

生物安全實驗室供風配置之模擬分析

Analysis of Alternative Layouts for Air Distribution of a Biosafety Level Laboratory

王輔仁、黃靖雄、黃建民
Fu-Jen Wang, Jing-Syong Huang, and Jeng-Min Huang

國立勤益科技大學冷凍空調與能源系
Department of Refrigeration and Air Conditioning and Energy,
National Chin-Yi University of Technology
E-mail: fjwang@ncut.edu.tw
E-mail: poke03kimo@yahoo.com.tw
E-mail: jmh@ncut.edu.tw
NSC: 100-2221-E-167-023-MY3

摘要

負壓生物安全實驗室的感染控制是非常重要的，危害的避免須仰賴於空調系統對室內氣流流向的維持與控制。本研究以某地區醫院之生物安全第三等級實驗室進行調查，於實驗室內設備位置已固定且多個排風口已確認配置位置之情況下，利用計算流體動力學（CFD）進行模擬，探討各種供風口氣流模式對於實驗室之影響，並以 CO₂ 作為濃度衰減之示蹤氣體，搭配局部平均空氣年齡評估分析，結果顯示，CFD 輔助模擬可以在設計階段確定最佳實踐策略，改變氣流模式不僅能對重要區域提供較佳之汙染移除效率，同時也可獲得整體實驗室較佳之氣流分佈。

關鍵字詞：生物安全實驗室、氣流分佈、計算流體力學、局部平均空氣年齡。

Abstract

It is vital to provide negative-pressurized environment for infectious control in the biosafety level (BSL) laboratory. In this study, numerical simulation of a full-scale BSL-3 laboratory has been carried out in a district hospital. Computational fluid dynamics (CFD) simulation were conducted to investigate the airflow distribution of the BSL-3 laboratory. The results from computer simulation revealed that the improvement of airflow distribution could be achieved satisfactorily through alternative layout of supply and return air. Different arrangement of air distribution could be assessed extensively not only by airflow simulation but also by concentration decay method using CO₂ as tracing gas and local mean age of air to achieve the infectious control purpose. It was also expected that CFD aided simulation could identify strategies for best practice at design stage as well as reduce running cost at full operation.

Keywords: biosafety level laboratory, air distribution, computational fluid dynamics, local mean age of air

1. 前言

高階生物安全實驗室為了進行疫苗的研發與分析常伴隨著高度風險，有鑑於此，世界衛生組織(World Health Organization, WHO)[1]與美國國家衛生研究院(National Institutes of Health, NIH)[2]出版了相關的實驗室生物安全手冊，訂定對動植物等生物安全實驗室的規範，對於生物危險群(Risk Groups, RG)與生物安全實驗室等級(Biosafety Level, BSL)有詳細的定義解釋，並說明生物安全等級是因應來自不同危險群微生物所需之實驗室設計特點、建築構造、防護設施、設

備、操作及實驗過程等綜合因素而指定，而生物技術、化學品、用火及電氣安全等各種實驗室可能的危害也都有詳細的說明。

CFD 數值模擬方面，Lin[3]等人於製程潔淨室採用天花板 FFU 供風，並以兩種回風模式進行不同供風層壓力的研究探討，除牆回風系統外，使用風車結合乾盤管(Dry Coil)稱之 FDCU(Fan Dry Coil Unit)，設置於潔淨室天花板之製程機台正上方，並以超音波風速計與熱電偶溫度記錄器實際量測其紊流強度以及機台熱移除之效果，由研究結果顯示 FDCU 回風形式相較於牆回風形式

室內產生渦流及紊流情況有較低的發生機率。Liu[4]等人，認為潔淨空氣以向下單向供應的方式能有效地減少手術部位感染，但其缺點是不可避免的，在這項研究中探討另一種水平向氣流模式的氣流性能，透過現場測試空氣中的微塵子粒子和計算流體力學(CFD)模擬方法，評估水平單向氣流控制傳染病效益。結果表明，當供應風和回風設施安裝在同一側壁保持通風狀態水平向流動的手術室，醫療燈熱浮力在手術區域水平氣流模式沒有明顯的影響，供應空氣的系統性能與傷口源的相對位置是密切相關的。

