

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

家用瓦斯熱水器一氧化碳模擬分析
與中毒防制之研究

A Study on Carbon Monoxide Simulation Analysis and Poisoning
Control of Household Gas Water Heater

研究生：陳躍仁

指導教授：陳俊勳教授

邱晨瑋教授

中華民國 101 年 7 月

家用瓦斯熱水器一氧化碳模擬分析
與中毒防制之研究

A Study on Carbon Monoxide Simulation Analysis and
Poisoning Control of Household Gas Water Heater

研究生：陳躍仁 Student: Yueh-Jen Chen
指導教授：陳俊勳 Advisor: Chiun-Hsun Chen
：邱晨瑋 : Chen-Wei Chiu

國立交通大學

工學院產業安全與防災學程

碩士論文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Industrial Safety and Risk Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of
Master of Science

in

Industrial Safety and Risk Management

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 101 年 7 月

家用瓦斯熱水器一氧化碳模擬分析與中毒防制之研究

學生：陳躍仁

指導教授：陳俊勳

：邱晨瑋

國立交通大學工學院產業安全與防災學程

摘要

台灣人口密度隨著環境變遷不斷地持續增加，民眾為追求更多之生活空間，部分家庭將熱水器安裝於前、後陽台或室內，且因宵小橫行並將陽台裝設防盜窗，導致形成一密閉空間，每當天氣較為寒冷時，常因熱水器燃燒不完全產生一氧化碳，發生室內人員中毒死亡的悲劇，另由全台幾個案例亦發現，民眾雖有開窗保持通風之防制行為，但也同樣造成屋內人員中毒死亡之慘劇。本研究使用 NIST (National Institute of Standard and Technology, U.S.A, 美國國家標準局火災實驗室) 所發展之 FDS (Fire Dynamics Simulator) 軟體，模擬瓦斯熱水器使用時之陽台環境如密閉陽台、開啟對內室內門、強制通風等 3 個情境，經過 FDS 軟體計算後得到陽台及相鄰空間內之氧氣、一氧化碳及二氧化碳等氣體濃度數據，發現模擬數據曲線與勞研所全尺寸實驗所得之數據有高度吻合趨勢，觀察氧氣、一氧化碳及二氧化碳等 3 種氣體在室內空間的濃度變化，相互之間亦符合燃燒邏輯，例如當室內氧氣濃度低於 15% 以下時，一氧化碳濃度會明顯迅速上升，甚至達到 1500ppm 以上，在短時間即可使人致死，另外當強制通風量足夠供給熱水器完全燃燒時，室內一氧化碳濃度則會保持在很低的濃度，對人體無害。

成功建立 FDS 模擬瓦斯熱水器使用狀態之電腦模型後，在陽台未晾曬衣物之淨空間內，嘗試以不同之開窗面積、外氣風速及熱水器型號等變數探討安全使用瓦斯熱水器之模式，得出之安全建議為在陽台空間大(等)於 14m³，使用瓦斯熱水器規格小(等)於 16L (33.1KW)，關閉陽台與室內相通門窗之環境下，將陽台對外窗開啟 0.2m² 以上時，即可保持室內空間之人員安全。

以上成果證實本研究所建構之電腦模型及參數設定可用於模擬家用瓦斯熱水器使用情境，優點除了免除全尺寸實驗產生之人員中毒風險與重複實驗之高成本外，並彌補實驗中觀測數據之不足，日後研究人員更可進一步利用此模型進行更多防制中毒之研究。

關鍵字：熱水器、一氧化碳、瓦斯、FDS、中毒

A Study on Carbon Monoxide Simulation Analysis and Poisoning Control of Household Gas Water Heater

Student : Yueh-Jen Chen

Advisor : Dr. Chiun-Hsun Chen

: Dr. Chen-Wei Chiu

Degree program of Industrial Safety and Risk Management

College of Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

This study adopted FDS (Fire Dynamics Simulator), developed by NIST (National Institute of Standard and Technology), to simulate 3 scenarios, different balcony environments when using gas water heater, such as airtight balcony, indoor door with openings, force ventilation. According to FDS simulation results, this study obtained several gas concentration data such as oxygen, carbon monoxide and carbon dioxide in balcony and adjacent compartment. Also, we could find that data of the FDS simulation, O₂, CO, and CO₂ concentration, correspond highly with full-scale experimental results made by Institute of Occupational Safety & Health.

Through observing O₂, CO, and CO₂ concentration curve in the indoor compartment, we also find that when the indoor O₂ concentration was lower than 15%, the CO concentration would rise rapidly and even reached above 1500ppm, causing death in short time so the phenomena correspond logically with combustion theory. In addition, when the force ventilation model supplied the water heater with enough air to burn, the indoor CO concentration will keep low and unharmed concentration to human body.

After setting up the computer models of FDS simulation related to gas water heater performance, the balcony is not drying clothes, the study also adopted diverse variables such as, the opening area of window, outdoor wind speed, and water heater types, to analyze deeply user's safety regarding gas water heater. In a result, the study found out that while balcony area is above 14m³, water heater type is below 16L (33.1KW), and the indoor window, connecting balcony with room, is closed, if the opening on the outdoor window of the balcony is above 0.2m², this can ensure the personal security of the indoor space.

In accordance with the above-mentioned results, it is clear that FDS models and several parameters set up by this study could simulate a series of household gas water heater scenarios effectively and logically. Therefore, not only could this study avoid poison risk by conducting full-scale experiments, but obtained CO poison prevention models and strategies to study further in the future.

Key word: Water heater, carbon monoxide, gas, FDS, poison

誌 謝

本論文得以順利完成，承蒙陳院長俊勳及邱博士晨瑋於研究期間之殷切指導，並不時花費時間於觀念及架構的提醒，才得以有今日的成果，邱博士晨瑋更是每月不辭辛勞親至新竹指導學生，讓學生殊為感念；並感謝口試委員徐博士一量提供之寶貴的意見與建議，使得本論文的涵蓋性更為完整。謹此致上內心的崇敬，感謝教授們悉心指引，永銘於心。

能在消防局工作一直是一件非常幸運的事，可以將興趣與工作互相結合獲得很大的成就感，經過幾年工作後有志於進修之途，感謝廖局長茂為給予在職進修的機會，在交大在職專班的研習期間，得以學習更多專業知能及培養做學問的態度，對於日後工作及生活上的助益極大。

在此，也要特別感謝交大研究生陳金輝、勞研所陳博士春萬、陳助理俊瑋以及陳大隊長家慶暨大隊部同仁在論文及工作上的指導與協助，經過多時的努力終於順利完成論文，在此致上深深的感謝。

最後，要感謝我的爸媽、姊妹及最支持我的老婆怡君，讓我在這段過程中遭遇挫折總是默默的支持我，給我撐下去的信心與勇氣，讓我沒有後顧之憂，願將此論文獻給你們及關心我的所有好朋友，一同分享這份喜悅。

陳躍仁 謹誌於

2012.7.30

目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	vi
圖目錄	.....	vii
第一章	緒論.....	1
1.1	研究動機與目的.....	1
1.2	研究方法與流程.....	2
1.3	研究內容與案例規劃.....	3
第二章	文獻探討.....	4
2.1	國內重大一氧化碳中毒案例.....	5
2.1.1	陽台紗窗污垢導致空氣對流不足.....	6
2.1.2	房東未安裝正確型式熱水器導致房客中毒.....	6
2.1.3	集合住宅管道間回流現象導致災情擴大.....	7
2.2	國內外相關研究整理.....	8
2.3	各國防範一氧化碳中毒措施.....	11
2.3.1	英國部分.....	11
2.3.2	美國部分.....	12
2.3.3	香港部分.....	16
2.4	新竹市防制一氧化碳中毒成果分析.....	17
2.4.1	前言—實施原因.....	17
2.4.2	實施方式與成效.....	19
2.4.3	家戶訪視成果分析.....	20
第三章	通風模式與數值分析.....	21
3.1	模擬軟體 FDS 介紹.....	21
3.1.1	模式分析.....	21
3.1.2	FDS 理論基礎與程式架構.....	22
3.2	我國燃氣熱水器現行規範.....	35
3.3	全尺寸實驗情境介紹.....	40
3.3.1	實驗空間及器材.....	40
3.3.2	氣體濃度的量測.....	41
3.4	模擬實驗邊界條件與參數設定.....	43
3.4.1	模擬模型.....	43
3.4.2	火源設定.....	45
3.4.3	格點測試.....	46

3.4.4	其他相關參數設定	46
第四章	結果與討論	47
4.1	模擬情境結果與實驗比對	47
4.1.1	密閉陽台情境模擬結果與實驗比對	47
4.1.2	修正密閉陽台模擬結果與實驗比對	49
4.1.3	陽台對內落地窗開啟情境模擬結果與實驗比對	54
4.1.4	強制通風情境模擬結果與實驗比對	59
4.2	燃燒所需燃料之影響	64
4.3	使用熱水器安全模式之探討	66
4.3.1	開窗面積對陽台空間安全之影響	66
4.3.2	外氣風速對陽台空間安全之影響	67
4.3.3	熱水器型號對陽台空間安全之影響	69
4.3.4	小結	71
第五章	結論與建議	72
5.1	結論	72
5.1	建議	72
參考文獻		75

