達 0.8m/sec.，應可有效降低該區的 CO₂ 及其他汙染物質濃度。(圖 10)

- IV. 開口 B' 是相鄰開口 B 之較長柱距區之東半邊，往室外十字路口方向移動 3 公尺左右，在開口深度 1 公尺時，從 CFD 模擬就可看出風速好非常多，與開口 A 已經差不多。可見建築物開口部設置位置與長年風向關聯至為重要。當 B' 開口深度達 3 公尺，搭配開口 A 已經可以使新鮮外氣幾乎可以送達禮拜堂的四分之三座位區。CFD 模擬結果可知，進入主堂座位區之風速可達 1m/sec.，應可有效降低該區的 CO₂ 及其他汙染物質濃度。(圖 11)

- V. 最後的假設是 A'+B'，亦即直接將柱距最大區直接挖空。CFD 模擬結果顯示，開口深度 1 公尺時，就足以把外氣帶至禮拜堂最深的牆邊，且風速有 0.5m/sec.，足以帶走空氣中汙染物質。然而，當實驗繼續增加開口深度至 2 公尺、3 公尺時，卻發現雖然引進之新鮮外氣逐漸穩定增加，卻仍仍只照顧到禮拜堂中段位置區。對整體的 IAQ 貢獻有限。(圖 12)

- VI. 四種不同開口部位位置組合中，觀察到「A+B'」具有最均勻的風場與有利的風速。「A+B'」深度 1 公尺時對於後方座位通風較為有利，但在前面較無風速流動的區域；A+B'從深度 2 公尺時，新鮮空氣路徑就幾乎可以蓋及大部分區域，A+B'在 3 公尺時，則為 12 個模擬中表現最均勻的風場。

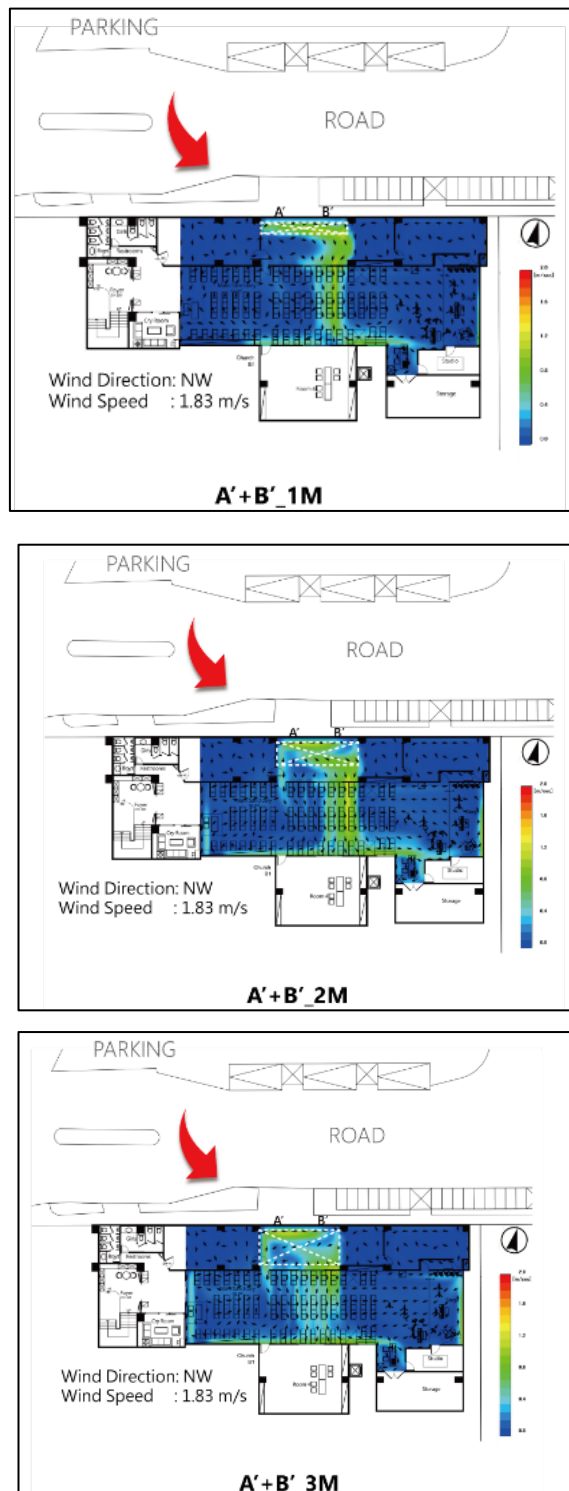


圖 12 Dry Area 設置位置 A'+B' 搭配深度 1 公尺~3 公尺之 CFD 風場模擬

四、結論

本研究主要著眼於建築物設計階段的決策模式，藉由 CFD 模擬室內外氣流的可視化手法，檢討開口部位置、大小與外部環境之關聯，探討兼顧使用者健康與環境永續之設計方法的可行性，並刻意忽略現行法規的限制。包含本研究標的的禮拜堂在內，目前辦公大樓或大型集合住宅的地下居室依賴冷房空調系統、引進外氣的換氣機能不足之現象，即所謂的「換冷不換氣」仍相當常見。我國室內空氣品質管理法實施已邁入第 12 年，依然有多數建築物的 IAQ 無法符合法定基準。且未合格之列管單位仍然因為建築物當初設計未顧及使用階段的營運成本及使用者健康影響，而必須花費更多的設備費用。

近年來在聯合國永續發展指標（Sustainable Development Goals, SDGs）的推動下，重視建築物理環境、強調自然通風、晝光利用等藉自然力的非動能設計 Passive Design 重新受到青睞。重新思考建築物的本質，探索省能且健康的建築設計方法，是現今世代中建築人不能逃避的社會責任。