在通風效率評估方面，Sandberg[5]在該研究中提出了許多評估通風效率的指標，並說明衡量空氣污染物稀釋的效力可直接測量空氣流量或是選擇示蹤氣體稀釋，但想要精確測量流動的空氣在技術上是極其困難的，需要複雜的計算才可能得出室內污染物的分佈，而示蹤氣體方式是較為廣為使用的。ASHRAE Handbook [6]中提及各種通風狀態及通風測試方法，例如濃度衰減或增長法(concentration decay or growth)、定濃度法(constant concentration)及衝量注入法(pulse injection)三種不同的示蹤氣體方法。Chung[7]等人利用 CO₂ 作為示蹤氣體評估室內通風效率，以八種不同的通風模式進行通風效率的研究，透過數值模擬來預測氣流模式和通風性能，並進行實驗以驗證在室內空氣污染物的分佈模擬結果，以相對通風效率進行評估，它清楚地表明，不同的測量平面會導致略有不同的相對通風效率，但測得的時間對在同一平面的相對通風效率影響不大，而不同風口的配置對通風效率的影響與空氣換氣率對通風效率的影響相較之下要大的多。Wang[8]等人同樣使用 CO₂ 作為示蹤氣體進行濃度衰減，透過實地量測醫院手術室閒置時之壓差、溫度、濕度、微塵粒子數以及微生物數等各項環境參數，發現手術室閒置時能在不影響環境品質之前提下，減少送風量 50% 以上以獲得節能的效果，並使用 CFD 模擬不同供風速度下，手術室內的情況。而 Tung[9]等人在一間呈負壓狀態的私人浴室，實驗以連續定流量釋放示蹤氣體六氟化硫(SF₆)濃度衰減的方法，以空氣年齡(Age of air)、空氣交換效率(Air exchange efficiency, AEE)、異味排除效率(Odor removal efficiency, ORE)三個評估指標，評估三種不同的通風配置方案，並探討浴廁的通風效果。

2. 系統描述

目前負壓空間的相關研究大多以醫院之負

壓隔離病房為主，鮮少以負壓實驗室作為研究對象，且研究區域大都專為實驗而建造，並非實際運作之場所，故本研究以實際之生物安全第三等級(Biosafety Level 3, BSL-3)實驗室進行研究探討，並依據現場設備尺寸，建立數值計算模型，實驗室內部空間如圖 1 所示。室內大小為 L×W×H=8.5m×7m×2.4m，實驗室正中間為 L×W×H=2.6m×1.5m×0.8m 的主實驗桌，上方有兩層 L×W×H=2.6m×0.66m×0.1m 間隔 0.2m 的置物架，培養箱(Incubator)擺放於四個位置，BSC、培養箱與-80℃冰箱(Freezer)皆與牆距離 0.2m，兩台 4℃之檢體冰箱(Refrigerators)則離牆 0.1m。三個牆角分別設有離地 0.2m 開口大小為 L×W=0.3m×0.5m 的排氣口，另外於染色區(Stained region)與離心機(Centrifuge)上方皆有設置排氣口，染色區排氣口為 L×W=1.3m×0.9m，離心機上方則分為兩個 L×W=0.8m×0.64m 間距 0.1m 的排氣口，實驗室內有兩台 Class II Type B2 之生物安全櫃(Biological Safety Cabinets, BSC)，設備依照美國 NSF/ANSI 49 生物安全櫃標準，操作視窗於工作高度 0.2m 時以 0.51m/s 進行抽風外，上方還有一個大小為 L×W=0.34m×0.22m 的回風口提供設備回風，單一 BSC 使用風量約為 995CMH。在負壓實驗室門扇的開啟是必須的，因此氣流的滲入是無法避免的，本研究也考量了門下 L×W=1m×0.02m 的縫隙。本研究提出的三種天花板之供風口設計方案，以五個 L×W=0.6m×0.6m 的供風口進行排列，期望在實際工程可達到之設計前提下求得最佳的氣流模式，圖 2 為建立之模擬空間。