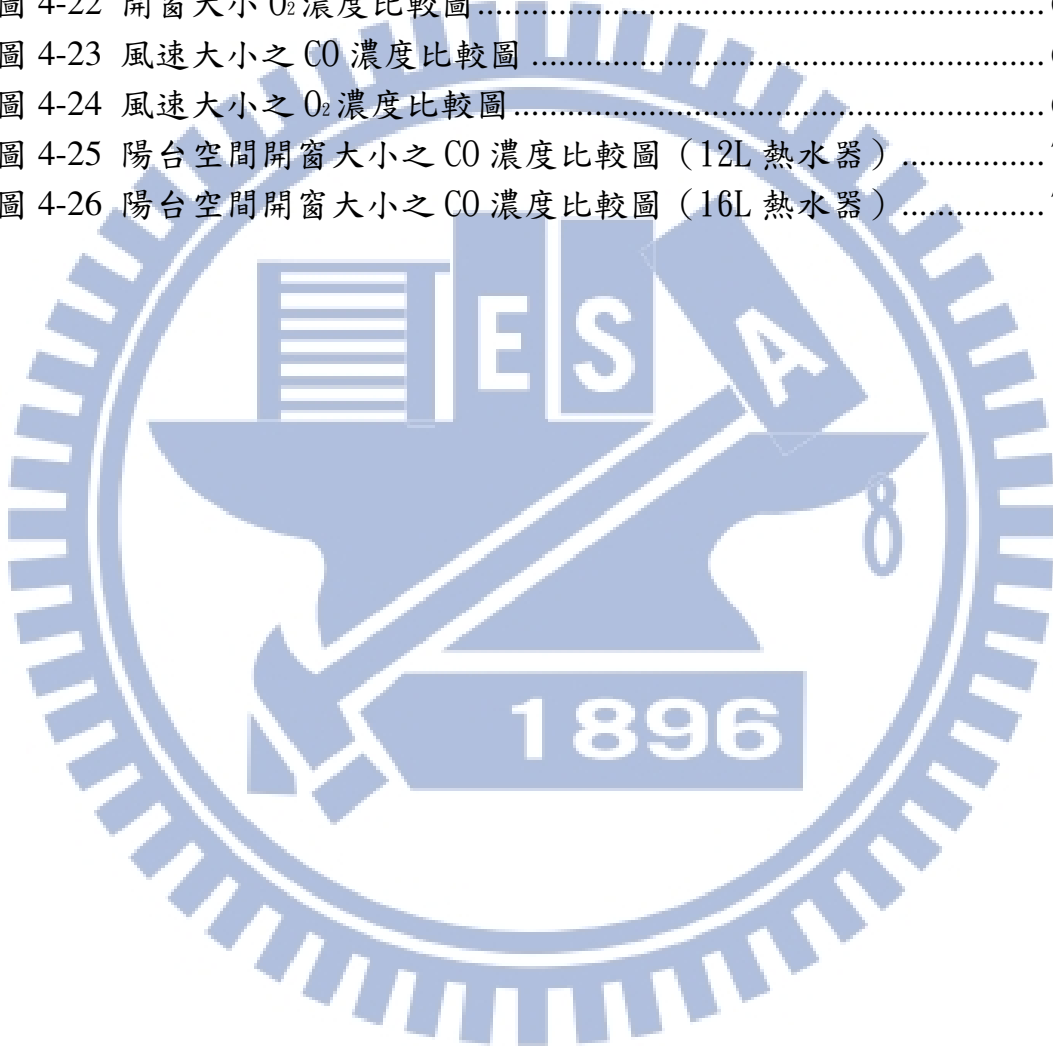
表 目 錄

表 2-1	一氧化碳濃度對於一般成人之影響.....	4
表 2-2	全國歷年一氧化碳中毒人數統計（民國 93~100 年）.....	5
表 2-3	新竹市歷年一氧化碳中毒人數統計（民國 95 年~100 年）....	17
表 2-4	新竹市近年重大一氧化碳中毒案例.....	18
表 2-5	新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形訪視安全程度評估標準.	18
表 2-6	新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表－第一階段	19
表 2-7	新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表－第二階段	19
表 2-8	新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表－第三階段	19
表 2-9	新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表－第一~三階段	20
表 3-1	FDS 輸入檔指令說明表.....	34
表 3-2	我國燃氣熱水器安全管理法規沿革.....	35
表 3-3	國內常用燃氣熱水器型式（以供排氣方式區分）.....	36
表 3-4	格點測試.....	46
表 3-5	模擬相關參數設定.....	46

圖目錄

圖 1-1	研究流程圖.....	2
圖 1-2	實驗房間之平面配置圖.....	3
圖 3-1	FDS 與 Smokeview 使用流程架構圖.....	33
圖 3-2	CF 式熱水器裝設圖.....	36
圖 3-3	CF 式熱水器排氣管及頂罩圖示.....	37
圖 3-4	FE 式熱水器裝設圖示.....	38
圖 3-5	FF 式熱水器裝設圖示.....	39
圖 3-6	RF 式熱水器裝設圖示.....	39
圖 3-7	實驗房間配置平面圖.....	40
圖 3-8	風向煙流可視化（風由窗戶外朝向陽台屋內吹）.....	42
圖 3-9	強制通風情境示意圖.....	42
圖 3-10	實驗空間示意圖.....	43
圖 3-11	模擬空間示意圖.....	43
圖 3-12	模擬空間陽台示意圖.....	44
圖 3-13	模擬空間窗戶示意圖.....	44
圖 3-14	實驗空間陽台外觀照片.....	44
圖 3-15	實驗空間陽台內部窗戶照片.....	44
圖 3-16	實驗瓦斯熱水器外觀及規格照片.....	45
圖 3-17	實際火源規格示意圖.....	45
圖 4-1	密閉陽台實驗值與模擬值 CO ₂ 濃度比較圖.....	48
圖 4-2	密閉陽台實驗值與模擬值 O ₂ 濃度比較圖.....	48
圖 4-3	密閉陽台實驗值與模擬值 CO 濃度比較圖.....	49
圖 4-4	修正密閉陽台實驗值與模擬值 CO ₂ 濃度比較圖.....	50
圖 4-5	修正密閉陽台實驗值與模擬值 O ₂ 濃度比較圖.....	51
圖 4-6	修正密閉陽台實驗值與模擬值 CO 濃度比較圖.....	51
圖 4-7	模擬密閉陽台空間 CO 濃度向量立面切片圖（共 14 幅）.....	53
圖 4-8	陽台對內落地窗開啟情境之 CO 濃度比較圖（室內空間）.....	54
圖 4-9	陽台對內落地窗開啟情境之 O ₂ 濃度比較圖（室內空間）.....	55
圖 4-10	陽台對內落地窗開啟情境之 CO 濃度圖（陽台空間模擬值）.....	55
圖 4-11	陽台對內落地窗開啟情境之 O ₂ 濃度圖（陽台空間模擬值）.....	56
圖 4-12	模擬陽台對內落地窗開啟情境 CO 濃度向量立面切片圖（共 16 幅）.....	58
圖 4-13	強制通風情境之室內空間 CO 濃度比較圖.....	59
圖 4-14	強制通風情境之室內空間 O ₂ 濃度比較圖.....	60

圖 4-15 強制通風情境陽台之 CO 濃度圖 (陽台空間模擬值)	60
圖 4-16 強制通風情境陽台之 O ₂ 濃度圖 (陽台空間模擬值)	61
圖 4-17 模擬強制通風情境 CO 濃度向量立面切片圖 (共 16 幅)	63
圖 4-18 不同燃料模擬之 CO ₂ 濃度比較圖	64
圖 4-19 不同燃料模擬之 O ₂ 濃度比較圖	65
圖 4-20 不同燃料模擬之 CO 濃度比較圖	65
圖 4-21 開窗大小之 CO 濃度比較圖	66
圖 4-22 開窗大小 O ₂ 濃度比較圖	67
圖 4-23 風速大小之 CO 濃度比較圖	68
圖 4-24 風速大小之 O ₂ 濃度比較圖	68
圖 4-25 陽台空間開窗大小之 CO 濃度比較圖 (12L 熱水器)	70
圖 4-26 陽台空間開窗大小之 CO 濃度比較圖 (16L 熱水器)	70



第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

在台灣，冬季由於受到大陸冷氣團及季風影響，氣候寒冷，民眾習慣將門窗緊閉，於環境通風不良情形下，即有民眾於住家內因使用熱水器不當而造成一氧化碳中毒案件。經分析過去幾年來一氧化碳中毒的發生原因，多是因為使用天然氣(NG)或液化石油氣(LPG)的瓦斯熱水器於燃燒不完全時產生一氧化碳，加上熱水器型式裝設錯誤或陽台違建加蓋鋁門窗等造成密閉環境，於一氧化碳無法排出之情形下，民眾自然無法避免一氧化碳中毒事件，根據內政部消防署歷年發布的消息中，96至97年間全台發生一氧化碳中毒案例計有109次，死亡28人及245人受傷，98年共計發生35件、16人死亡及83人受傷之一氧化碳中毒案件，99年共計發生53件、17人死亡及123人受傷之一氧化碳中毒案件。而全台區域性劃分，通常越是北部（東北季風強烈天氣冷，門窗易緊閉）、越是大都會區（房價高，瓦斯熱水器易置於室內）一氧化碳中毒發生率越高。

以新竹市南大路327巷內於98年2月3日發生之一氧化碳中毒事件為例，因時值農曆過年期間寒流來襲天氣寒冷，住戶使用裝設於廚房之瓦斯熱水器燃燒不完全，雖然廚房窗戶有打開，但紗窗積了一層油垢造成空氣對流不良，而造成一家5口中毒死亡之悲劇。相對於火災案件，一氧化碳中毒意外更容易造成人員死亡，除了客觀條件如熱水器型式裝設錯誤或陽台違建等造成密閉環境問題外，民眾缺乏防災意識也是最難控制與克服的因素，社會大眾雖清楚一氧化碳中毒讓人致命，然而以一氧化碳中毒死亡者不乏高知識水平者，甚至同一住戶發生2次以上中毒案件，可以知道一氧化碳中毒的危害特性及成因未被普遍了解。

目前國內已有研究使用全尺寸實驗方式測量一定通風條件下室內一氧化碳濃度累積情形，供給政府及學術單位參考，考量全尺寸實驗之限制，以FDS軟體進行模擬分析密閉空間使用瓦斯熱水器情形，可設定不同參數及模式即可模擬出各種瓦斯熱水器使用情境，免除實驗產生之人員中毒風險與重複實驗之高成本，並彌補實驗中觀測數據之不足，綜合以上所得之結論提供向民眾宣導及政府防治一氧化碳中毒決策時可參考之資料。

1.2 研究方法與流程

本論文「家用瓦斯熱水器一氧化碳模擬分析與中毒防制之研究」，主要是以文獻回顧法、FDS 模擬分析比較等方式，研析瓦斯熱水器於住宅使用時發生一氧化碳中毒之危害及防範措施，研究流程圖如圖 1-1 所示。

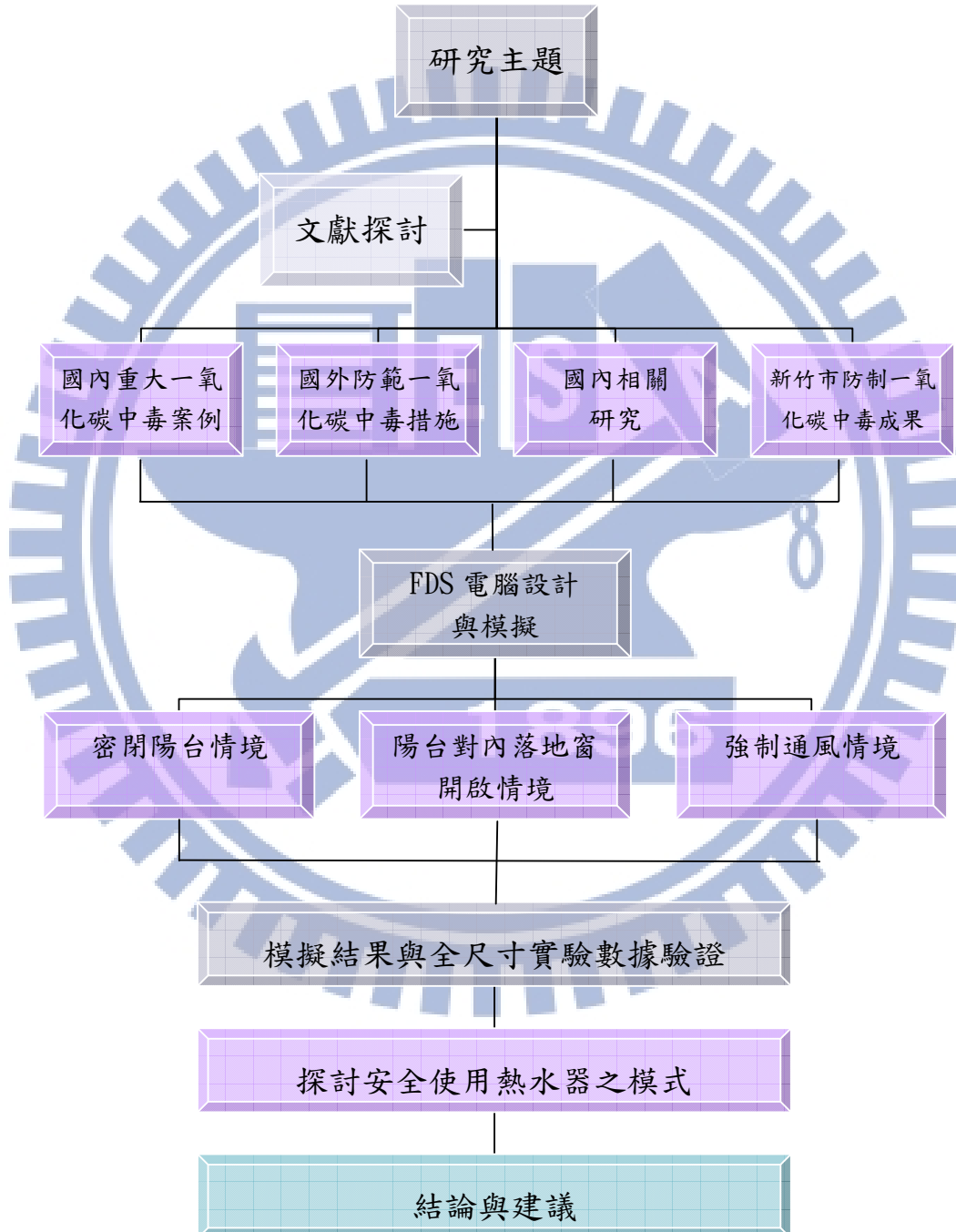


圖 1-1 研究流程圖

1.3 研究內容與案例規劃

本論文研究內容包含國內重大一氧化碳中毒案例、國外防範一氧化碳中毒措施、國內相關研究整理、新竹市防制一氧化碳中毒成果分析等，藉由瞭解一氧化碳相關特性及危害風險，知己知彼參考國外防範一氧化碳中毒措施，並透過家戶訪視結果得知一般民眾住宅內使用瓦斯熱水器狀況之統計數據，綜合以上進行彙整與探討一氧化碳中毒潛在因子。

電腦模擬實驗案例規劃參考行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所（以下簡稱勞研所）於 95 年 12 月所發表之「陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究」[1]，建構實驗房間之模型（如圖 1-2），利用 FDS 軟體進行模擬瓦斯熱水器在各種情境使用時一氧化碳濃度累積之情況，例如密閉陽台、陽台對內落地窗開啟、強制通風等情境，得出之數據與勞研所實驗數值做驗證，並進行探討與分析安全使用瓦斯熱水器之模式。

綜合上述兩大部分，瞭解民眾一氧化碳中毒之主客觀因素，佐以實驗數據為證，提供正確使用瓦斯熱水器模式，以作為日後向民眾宣導之依據。

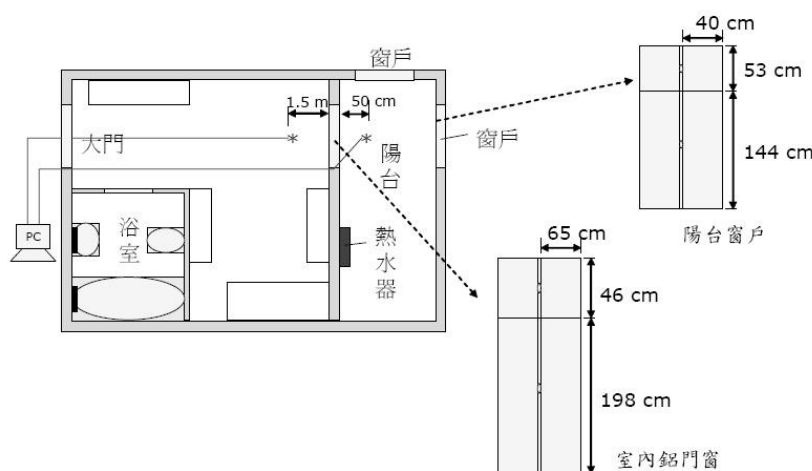


圖 1-2 實驗房間之平面配置圖

資料來源：勞工安全衛生研究季刊(95 年 12 月)

第二章 文獻探討

「一氧化碳」為無色、無味、沒有刺激性之有毒氣體，其容易從肺部吸收，吸收的量依每分鐘通氣量、暴露時間長短、環境中一氧化碳和氧氣之相對濃度而定[2]。一氧化碳對人體的危害性主要是因為其容易與血中的血紅素(hemoglobin)結合，形成所謂的碳氧血紅蛋白(carboxyhemoglobin)(COHb)，其結合能力比氧強 200—230 倍[3,4]，而碳氧血紅蛋白較氧合血紅蛋白(O₂Hb)的解離速度慢 3600 倍，空氣中之一氧化碳濃度到達 60PPM 時，即可抑制血紅素攜帶氧氣的一半能力；因此血紅素在優先與一氧化碳結合的情況下，將會大幅降低血液輸送氧的功能，導致心臟和腦組織缺氧而嚴重受創；若處於高濃度下，會使大腦失去正常功能甚至致死。

一氧化碳為碳氫化合物燃燒不完全下的產物，常見引起一氧化碳中毒情況為不當使用汽柴油引擎或幫浦等機械設備、火災事故現場及不當使用燃氣器具等加熱設備。其中，最廣為人知的一氧化碳中毒事故莫過於居家所使用之燃氣熱水器因環境的通風不良，而造成不完全燃燒，進一步引發一氧化碳中毒事故。一氧化碳中毒的急性症狀如下：先出現頭痛、反胃、呼吸急促現象，之後伴隨精神錯亂、肌肉無力情形，此時出力即產生暈眩，因此無法做較遠距離的移動，因而常未能立即逃出中毒環境，最後即喪失意識、昏迷，結果因心律不整、心臟和腦受損等因素而導致死亡。

人體於一氧化碳中毒後所產生的症狀，與吸入一氧化碳的時間、人體一氧化碳血紅素濃度、年齡、健康情形等因素有關。參考 NFPA（美國國家消防協會，National Fire Protection Association）防火手冊（NFPA's Fire Protection Handbook）資料，整理空氣中一氧化碳濃度對於一般成人之影響如表 2-1[5]：

表 2-1 一氧化碳濃度對於一般成人之影響

環境中一氧化碳含量(PPM)	暴露時間	出現症狀
50	8 小時	無明顯症狀
200	2~3 小時	輕微頭痛
400	1~2 小時	明顯頭痛、反胃
800	45 分鐘	頭暈、反胃、暈眩，1 小時即失去知覺
1,000	40 分鐘	意識混亂、心跳呼吸加速，1 小時即失去知覺
1,600	20 分鐘	頭痛、反胃、暈眩情形，2 小時會死亡
3,200	5~10 分鐘	頭痛、反胃、暈眩情形，30 分鐘會死亡
6,400	1~3 分鐘	頭痛、暈眩，10-15 分鐘內會死亡
12,800	1~3 分鐘	1-3 分鐘內可能會死亡

資料來源：NFPA（美國國家消防協會）防火手冊（NFPA's Fire Protection Handbook）資料

由上述表格分析可知，當空氣中一氧化碳濃度達到 1,600PPM 時，即有可能短時間導致人員死亡，濃度達 12,800PPM 以上時，更是在 3 分鐘之內即可致人於死。在一間面積 5 坪、高度 2.5 公尺的房間內，66 公升的一氧化碳即達 1,600PPM 濃度，因此微量一氧化碳對人體即會造成極大的影響，但一氧化碳中毒初期症狀與感冒、食物中毒極為類似，因而導致許多人在一時不察的情況下失去了性命。