本實驗室主要用途在於結核分枝桿菌的培養與分析，除了對檢體的前處理步驟會在實驗室活動空間進行外，其餘可能產生氣膠之操作程序或較具危險性的實驗皆會在 BSC 內完成動作，BSC 的保護方式在於設備本身製造的氣流狀態能抑制氣膠飄散或外洩，若實驗室因為停電、設備一時故障，造成操作台內之氣流無法維持，此時則很可能會使實驗空間內之人員遭受感染，也因此實驗室內兩台 BSC 周遭可視為潛在風險較高的區域，而被移至培養箱進行培養完成的檢體，其檢體危險性又將比培養之前來得高，故本文也將培養細菌的設備前方視為危險區域納入探討。

3. 數值模擬

3.1. 基本假設

(1)流體為不可壓縮流、理想氣體，密度除外，物

理性質不隨溫度而變。

- (2)進風速度為均勻分佈。
- (3)不考慮浮力效應之影響。
- (4)忽略黏滯耗散和輻射效應。
- (5)污染物設定為 CO₂。

3.2. 邊界條件

- (1)供風口使用入口邊界條件，依據總供風量設計值 3420CMH 決定風速，平均風速為 0.528m/s，溫度為 292.15K(19°C)。
- (2)排風口使用出口邊界，其質量守恆且均為自由邊界，總排風量約為 4240CMH。
- (3)門縫滲入風量由實驗室外之體積空間提供，為室內總排氣風量與總供應風量之差決定。
- (4)由於本研究採用標準 k-ε turbulent model，壁面附近流體速度均以牆函數(wall function)處理。
- (5)污染物初始濃度為 3000ppm。
- (6)污染物背景濃度為 350ppm。

本文以暫態方式進行模擬，以 5 秒為單位模擬示蹤氣體於室內衰減的過程，總模擬時間為 600s。Fluent 以有限體積(finite-volume approach)法來建立差分方程式，紊流模式的選擇部分，本文參考了[7]之簡單模型量測數據先進行紊流模式的比較，最終發現使用標準 k-ε turbulent model 搭配一階迎風法(Upwind differencing, UD)加以解離，於一般簡單空間內可獲得較佳的求解結果，而整個耦合迭代的計算以 SIMPLE 方法求解，建立三維空間且利用 CFD 來預測生物安全實驗室內氣流分佈相互之關係，探討不同供風配置對污染移除之影響。

3.3. 空氣年齡

空氣年齡(Age of air)是在建築物內部區域或是空間外部空氣的時間長度，對於一個建築空間來說，年輕的空氣是剛進入建築的外氣或是滲入建築物的新鮮空氣，而較老的空氣可能是在該建築物的某些位置或是在排氣的區域。空氣年齡的單位是時間，通常為幾秒或幾分鐘，所以空氣年齡不是真正的效率或效益的量度，然而，空氣年齡的概念卻已在歐洲得到了廣泛的認可，北美也開始廣泛使用[6]。當空氣分配系統的特性是變化的，空氣年齡與外部空氣供應量會成反比。對現有建築物使用的衰減或增長示蹤氣體的方法可以計算空氣年齡，在本文使用衰減法計算，其局部平均空氣年齡(local mean age of air)之計算公式如下：

$$\overline{A_p} = \frac{\int_0^{\infty} [C_p(t) - C_p(\infty)]}{C_p(0) - C_p(\infty)} \quad (1)$$

其中 Cp(0)、Cp(t)與 Cp(∞)分別代表著時間在 0、t

秒以及穩態時 P 點之濃度值。

4. 結果與討論

為了尋求較佳的供風配置，本研究假設實驗室工作人員將污染物打翻後，污染物飄散至空氣中且均勻混合之情況，使用 CO₂作為示蹤氣體，藉由濃度衰減的方式模擬評估人員於站立狀態下呼吸帶的污染物排除效果。當總供風量、總排風量不變的情況下，以天花板上五個供風口排列出三種不同的供風口配置，與排氣量較多之面分別呈水平、垂直、L型排列，依序稱為 Case A、Case B、Case C，如圖3所示。圖4為模擬局部區域監測取點位置示意圖，取點高度為 1.6m，位置點分別為兩台 BSC 前方兩點 P1、P2 以及培養箱前方兩點 P3、P4，監測時間為 600s，記錄三種不同供風口配置的污染物濃度變化，污染移除之監測結果如圖5所示。

在 Case A 中供風口與排氣面呈水平排列，位置 P1 的污染移除速率相當緩慢，大約在 t=50s 後才開始向下衰減，直至 t=500s 左右才趨近穩定，而位置 P2 情況相較之下來得好一些，於 t=20s 左右污染移除曲線開始下降，t=120s 時下降趨勢逐漸趨於緩和，P3 有不錯的污染移除速率，大約於 5s 後曲線開始下降，而位置 P4 的污染移除速率最為快速，幾乎於空調開始運轉即立刻下降。在供風口與排氣面呈垂直排列配置的 Case B，則沒有像 Case A 有污染移除速率特別快或特別慢的現象存在，四個位置的監測結果整體上趨勢較為集中分佈。另外在採取 L 型排列的 Case C 中，位置 P4 的污染移除速率，雖並不如 Case A 於空調運轉之初便立即衰減，但其污染移除速率仍然相當快速，而 P1、P2、P3 與 Case B 之下降趨勢較於相近，Case B 與 Case C 相較於 Case A 的監測位置點表現出更集中的下降趨勢，可推測此 L 型案例供風口的排列方式與垂直型可能產生較均勻的氣流場所致。

為了更了解 BSC 前方污染物分布情形，吾人於污染移除的過程中擷取 t=180s 時之濃度場進行比較，如圖6，在 Case B 氣流模式下該截面能有相當均勻的濃度分佈，而 Case A 在左方的 BSC 區域還可接受，但右方 BSC 部分則仍可看到高濃度之污染物向四處擴散。為清楚呈現模擬結果，吾人利用局部平均空氣年齡輔助評估，進一步將三種供風案例的污染移除曲線進行量化，由圖7可觀察到 Case A 與 Case C 在位置 P2、P3、P4 相當接近，但 Case A 在 P1 位置點的空气年齡卻擁有三個案例中最長的局部空氣年齡。Case B 雖然局部空

氣年齡與Case C差距不大，但除了位置P1外其餘三個位置之局部空氣年齡皆為最長。至於Case C不僅在P1、P4有最年輕的局部空氣年齡外，在P2、P3與另外兩個案例的差異也不高，考量到BSC進行的實驗動作與培養箱區域有意外發生的可能性，吾人認為BSC區域相對來說須有較高的汙染移除能力為佳，需有同時兼顧潛在危險區及整體實驗室之均勻之氣流分佈型態。雖說Case A在P2至P3的表現最佳，但在位置點P1與Case C的局部空氣年齡落差較大，於P4位置又與Case C空氣年齡相近，且由濃度場截面可觀察到Case A於實驗室內氣流分佈明顯不均，因此吾人認為選擇L型之供風配置為實驗室最佳選擇。

5. 結論

本研究在一個已規劃實驗室設備與排風口位置的BSL-3實驗室進行供風口的配置設計，提出三種供風口配置，並利用CFD數值模擬軟體進行模擬，由示蹤氣體CO₂之濃度衰減法搭配局部平均空氣年齡進行評估，由模擬結果可得知，在總供風量相同、總排風量也相同的條件下，實驗室排氣量最多的一側與天花板供風口形成垂直排列與L型排列方式，對於BSC與培養箱區域將可獲得較佳之汙染移除效率，若考慮整體實驗室之氣流均勻度，採用L型排列則可獲得最佳氣流分佈型態。

6. 誌謝

本研究國科會計劃(NSC-100-2221-E-167-023-MY3)補助，特此致上感謝之意。

7. 參考文獻

1. World Health Organization, "Laboratory biosafety manual," 3rd Edition, 2004.
2. National Institutes of Health, NIH guidelines for research involving recombinant DNA molecules (NIH guidelines), 2011.
3. T. Lin, Y. C. Tung, S. C. Hu, and Y. J. Chen, "Experimental Study on Airflow Characteristics and Temperature Distribution in Non-unidirectional Cleanrooms for Electronic Industry," Building and Environment, pp.1235-1242, 2011.
4. J. J. Liu, H. D. Wang, and W. Y. Wen, "Numerical Simulation on a Horizontal Airflow for Airborne Particles Control in Hospital Operating Room," Building and Environment, Vol. 44, No. 11, pp.2284-2289, 2009.