2.1 國內重大一氧化碳中毒案例

在台灣，冬季東北季風帶來寒流吹襲，瓦斯熱水器成了家家戶戶必備之電器之一，依據內政部消防署所公布的統計數據(如表 2-2)，每年均有多起因使用瓦斯熱水器不慎造成一氧化碳中毒之案例，以下提供國內重大之一氧化碳中毒案例作為借鏡，找出中毒之重要因子，適時排除以防再度發生意外。

表 2-2 全國歷年一氧化碳中毒人數統計（民國 93~100 年）

年度	93 年	94 年	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年	100 年
件數	200	161	38	41	68	35	53	46
死亡人數	33	31	20	15	13	16	17	11
受傷 (送醫)人數	299	358	86	90	155	83	123	113

資料來源：內政部消防署

2.1.1 陽台紗窗污垢導致空氣對流不足

94年2月24日在台南市東區富農街發生的一氧化碳中毒死亡事件，造成5名女大學生當場死亡，據了解災害現場位於該棟建築物之5樓，熱水器裝在陽台，使用年限超過10年，雖設有窗戶，但窗戶呈現半開狀況，且陽台掛滿衣物、窗戶紗窗滿佈塵垢。因救護人員到達現場時，其中一名女大學生倒臥於浴室，且浴室水龍頭尚在流水，因此可研判係因熱水器燃燒不完全產生一氧化碳中毒而死亡。

98年2月3日在新竹市南大路327巷內發生之一氧化碳中毒事件，因時值農曆過年期間寒流來襲天氣寒冷，住戶使用裝設於廚房之瓦斯熱水器燃燒不完全，雖然廚房窗戶有打開，但紗窗積了一層油垢造成空氣對流不良，而造成一家5口中毒死亡之悲劇。

這2起事件災害現場的窗戶雖未緊閉，但因紗窗滿布塵垢且有衣物阻隔對流或堆積油垢，導致新鮮空氣無法進入且熱水器產生之一氧化碳廢氣無法排出，因而各帶走了5條人命。由此可知，陽台只要加鋁窗、紗窗即有空氣對流不足之可能，因此瓦斯熱水器只要裝設於有加蓋的陽台或室內，均應裝設強制排氣型熱水器合法使用排氣管，才能保障使用者的安全。

2.1.2 房東未安裝正確型式熱水器導致房客中毒

94年2月14日於高雄市林森二路發生房客盥洗時一氧化碳中毒死亡意外事故，起因於瓦斯熱水器裝設於加裝鋁門窗之陽台，因供排氣設計不良，門窗亦緊閉，致燃燒不完全而造成事故。房東雖聲稱，當初購買該房屋時，陽台即裝設鋁門窗，事先並已提醒該房客，且房客已成年，應具有使用瓦斯熱水器常識，若非該房客關閉陽台鋁門窗和屋內窗戶，不致發生通風不良情形。法官卻認為，房東已預見陽台加裝鋁門窗、阻礙空氣流通可能產生的危險，卻未採取防範措施，因此仍依過失致死罪

判處房東有期徒刑3個月，得易科罰金。

房客於租屋時，應確保屋內熱水器型式之正確性，以保障自身安全，房東亦應有道德良知，才能收取租金並同時兼顧房客安全。

2.1.3 集合住宅管道間回流現象導致災情擴大

台北縣永和市恆豐大樓於92年7月發生一氧化碳中毒事件，肇因於該大樓6樓之4陽台違建，因開啟冷氣而緊閉窗戶，其熱水器型式為屋外型，該住戶洗澡時因室內氧氣不足產生一氧化碳，即中毒死亡；但熱水器持續運轉，浴室抽風機亦繼續將燃燒產生的一氧化碳排入管道間，且該大樓之浴室天花板內未加裝管路逆止閥，導致各樓層間之氣體可透過管道流通，而住戶為避免其他樓層浴室傳來味道，另二次施工堵住9樓的通風管道，管道間至9樓即封閉，一氧化碳上升至9樓後即無法排出，向下蓄積繼而流竄到其他樓層，並由浴室排風口擴散，最後共造成3死8傷的慘劇。

集合住宅之共同通風管道應保持暢通，屋頂之通風管道出口則應設置強制排氣設備且附有防止逆流之措施，住戶應檢視浴室天花板內之排風機是否密封連接管道且加裝管路逆止閥，以上措施除了保持各戶之廢氣可以順利排出外，也讓上述之悲劇不再發生。

2.2 國內外相關研究整理

計算流體力學CFD (Computational Fluid Dynamics) 是一門已積極發展的科學，理論上是研究與描述流體各類線樣方程式的解。在工程應用上，目的在運用電腦數值計算佐證實驗測試結果與改善設計之上。在建築自然通風模擬上則是在1970年代後才有人開始從事此方面之研究，近幾年來由於電腦運算能力大幅提升之後，以計算流體力學的電腦模擬程式模擬氣流來預測室內通風換氣的研究才蓬勃發展。其中，張璋如君[6]於2010年運用計算流體力學方法(CFD-ACE+軟體)進行有系統之研究，建立典型台灣住家陽台—室內空間幾何模型、一氧化碳不完全燃燒模型，以及一氧化碳三維擴散之數值模式，針對室內窗開啟關閉與通風速度變化之可能情境進行不同通風狀況，共14種案例之一氧化碳濃度分佈與速度場之分析。主要研究發現包括：

1. 通氣速度變化明顯影響陽台與室內房間之一氧化碳濃度分佈狀況與速度場模式。
2. 計算模擬結果顯示 $V=3.0 \times 10^{-4}$ m/s為關鍵通氣速度，當通氣速度低於此關鍵通氣速度時，氣流之運動主要為擴散作用，此時室內門關閉與否對於室內房間一氧化碳濃度分布之影響不大。
3. 當通氣速度高於關鍵通氣速度時，室內門開啟時室內房間的一氧化碳濃度將遠低於室內門關閉的狀況。此乃因為新鮮空氣經由開啟之室內門被牽引進入室內房所導致之結果。

此研究在台灣乃屬於創新研究，也實證了CFD軟體應用於模擬一氧化碳氣體擴散情形之可行性。

FDS是一套計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)軟體，主要用於火災模擬，具有軟體取得容易，且更新快速，免費下載使用，模擬之可靠度、準確度頗佳等特點，搭配強大的後處理程式Smokeview，對火場內之溫度場、速度場、熱傳導、熱輻射、熱對流、一氧化碳濃度、二氧化碳濃度、能見度等之參數能以優越的3D立體視覺效果呈現，瓦斯熱水器使用時之狀態與一般燃燒相同，以使用FDS模擬室內空間一氧化碳濃度蓄積情況應屬可行，國內應用FDS的研究相當多，以下列舉：

1. 李東昇君[7]於民國98年利用FDS火災模擬軟體對公寓住宅進行火災模擬，以瞭解火災的成長、延燒、濃煙流動擴散、溫度及一氧化碳濃度變化。由研究結果顯示，FDS可設定偵測居室中特定點之氧氣、一氧

化碳及二氧化碳濃度之蓄積情況，並可匯出時間—濃度曲線圖，可用於評估室內空間在多久時間內即可蓄積至一氧化碳危險濃度，造成內部人員健康上的危害性。

2. 蔡銘儒君等[8]於民國97年以歷年於內政部建築研究所防火實驗中心建置的10MW大尺度燃燒分析裝置、ISO 9705房間量熱儀及可調整天花板高度之單一房間火災模式驗證實驗屋之局限空間，所進行之研究實驗資料為FDS模擬場景與參數設定進行模擬，再將模擬結果與實驗結果進行比對，得出針對火災模式驗證與文件化等標準之研訂，可供設計者設計評估與主管官署評定之參考。
3. 何明錦君等[9]於民國94年針對特定既有住商複合建築物火災成災個案，就建築物之現況予以模擬建檔，進行電腦分析與判斷，以驗證防火避難危險改善成效。藉由FDS電腦模擬可發現一旦住戶內容發生火災，其擴大延燒非常快速，故預防火災才是最重要的課題。
4. 紀人豪君等[10]於民國99年以現有小規模旅館建築物為標的，收集調查白雪大旅社火災現場勘查資料，並採用電腦模擬程式(FDS+EVAC)進行火場情境重建模擬，以該類建築物的火災危險因子與人員避難安全之課題，探討各項改善方案之成效。並就各改善方案情境，於內政部建築研究所防火實驗中心建置實際人員避難模擬試驗，與電腦模擬結果數據比對分析，探討其差異性，提出可行性與修正研擬改善的方案，以確保旅館類建築物人員避難安全。

因應國內一氧化碳中毒案件日趨嚴重，我國自民國94年起在消防法中納入燃氣熱水器之安全管理條文，但民眾家中已普遍使用裝置錯誤型式之瓦斯熱水器，造成只要寒流來襲即會有民眾一氧化碳中毒，然而法規的訂定仍有需改進之空間，王佩琪君[11]於2009年以統計分析法說明近年來國內外一氧化碳中毒事件數據，文獻蒐集與回顧法說明燃氣熱水器類型與一氧化碳生成關係，及國外防範一氧化碳中毒相關規定；並針對國內燃氣熱水器承裝制度、建築相關法令、政府補助措施、消防法修正草案內容等，於了解執行情形及缺失後，依國內民情及參考國外法規提具建議，期做為完備國內相關防範措施之參考。

呂博弘君等人於2006年採用全新的瓦斯熱水器並以氣體偵測器進行實驗的量測，實驗主要探討密閉空間、風向、開窗面積大小及導管的有無及門窗的阻隔等對於一氧化碳的累積或排除等影響。結果發現在體積約 14m^3 的全密閉陽台空間中，其一氧化碳濃度值可在15分鐘高達1500ppm，人員於此濃度的暴露下即會造成人員昏迷、呼吸及心臟衰竭

或死亡等情形；另外，有許多的民眾認為只要開了窗就不會發生中毒的情形，然而事實卻不盡然，實驗發現即使於陽台開了窗，但因開窗方式不佳或風向的影響下也可能導致一氧化碳擴散至室內，其因風向擴散至室內之一氧化碳可於 50 分鐘後達到 100ppm 以上，長時間的暴露也會有頭痛、虛弱的情形產生。

因此，密閉空間、導管的有無、開窗對流面積的大小、門窗的阻隔及風向等皆會影響著一氧化碳的累積與否。故建議對於新安裝瓦斯熱水器之民眾，應遵守通過之法令，由合格技術人員安裝瓦斯熱水器，對於現有瓦斯熱水器，應檢討安裝位置，除了絕對不可安裝在浴室內以外，對於安裝於密閉陽台的瓦斯熱水器應視為室內熱水器，應立即遷至室外或換裝強制排氣型熱水器，而陽台也應給予足夠的通風面積產生有效對流以減少一氧化碳的累積。

由以上文獻資料中可發現，應用 FDS 軟體模擬瓦斯熱水器在密閉空間中一氧化碳蓄積濃度之變化應屬可行，實際對照全尺寸實驗之數據，若趨勢相同即可推論此模擬模型及參數設定為符合現況，日後可更改不同變數條件即可得出內部空間一氧化碳蓄積濃度之變化，對於未來燃氣熱水器管理規定之制訂可提供科學之依據，消防單位在規劃燃氣熱水器使用安全宣導方面也多了有力的證據。

2.3 各國防範一氧化碳中毒措施

2.3.1 英國部分

英國每年因一氧化碳中毒而死亡人數約有30人，英國政府係以要求房屋出租人定期維修檢查瓦斯器具、瓦斯器具或配件裝置人員資格等方式，提供英國民眾瓦斯器具使用的安全保障。

英國之主管機關為健康及安全委員會（HSE, Health and Safety Executive），該會訂有「瓦斯安全（安裝與使用）規範」（The Gas Safety 〈Installation and Use〉 Regulations）、「1998年瓦斯安全規範：房東義務守則」（Landlord. A guide to landlords duty: Gas Safety Regulations 1998）暨「瓦斯器具—委託檢查」（Gas Appliance—Get them Checked），英國強制規範瓦斯器具應定期執行檢修並檢附檢查報告，且該檢修應由特定合格技術人員辦理【須經瓦斯器具安裝登記委員會（CORGI, Council for Registered Gas Installer）註冊合格】。除此之外，英國政府相關部門藉由編印瓦斯安全手冊、防範一氧化碳中毒宣導資料及社群網站宣導等方式，進行廣泛之宣導。

「瓦斯安全（安裝與使用）規範」係於1998年修正，針對住家、活動式空間（如貨櫃屋）、商業空間（如辦公室、商店、飯店等）、民宿、遊艇等場所，要求燃氣系統、燃氣設備、排氣管等之瓦斯使用安全，為落實該規範之執行，並訂定「1998年瓦斯安全規範：房東義務守則」暨「瓦斯器具—委託檢查」。該規範之重點內容如下[12]：

1. 瓦斯器具及配件之裝置人員，應具有相當之承裝能力，並應取得瓦斯器具安裝登記委員會（CORGI, Council for Registered Gas Installer）註冊合格資格。
2. 瓦斯器具之安裝、使用、檢查、維護等，均應由註冊合格之技術人員擔任。
3. 除居室之密閉型器具外，1996年1月1日後禁止於臥房內裝置瓦斯器具（如暖氣）；如為出租之公寓，則應於1998年10月31日前將裝置於臥房內之瓦斯器具遷移至其他處所。
4. 於1998年10月31日後，除居室密閉型或附有自動切斷安全裝置之熱水器外，不得在居室內裝置水點火熱水器（Instantaneous Water Heaters）。
5. 如有瓦斯漏氣情形，瓦斯供應商（Main Gas Transporter）／緊急服務人員（Emergency Service Providers）應於事件發生後12小時內瞭

解發生原因並採行預防措施；如為一氧化碳事故，應於獲報後立即採取相關措施並確保現場安全。

針對房東應擔負之瓦斯器具維護責任，摘要如下[13]：

- 1.房東應確保瓦斯器具與排氣管等之安全狀態，所有燃氣器具應依製造商指示進行維修，每年並委託瓦斯器具安裝登記委員會（CORGI）註冊合格之技術人員進行維修一次。
- 2.於房屋出租時，應於簽訂租賃契約同時將瓦斯器具與排氣管等最近一次檢查合格報告檢附給承租人。
- 3.瓦斯器具與排氣管之安裝、維修及安全檢查等，均應由瓦斯器具安裝登記委員會（CORGI）註冊合格之技術人員辦理。
- 4.瓦斯器具安全檢查紀錄應保存2年以上。
- 5.完成瓦斯器具安全檢查之28天內，應將該紀錄送給承租戶。
- 6.房東如未善盡瓦斯器具維修之責，得處罰款5000英鎊，並另由刑事法庭（Crown Court）審理，最高之刑事罰得為無限罰款甚或被判入獄。

另外，考量英國國內有來自世界各國的民眾，為了加強瓦斯器具使用安全的法令介紹與說明，健康及安全委員會（HSE）使用中文、阿拉伯文、葡萄牙文、西班牙文、土耳其...等各種不同語文印製「1998年瓦斯安全規範：房東義務守則」暨「瓦斯器具一委託檢查」宣導資料，俾於向一般社會大眾宣導。健康及安全委員會（HSE）為提供各項瓦斯安全諮詢服務，並設置諮詢電話專線：0800-300363，如有60歲以上或長期罹病、殘障、聽覺或視覺受損等弱勢族群，並可由瓦斯器安裝登記委員會（CORGI）提供瓦斯器具免費安全檢查服務。

2.3.2 美國部分

依美國疾病控制中心（Centers for Disease Control）統計數據，美國每年因一氧化碳中毒約導致450人死亡、2萬人受傷送醫[14]。

美國之立法係以州為單位，由各州自行針對區域特性予以設置相關法令，規範住宅應設置一氧化碳警報器，其中有要求新建或增建改建住宅者，亦有溯及既往至全部住宅者，設置場所則包含車庫、有燃氣設備之場所、居室等。依據全美州立法機構會議（National Conference of State Legislatures）網頁資料顯示，美國有25個州已強制住家裝設一氧化碳警報器[15]。茲摘錄部分規定整理如下：

1. 明尼蘇達州 (Minnesota)

(1) 法規名稱：Minn. Stat. § 299F.50 to .51 – Carbon Monoxide Alarms

(2) 法規摘譯：

I. 2007 年 1 月 1 日起，所有新建住宅單元均須設置一氧化碳警報器。

II. 2008 年 8 月 1 日起，所有既設之獨立房屋均須設置一氧化碳警報器。

III. 2009 年 8 月 1 日起，所有既設之公寓、大樓、集合住宅等均須設置一氧化碳警報器。

IV. 一氧化碳警報器必須設置在離睡眠區域 (臥室) 10 呎內之位置。

2. 伊利諾斯州 (Illinois)

(1) 法規名稱：430 Ill. Comp. Stat. § 135/ -- Carbon Monoxide Alarm Detector Act

(2) 法規摘譯：

I. 2007 年 1 月 1 日起，每一住宅單元均須設置一氧化碳警報器，但住宅內未設置燃氣器具、未連結至車庫且與建築物內其他一氧化碳可能來源確實區隔者，得免設之。

II. 一氧化碳警報器應設置在離睡眠區域 (臥室) 15 呎內之位置。

III. 房屋出租人應於出租房屋設置一氧化碳警報器，承租人應確保一氧化碳警報器之電力充足 (定時更換電池)。

IV. 蓄意未設置或維護一氧化碳警報器者屬 B 級輕罪，得處 180 天有期徒刑及最高 1500 美元罰金；致破壞或移除一氧化碳警報器者，初犯屬 A 級輕罪、得處 364 天有期徒刑及最高 2500 美元罰金，累犯則為 4 級重罪、得處 1 年以上，3 年以下有期徒刑及最高 2500 美元罰金。

3. 阿拉斯加州 (Alaska)

(1) 法規名稱：Alaska Stat. § 18.70.095 - Smoke and Carbon Monoxide Detection Devices.

(2) 法規摘譯：

I. 2005 年 1 月 1 日起，於住宅下列區域應設置一氧化碳警報器：放置燃氣器具之空間附近、住宅內附屬車庫門口旁、停車位、臥室。

II. 一氧化碳警報器應安裝在距離睡眠區域（臥室）15 呎內之位置。

III. 房屋出租人應於出租房屋設置一氧化碳警報器，承租人應確保一氧化碳警報器之電力充足（定時更換電池）；違者為 B 級輕罪，得處 90 天有期徒刑及最高 2000 美元罰金。

4. 佛蒙特州（Vermont）

(1) 法規名稱：Vt. Stat. Ann. titl. 9 § 2881 to 2883 – Smoke Detectors and Carbon Monoxide Detectors.

(2) 法規摘譯：

I. 2005 年 7 月 1 日起，新建之單一家庭建築物（single-family，供家庭居住並含睡眠區域之建築物，不包含集合住宅、公寓大廈等），應於鄰近臥室處設置一氧化碳警報器。一氧化碳警報器應使用家用電源，並以電池做為備用電力。

II. 2005 年 7 月 1 日起，住宅所有權變更時，應由賣方於鄰近臥室處設置一氧化碳警報器；一氧化碳警報器應使用家用電源或用電池供電。如買方發現一氧化碳警報器未符合規定，應通知賣方，賣方應於 10 日內改善完畢。

III. 2005 年 10 月 1 日起，所有住宅單元（含集合住宅、公寓大廈、旅社等）之睡眠區域（臥室）均應設置一氧化碳警報器。

5. 麻薩諸塞州（Massachusetts）

(1) 法規名稱：Mass. Gen. Laws Ann. ch. 148, § 26f1/2；Mass. Gen. Laws Ann. ch. 148 § 27A

(2) 法規摘譯：

I. 2006 年 3 月 31 日起，設有燃氣器具或封閉式停車處所之住宅，應於距離睡眠區域（臥室）10 公尺內設置一氧化碳警報器。

II. 住宅買賣移轉前，必須由消防單位查看一氧化碳警報器設置情形。

6. 紐澤西州（New Jersey）

(1) 法規名稱：N.J. Stat. Ann. § 52:27D-133.3 to 133.5 – Carbon monoxide sensor device required for issuance of certificate of occupancy.