5. M. Sandberg, "What is Ventilation Efficiency?," Building and Environment, Vol. 16, No. 2, pp. 123-35, 1981.
6. "ASHRAE Handbook - HVAC Fundamentals," American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, USA, 2009.
7. K. C. Chung and S. P. Hsu, "Effect of Ventilation Pattern on Room Air and Contaminant Distribution," Building and Environment, Vol. 36, pp. 989-998, 2001.
8. F. J. Wang, C. M. Lai, T. J. Cheng, and Z. R. Liu, "Performance Evaluation of Indoor Environment Parameters for an Unoccupied Operating Room," ASHRAE Transactions, Vol.117, Part 1, pp.557-564, 2011.
9. Y. C. Tung, Y. C. Shih, S. C. Hu, and Y. L. Chang, "Experimental Performance Investigation of Ventilation Schemes in a Private Bathroom," Building and Environment, Vol. 45, No. 1, pp. 243-25, 2010.

8. 圖表彙整

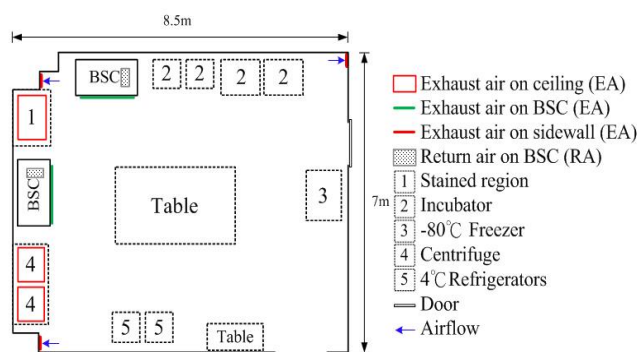


圖1. BSL-3實驗室示意圖

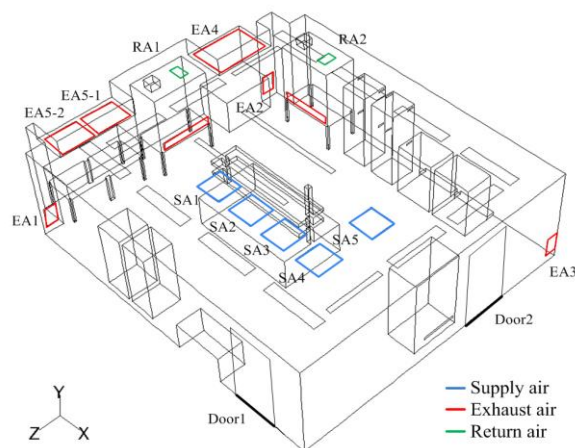
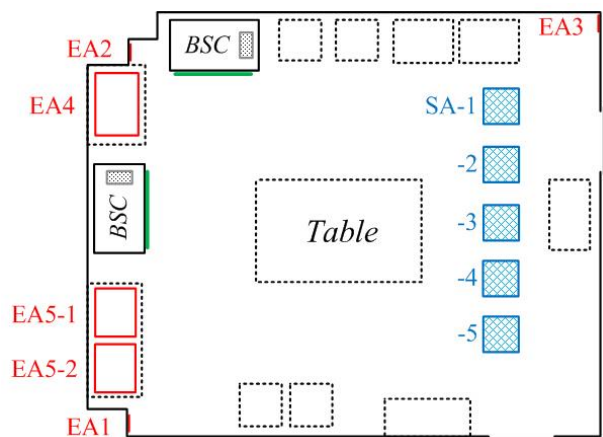
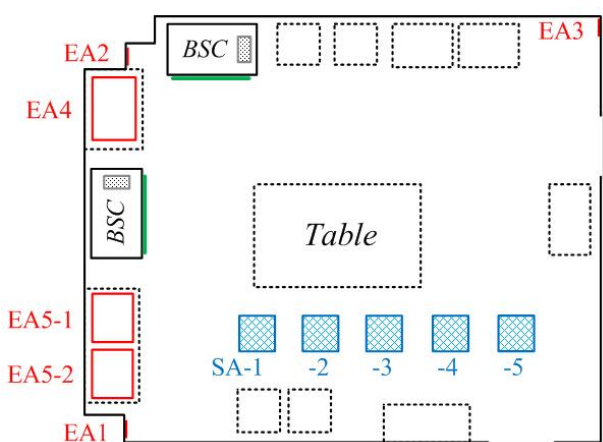