(2) 法規摘譯：2003 年 4 月 7 日起，住宅使用燃氣器具或附有車庫者，應於距離睡眠區域（臥室）10 公尺內設置

一氧化碳警報器。

7. 喬治亞州 (Georgia)

(1) 法規名稱: Sec. R313.4.1 of the Ga. State Minimum Standard One and Two Family Dwelling Code (International Residential Code for One- and Two-Family Dwellings with Georgia State Amendments) adopted pursuant to Ga. Code Ann. § 8-2-20.

(2) 法規摘譯: 2009年1月1日起, 新建之供1至2個家庭居住的獨棟住宅、三層樓以下之連棟住宅, 於各個睡眠區域(臥室)均應設置一氧化碳警報器。

8. 德州 (Texas)

(1) 法規名稱: Tex. Hum. Res. Code Ann. § 42.060 – Carbon Monoxide Detectors; Tex. Health & Safety Code Ann. § 766.003 - Information Relating to Fire Safety and Carbon Monoxide Dangers.

(2) 法規摘譯: 2003年9月1日起, 要求日間照護中心、護理之家及一般住家均應設置一氧化碳警報器。

2.3.3 香港部分

香港特別行政區政府委任機電工程署監督氣體安全管理，同時並委任氣體安全諮詢委員會提供意見。機電工程署負責有關液化石油氣、天然氣等之進口、生產、儲存、運送、供應及使用安全準則，並訂定相關規定。在香港特別行政區訂有「住宅式氣體熱水爐裝置規定」，用以規範燃氣熱水器之裝設位置、通風等事宜。

依據「住宅式氣體熱水爐裝置規定」規定，香港地區係以FF式（強制供排氣式）為初次裝置或更換熱水器之首選。在浴室或淋浴間以外的地方，如周邊環境不允許裝置FF式熱水器，才可使用FE式（強制排氣式）熱水器，新設建築物應遵從「建築物（設計）規例」（第123F章）第35A條的規定，在指定的位置預留牆孔，以備安裝FF式熱水爐。如已依「氣體安全（裝置及使用）規例」第27條的規定留有適當牆孔，則一定必須利用該牆孔安裝FF式熱水器，不得安裝其他型式熱水器。

鑑於CF式（自然排氣式）熱水器自80年代中期起在香港已逐步淘汰，原因是香港地狹人稠，浴室較為窄小，安裝自然排氣式熱水器之垂直排氣管有其困難，且市場上尚有其他熱水器型式可供消費者選擇。為加速淘汰自然排氣式熱水器，機電工程署在「1991年氣體安全條例」和「氣體安全(裝置及使用)規例」已禁止安裝新的CF式（自然排氣式）熱水器[16]。

至於未設排氣管之RF式（屋外式）熱水器，除應由機電工程署註冊通過之氣體工程承包商每年檢驗、維修以確保操作安全外，為進一步維護住宅使用熱水器安全，「1999年氣體安全（裝置及使用及雜項）（修訂）規例」於2000年4月1日生效，禁止售賣、供應、裝置未裝設排氣管之熱水器，2000年6月30日後，並禁止使用未設置排氣管之熱水器為浴室供應熱水，經查獲違規者，可處罰款5千元港幣[17]。

2.4 新竹市防制一氧化碳中毒成果分析

2.4.1 前言—實施原因

有鑑於國內每逢冬令時節，民眾居家使用瓦斯型熱水器未符合安全規範，造成一氧化碳傷亡案件層出不窮，不僅使若干家庭瀕臨破碎，更由社會大眾共同承擔此一慘痛代價。新竹市因為地形因素，冬季季風強盛，向來即有「風城」之稱，無論東北季風或西南季風進入新竹市，風勢即受到約束而增強，以至於民眾在使用熱水器時關閉門窗的機率極大，加上長時間使用熱水器，且熱水器使用型式與設置位置不當或空間通風不良，使得一氧化碳燃燒不完全，致使新竹市從95年~100年8月止，因使用瓦斯熱水器造成一氧化碳中毒或疑似中毒案件共計發生163件，死亡人數達17人(如表2-3)。

表2-3 新竹市歷年一氧化碳中毒人數統計（民國95年~100年）

年度	95年	96年	97年	98年	99年	100年	合計
件數	4	10	29	43	36	41	163
死亡人數	1	1	2	7	5	1	17
受傷 (送醫)人數	8	16	57	90	72	108	351

資料來源：新竹市消防局

絕大多數造成人員死亡之案例均是不當使用瓦斯熱水器造成，且單一案件即造成一家數口或多人一起死亡(如表2-4)，然而消防單位面對此種類型的安全問題，除了平時對大眾加強教育宣導，更於冬季天氣嚴寒時的重點期間用盡一切方法，冀能喚醒民眾於使用上之注意與預防，但在實際上卻無法完全遏止中毒事件之發生，特別是98年2月3日新竹市南大路327巷內一家5口一氧化碳中毒死亡案件，引起全國報章媒體及社會大眾對於瓦斯熱水器使用不當造成危險之重視。新竹市消防局廖局長召集相關幹部苦思各種防範策略，決定以最根本之方式，於98年3月起針對新竹市戶政機關登記135,444戶住家，採全面地毯式實施家戶訪視，檢視各戶中熱水器使用情形並予以記錄，同時將瓦斯熱水器使用情形設定危險狀態分級(如表2-5)，進而掌握轄內使用瓦斯熱水器住戶之危險程度分佈，同時順利推動獎勵瓦斯熱水器更換或遷移之補助，真正落實保障市民之生命安全。

表2-4 新竹市近年重大一氧化碳中毒案例

日期	時間	地點	死亡人數	備註
98.01.19	22:28	新竹市關東路 23 巷內	2	公寓大樓，陽台加蓋且熱水器裝於室內，當日發現 2 名患者明顯死亡，交由警察處理。
98.02.03	15:50	新竹市南大路 327 巷內	5	透天住宅，陽台加蓋且熱水器裝於室內，當日發現 5 名患者明顯死亡，交由警察處理。
99.01.01	10:38	新竹市經國路 1 段	2	公寓大樓，陽台加蓋且熱水器裝於室內，當日發現 2 名患者明顯死亡，交由警察處理。

表2-5 新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形訪視安全程度評估標準

級數	狀態	內容
一級狀態	無危險之虞	<ol style="list-style-type: none"> 1.使用電熱水器（含太陽能熱水器）。 2.瓦斯熱水器安裝於屋外或開放性之陽台。 3.使用強制排氣型（FE、FF）熱水器，排氣管依規安裝且通風狀況良好。 4.建築物使用鍋爐式熱水器，安裝處所通風良好。
二級狀態	有危險之虞，但平日若隨時維持通風，即可避免危險	<ol style="list-style-type: none"> 1.使用屋外型（RF）或自然排氣型（CF）瓦斯熱水器，安裝於非開放性之陽台，平時窗戶保持開啟，通風良好，惟長期使用仍可能因燃燒不完全蓄積一氧化碳。 2.使用屋外型（RF）或自然排氣型（CF）瓦斯熱水器，安裝於通風不良之陽台，但有裝設功能正常之一氧化碳警報器。
三級狀態	高危險場所，不易藉由開窗等動作而完全改善，須建議住戶遷移或改裝熱水器者	使用屋外型（RF）或自然排氣型（CF）瓦斯熱水器，安裝於屋內或其他通風困難之場所（門窗緊閉、開口面積不足，堆積雜物影響通風），須立即遷移或改裝。

表2-4、表2-5 資料來源：新竹市消防局

2.4.2 實施方式與成效

新竹市轄內戶政資料統計戶數計135,444戶（統計至98年3月），為落實新竹市消防局家戶訪視政策，將訪視計畫區分為三階段專案推動辦理：

- 1.第一階段：新竹市所轄戶籍登載住戶全面進行家戶訪視（135,444戶），期間為98年3月至98年12月（如表2-6，第一階段實施成果統計）。

表2-6：新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表
— 第一階段

年度	應訪視戶數	受訪戶數	未受訪戶數	受訪率	三級戶數
98	135,444	75,675	59,769	55.87%	5,672

資料來源：新竹市消防局

- 2.第二階段：賡續98年全面訪視實施後，未受訪戶（59,769戶）再進行訪視，期間為99年1月至99年9月（如表2-7，第二階段實施成果統計）。

表2-7：新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表
— 第二階段

年度	應訪視戶數	受訪戶數	未受訪戶數	受訪率	三級戶數
99	59,769	16,954	42,815	28.37%	2,177

資料來源：新竹市消防局

- 3.第三階段：賡續前二階段全面訪視實施後，未受訪戶（42,815戶）再進行訪視，期間為99年10月至100年4月（如表2-8，第三階段實施成果統計）。

表2-8：新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表
— 第三階段

年度	應訪視戶數	受訪戶數	未受訪戶數	受訪率	三級戶數
100	42,815	725	42,090	1.69%	26

資料來源：新竹市消防局

新竹市於98年第一階段針對所轄135,444戶實施家戶訪視結果，受訪75,675戶數中，查列三級狀態者5,672戶，受訪率計55.87%；第二階段賡續98年全面訪視實施後，未受訪戶59,769戶再進行訪視，查列三級狀態者2,177戶，受訪率計28.37%；第三階段賡續98、99年全面訪視實施後，未受訪戶42,815戶再進行訪視，查列三級狀

態者26戶，受訪率計1.69%。經統計98年3月~100年4月將近2年期間，家戶訪視累積三級狀態者計7,875戶，總受訪率為68.92%，實際到訪總戶數為93,354戶（如表2-9，第一~三階段實施成果統計）。