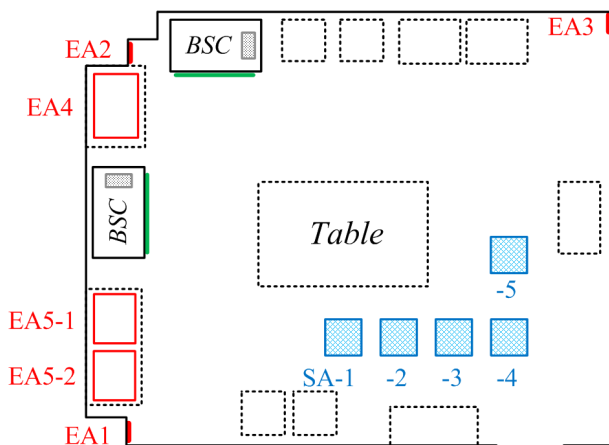
圖2. 生物安全第三等級實驗室模擬空間



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

- Supply air on ceiling (SA)
- Exhaust air on ceiling (EA)
- Return air on BSC (RA)
- Exhaust air on sidewall (EA)
- Equipment
- Exhaust air on BSC (EA)
- Door

圖3. 三種天花板供風口設計配置

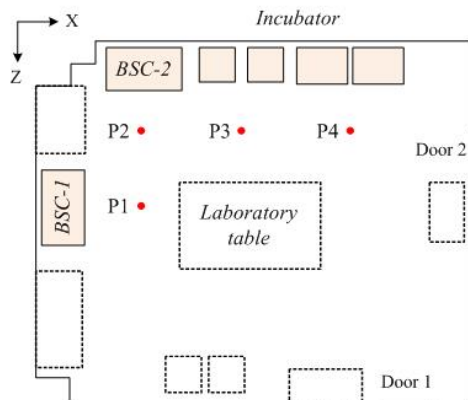
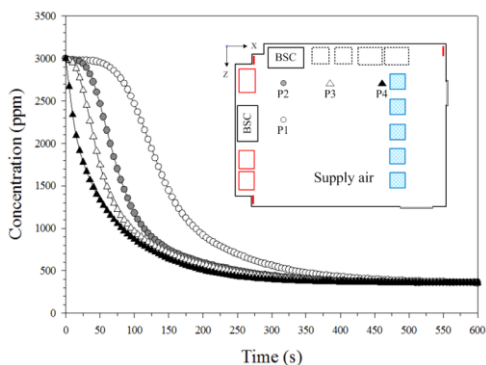
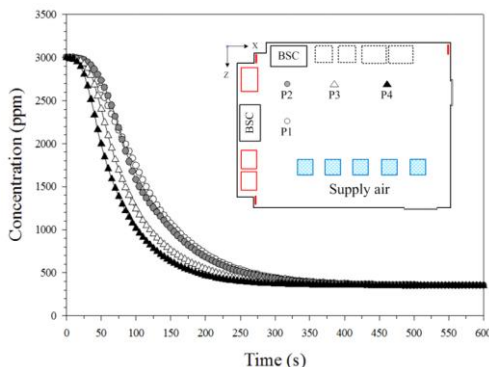