表2-9：新竹市消防局執行瓦斯熱水器使用情形家戶訪視成果表—
第一~三階段

年度	應訪視戶數	受訪戶數	未受訪戶數	受訪率	三級戶數
98~100	135,444	93,354	42,090	68.92%	7,875

資料來源：新竹市消防局

2.4.3 家戶訪視成果分析

由上述統計資料分析可得受訪戶數93,354中，列為三級危險的即有7,875戶，約佔總數的8%，如果加上未受訪的42,090家戶，新竹市約有10,836戶需列為三級戶數，無怪乎每年均有約40件一氧化碳中毒的案件發生，如果遇上當年天氣嚴寒，這個數字將會往上達到2~3倍，因為潛在的中毒家戶實在太多，因此消防署從97年起每年均有編列預算補助全國各家戶改善熱水器使用情況，以新竹市為例，相對三級戶數而言（每年約補助400戶，每戶補助3,000元），改善的進度尚嫌緩不濟急，分析家戶訪視成果中，得知三級危險家戶特點如下：

1. 大部分都是天然氣瓦斯熱水器用戶。
2. 公寓式建築物比例較高。
3. 大多為RF型熱水器裝置於室內或CF型熱水器設置於陽台並加裝氣密窗。
4. 陽台加蓋有開窗，但堆積大量雜物或晾曬衣物，使得通風不良。

雖然目前在市面上已停售CF型熱水器，但以一般民眾使用熱水器年限均達10年以上之現況，使用CF型熱水器但未合格安裝排氣管的家戶不在少數，再加上民眾每日使用瓦斯熱水器之錯誤方式及安全觀念意識的輕忽，導致一氧化碳中毒案件不斷的發生，在三級危險家戶尚未完全改善以前，只能透過不斷的宣導及案例教育，輔以補助熱水器遷移或更換，雙管齊下，期能降低每年一氧化碳中毒件數。

第三章 通風模式與數值分析

3.1 模擬軟體 FDS 介紹

FDS 火災模擬軟體是由 NIST/BFRL (美國國家標準暨技術協會/建築物與火災研究實驗室) 所開發，於西元 2000 年 2 月公開發表第一版，目前已發展至 5.3 版 (2009 年 1 月) 且可供研究者免費下載使用。本章將介紹其模式方法、原理架構、模擬情境設定等，茲分述如下：

3.1.1 模式分析

由於建築物起火後的動態模式相當複雜，在進行建築物火災動態評估時，過去通常只能採用經驗公式與案例比對的方法，隨著電腦科技的發達，近年來大部分皆採用電腦程式計算模擬其動態評估。關於火災模擬軟體，目前有許多軟體可供選擇，而在火災模擬軟體當中亦分為區域模式 (Zone Model)、場模式 (Field Model)、避難模式 (Egress Model)、探測器反應模式 (Detector Response Model)、結構抗火模式 (Fire endurance Model) 及其他模式 (Miscellaneous Model) [18]。現今火災模擬最主要是以區域模式及場模式兩種方式來預測火災行為，其模式簡介如下 [19、20]：

1. 區域模式

所謂的區域模式 (Zone Model) 是以區域的觀點與控制容積為基礎的區域模式，將建築物內部的空間畫分為幾個不同的區域，每一個區域均可用一組參數與半經驗定律 (Semi-Empirical Laws) 來加以描述，並假設在每個區域流場內的物理和化學性質皆均勻相等，雖計算過程較簡便、省時，但只能預測平均的煙流動情形，無法預測實際火災發生時建築物內詳細之流場與溫度場分佈，且使用區域模式的一個最大問題在無法使用於不規則空間所區分的建築物。

早期區域模式被視為模擬火災的一個主要工具，特別是對於方形幾何形狀之區域或是小尺度之區域。雖然區域模式在早期的火災安全分析與設計曾扮演著成功的角色，不過，近年來建築物日趨高聳與複雜，對於大尺度或是幾何形狀複雜之建築物火災，甚至迅速延燒之火災，區域模式便有其不足之處。

2. 場模式

所謂的場模式 (Field Model) 是以計算流體力學為理論基礎，其模式基本上是由第一定律 (First-Principle Law) 所推導的守恆方程式 (Conservation Equations) (包含質量、動量、能量與濃度守恆方程式等) 以及化學燃燒、煙塵 (Soot) 模式、熱輻射與紊流等副模式 (Sub-Models) 所組成，而完整之火場模擬包含著紊流擾動、燃燒反應、煙塵特性以及熱輻射效應等複雜之耦合物理現象，用以預測火場情況進而設計火災消防工程的技巧。

隨著電腦計算速度的大幅增加也逐漸發展成熟，而且在實際的工程應用上也扮演一定份量的角色，對於大空間的火場預測，例如高層建築、隧道、大型賣場 (Shopping Mall)、巨蛋球場特殊建築等等，也能提供相當可靠的理論預測，通常經由場模式所進行的火災模擬需要花費大量的電腦計算時間，因為場模式主要將欲設計的空間進行多維空間的分割，而成多個控制體積 (Control Volume)，針對每個格點的性質然後利用質量、動量、能量或濃度等守恆方程式對預設的變數求其微分方程式 (Difference Equations) 及數值計算的解，隨著時間軸的移動，其所需的計算量會相當龐大，但也因為如此，採用場模式可針對不規則形狀的建築進行細部計算。因此，適用於複雜形狀、大空間建築中採用不同煙控系統的煙流動與沈積現象的模擬。

目前已有許多研究應用電腦模擬軟體從事火場與火災煙流相關研究，而鮮少針對瓦斯熱水器燃燒不完全產生一氧化碳擴散模擬相關研究；因此，本研究將以 NIST/BFRL(美國國家標準暨技術協會火災實驗室)所發展之場模式火災模擬軟體 FDS(Fire Dynamics Simulator) 為研究工具，模擬密閉空間內一氧化碳濃度蓄積情況，以及對內門窗開閉、強制通風等與一氧化碳濃度蓄積之相關性，並與全尺寸實驗結果相互比較分析，求證其 FDS 應用於模擬瓦斯熱水器燃燒不完全產生一氧化碳擴散情境之準確性，最終得到如何安全使用瓦斯熱水器之建議方式。

3.1.2 FDS 理論基礎與程式架構

FDS 是一套計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 軟體，軟體的核心是 Navier-Stokes 方程組，用於解析受火災熱浮力驅動的低速流場三維數值計算流體力學軟體，著重在煙流及熱傳遞的現象。其數值模擬分為直接數值模擬法 (Direct Numerical Simulation,

DNS) 及大型渦流模擬法 (Large Eddy Simulation, LES) 兩種方法。

FDS 主要是以大型渦流模擬法 (LES) 為基礎的 CFD 火災模擬軟體，可用於模擬建築物三維的火災情境，經由將建築物空間劃分成眾多細小格點，以數值分析方法將質量、動量、能量及物種四個守恆方程式、狀態方程式等離散化，並配合初始條件、邊界條件等限制，針對空間之流場、溫度場及火災特性進行解析。可預估火災發生時火場的溫度與熱輻射、燃燒生成物、煙層高度與環境可視度等火災的物理數據，以提供對於火場發生過程的掌握。

3.1.2.1 統御方程式

FDS 應用範圍為低馬赫數 (亦即 Weakly Compressible) 流場分析，可描述受火災浮力驅動之氣體流動現象，FDS 計算之主要的方程式如以下所介紹[21]：

1. 流體力學之統御方程式

(1) 質量守恆 (Conservation of Mass) 方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad (3.1)$$

其中 ρ : 流體密度 (kg/m^3)

u : 流體速度 (m/s)

t : 時間 (s)

(2) 動量守恆 (Conservation of Momentum) 方程式

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad (3.2)$$

其中 p : 壓力 (nt/m^2)

g : 重力加速度 (m/s^2)

f : 外力 (nt/m^3)

τ : 黏滯剪應力張量 (nt/m^2)

(3) 能量守恆 (Conservation of Energy) 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{DP}{Dt} = Q - \nabla \cdot q'' + \nabla k \nabla T + \nabla \cdot \sum_{\ell} h_{\ell} (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} \quad (3.3)$$

其中 $\frac{DP}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla P$ (質量導數)

h : 焓 (kJ/kg)

Q : 熱釋放率 (kw)

q'' : 輻射熱通量 (kw/m²)

k : 熱傳導係數 (kw/mk)

T : 溫度 (°C)

h_{ℓ} : ℓ 物種之焓值 (kJ/kg)

D : 擴散係數 (m²/s)

Y_{ℓ} : ℓ 物種之質量分率

(4) 物種守恆 (conservation of Species) 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\ell}) + \nabla \cdot \rho Y_{\ell} u = \nabla \cdot (\rho D)_{\ell} \nabla Y_{\ell} + \dot{W}_{\ell}''' \quad (3.4)$$

其中 \dot{W}_{ℓ}''' : ℓ 物種單位體積生成率

(5) 狀態方程式

$$P = P_o - \rho_{\infty} g Z + \tilde{P} \quad (3.5)$$

對低馬赫數流而言

$$P_o = \rho T R \sum (Y_i / M_i) = \rho T R / M \quad (3.6)$$

其中 P_o : 外界壓力 (nt/m²)

$\rho_{\infty} g Z$: 靜壓 (nt/m²)

\tilde{P} : 擾動壓力 (nt/m²)

(6) 擴散 LES (Large Eddy Simulation) 模型

$$\mu_{LES} = \rho(C_s \Delta)^2 \left(2(\text{def } \vec{u}) \cdot (\text{def } \vec{u}) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \right)^{1/2} \quad (3.7)$$

其中 C_s : 經驗常數

Δ : 格點長度

$$\begin{aligned} \Phi \equiv \tau \cdot \nabla \vec{u} &= \mu \left(2(\text{def } \vec{u}) \cdot (\text{def } \vec{u}) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{u})^2 \right) \\ &= \left\{ 2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right\} \\ &\quad - \left\{ \frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

定義 $(\rho D)_{l,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc} \quad (3.9)$

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} c_p}{Pr} \quad (3.10)$$

其中 Pr : 普郎特常數 (Prandtl number)

Sc : 舒密特常數 (Schmidt number)

2. 差分方程式

(1) 時間之離散

對時間項的離散，FDS 採用 Second order predictor-corrector scheme。在每個 time-step 開始的時候， ρ^n 、 Y_i^n 、 \bar{u}^n 、 H^n 與 p_0^n 均為已知，需特別注意的是，上標 $(n+1)_e$ 代表的是第 $(n+1)$ 個 time-step 時程式預估出來的值。