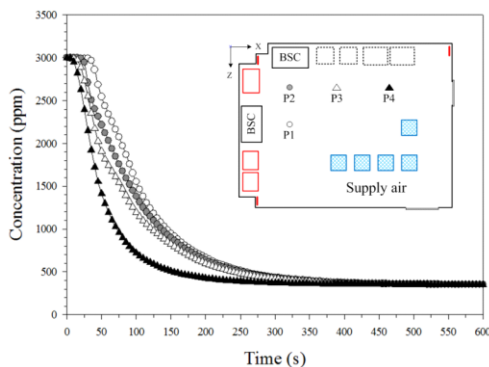
圖4. 高度1.6m污染物監測取點示意圖



(a) Case A

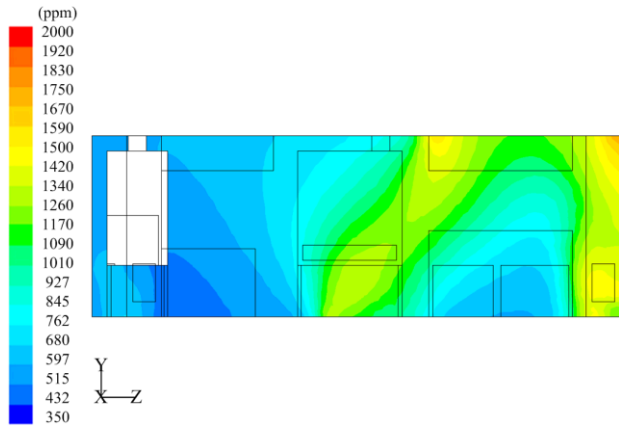


(b) Case B

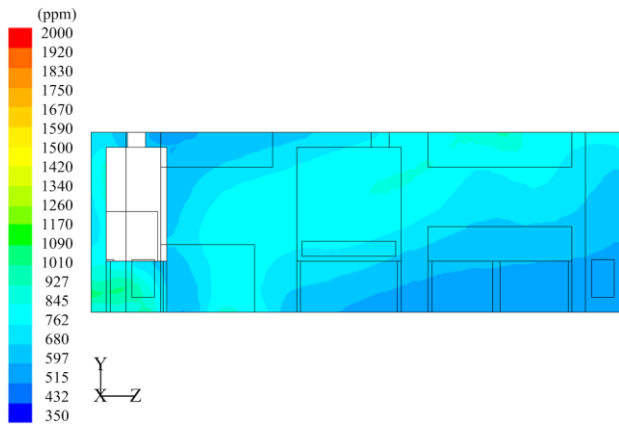


(c) Case C

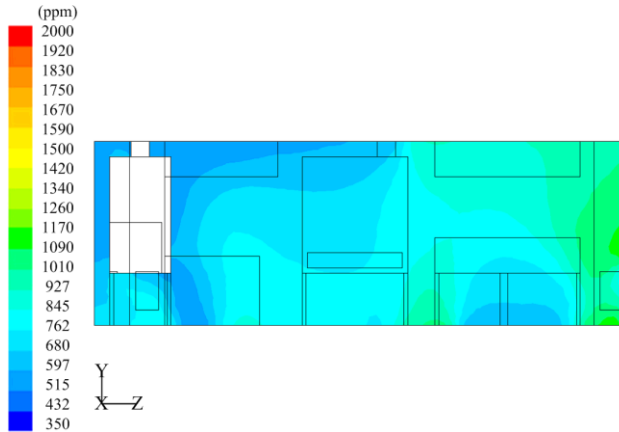
圖5. 三種不同供風口配置污染物移除情形



(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C

圖6. 三種不同供風方案之濃度場
($t=180s, x=1.9m$)

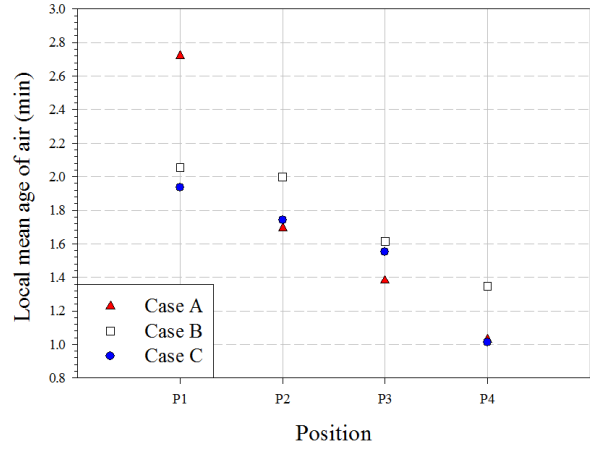


圖7. 三種供風案例局部平均空氣年齡