1. 熱物理性質 ρ 、 Y_i 和 p_0 是利用顯性的尤拉法 (explicit Euler step) 得到，例如密度可由下式預估

$$\rho^{(n+1)_e} = \rho^n - \delta(\bar{u}^n \cdot \nabla \rho^n + \rho^n \nabla \cdot \bar{u}^n) \quad (3.11)$$

2. 解壓力的 Poisson 方程式則可由

$$\nabla^2 H^n = -\frac{(\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)_e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta} - \nabla \cdot \bar{F}^n \quad (3.12)$$

\bar{F} 這一項包含了動量方程式裡得對流、發散及外力項。速度

則由下個 time-step 預估

$$\bar{u}^{(n+1)e} = \bar{u}^n - \delta t (\bar{F}^n + \nabla H^n) \quad (3.13)$$

而 time-step 必須符合

$$\delta t < \min\left(\frac{\delta x}{u}, \frac{\delta y}{v}, \frac{\delta z}{w}\right) \quad (3.14)$$

3. 前述兩者算完之後，熱物理性質 ρ 、 Y_i 和 p_0 將在下一個 time-step 做校正。例如密度將寫成

$$\rho^{n+1} = \frac{1}{2}(\rho^n + \rho^{(n+1)e} - \delta t(\bar{u}^{(n+1)e} \cdot \nabla \rho^{(n+1)e} + \rho^{(n+1)e} \nabla \cdot \bar{u}^{(n+1)e})) \quad (3.15)$$

4. 透過之前預估出來的結果來重新計算壓力

$$\nabla^2 H^{(n+1)e} = -\frac{2(\nabla \cdot \bar{u})^{n+1} - (\nabla \cdot \bar{u})^{(n+1)e} - (\nabla \cdot \bar{u})^n}{\delta t} - \nabla \cdot \bar{F}^{(n+1)e} \quad (3.16)$$

更正過的速度如下

$$\bar{u}^{n+1} = \frac{1}{2}[\bar{u}^n + \bar{u}^{(n+1)e} - \delta t(\bar{F}^{(n+1)e} + \nabla H^{(n+1)e})] \quad (3.17)$$

(2) 空間之離散

所有空間項的離散皆採用二階中央差分法 (Second order central difference)，整個計算的範圍是一個被長方體格點分割的長方體。每個格點裡面，用 i 、 j 和 k 分別代表格點的 x 、 y 及 z 方向。所有線性的量 (如密度) 都是在格點的中心給定，例如 ρ_{ijk}^n 代表的是第 n 個 time-step 格點 i 、 j 、 k 裡的密度。向量的值則是在格點的表面給定。

(3) 收斂條件

FDS 軟體在數值計算方法上，主要採 LES (Large Eddy Simulation 大尺度渦流模擬方法) 模式進行計算。對計算疊代時間 (time step)，程式會根據 CFL 穩定條件 (Courant-Friedrichs-Lewy condition) 與 VN 穩定條件 (Von-Neumann condition)，依據

計算所得之速度數值與物理量，自動進行疊代時間 δt (time step) 之調整，使計算過程中之 CFL 數與 VN 數均介於 0.8 至 1 之間，以達到數值方法的計算之收斂。

$$CFL = \delta t \max \left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z} \right) \quad (3.18)$$

$$VN = 2 \max \left(v \cdot D \cdot \frac{k}{\rho C_p} \right) \delta t \left(\frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} + \frac{1}{\delta z^2} \right) \quad (3.19)$$

δt : 疊代時間 (time step)

u 、 v 、 w : 速度分量

δx 、 δy 、 δz : 網格大小

V : 黏滯系數(viscosity)

D : 擴散系數(diffusivity)

$k/\rho c_p$: 熱導率(thermal conductivity)

3. 燃燒模式

(1) FDS 中提供混合比燃燒模式 (Mixture Fraction Combustion Model; MFCM) 及有限速率反應模式，主要差別在於 MFCM 是以氧消耗率之原理來計算熱釋放率，有限速率反應模式則是使用有限速率化學反應方程式來描述燃燒之化學反應。

混合比燃燒模式 (Mixture Fraction Combustion Model)



其中 V_i : i 分子化學反應當量係數

對化學當量反應而言

$$\frac{\dot{m}_F'''}{V_F M_F} = \frac{\dot{m}_O'''}{V_O M_O} \quad (3.21)$$

M_i : i 分子之莫耳重量 (kg)

m_i : i 分子之質量消耗率 (kg/s)

$$\text{定義 } z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F + Y_O^\infty}; s = \frac{V_O M_O}{V_F M_F} \quad (3.22)$$

其中 Y_O^∞ : 氧氣於大氣中之質量分率

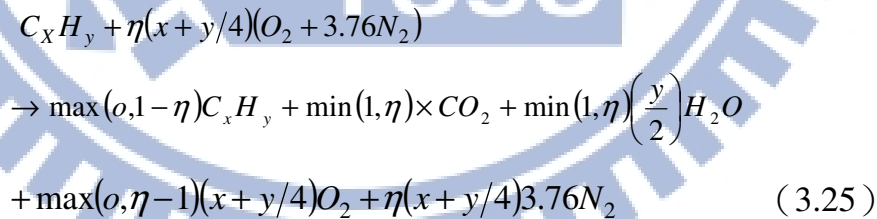
Y_F^I : 燃料之質量分率

在此模式中假設，當燃料與氧同時存在同一空間時，便隨即產生化學反應，因此火焰面 (Z_f) 可定義為：

$$Z(x,t) = Z_f; Z_f = \frac{Y_O^\infty}{sY_F^I + Y_O^\infty} \quad (3.23)$$

$$\text{且 } Y_O(Z) = \begin{cases} Y_O^\infty(1 - Z/Z_f) & Z < Z_f \\ 0 & Z > Z_f \end{cases} \quad (3.24)$$

由上述定義對一般碳氫化合物燃料之化學反應可以下式表示：



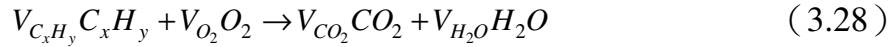
針燃燒反應之熱釋放率 \dot{q}''' 則由氧氣消耗率求得

$$\dot{q}''' = \Delta H_o \dot{m}_O''' \quad (3.26)$$

其中 ΔH_o 代表單位質量之氧消耗時之熱釋放率，且由氧氣之質量守恆可導出

$$-\dot{m}_O''' = \nabla \left(\rho D \frac{dY_O}{dZ} \nabla Z \right) - \frac{dY_O}{dZ} \nabla \cdot \rho D \nabla Z = \rho D \frac{d^2 Y_O}{dZ^2} |\nabla Z|^2 \quad (3.27)$$

以上為混合比燃燒模式在計算熱釋放率之原理，至於在有限速率反應模式中則是以下列方程式表示之。



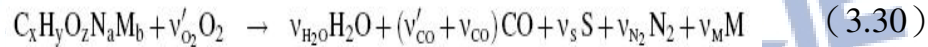
其化學反應速率以單一步驟之反應式表之，藉此求得熱釋放率。

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -B[C_xH_y]^a [O_2]^b e^{-E/RT} \quad (3.29)$$

其中 B ：反應常數 (pre-exponential factor for arrhenius reaction)

E ：活化能 (kJ/mol)

(2) FDS 針對不完全燃燒產生 CO 有專用的方程式，本研究模擬瓦斯熱水器不完全燃燒即是屬於此種反應，故本研究於燃燒模式採用此方程式作為模擬之模式，如下所示：



4. 熱輻射之統御方程式

FDS 之熱輻射傳統御方程式如下所示：

$$s \cdot \nabla_n(x, s) = k_n(x) [I_{b,n}(x) - I(x, s)], \quad n=1, \dots, N \quad (3.32)$$

$$\text{其中 } I_{b,n} = F_n(\lambda_{\min}, \lambda_{\max}) \sigma T^4 / \pi \quad (3.33)$$

$$I \cdot(x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (3.34)$$

I ：輻射熱強度 (kw/m²)

k ：吸收係數

λ ：波長 (m)

σ ：史蒂芬-波茲曼 (Stefan-Boltzman constant)

對於牆面之熱輻射，FDS 採用之邊界條件如下：

$$I_w(S) = \varepsilon I_{bw} + \frac{1-\varepsilon}{\pi} \int_{S' \cdot nw < 0} I_w(S') |S' \cdot nw| d\Omega \quad (3.35)$$

其中 I_w ：牆面之輻射熱強度 (kw/m²)

S ：單位向量

ε ：放射率

I_{bw} ：牆面黑體輻射強度 (kw/m²)

上述統御方程經有限體積法轉換後，再經由假設任一隔面之輻射強度相同，便可得知輻射熱通量。

$$q_r(x) = \int SI(x,s) d\Omega \quad (3.36)$$

因此能量守恆方程式中輻射熱之大小可以下式表之：

$$-\nabla \cdot q_r(x) = K(x)[U(x) - 4\pi_b(X)]; U(x) = \int_{4\pi} I(x,s) d\Omega \quad (3.37)$$

5. 邊界條件

FDS 中提供四種型態之邊界條件供使用者作選擇：1. 絕熱、2. 特定溫度（溫度可為時間之函數）、3. 熱薄型燃料模式及 4. 熱厚型燃料模式。

根據所計算出邊界吸收或放出的熱量，配合不同材料裂解之模式，敘述各種相異邊界因受熱所產生的化學變化，再進一步計算其對模擬空間所造成的影響。

在 LES 計算模式中

$$\dot{q}_c'' = h\Delta T ; h = \max \left[C|\Delta T|^{1/3}, 0.037 \frac{K}{L} \left(\frac{|U|L}{V} \right)^{0.8} P_r^{1/3} \right] \quad (3.38)$$

ΔT ：邊界與氣態分子間之溫差(°C)

C ：自然對流係數(經驗常數，此模式中預設在水平面時 $C=1.43$ ，垂直面 $C=0.95$) (kw/m²)

L : 特徵長度 (m)

ν : 動黏滯係數 (m^2/s)

1. 熱厚型固態燃料，其統御方程如下：

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} ; -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x}(o,t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (3.39)$$

其中 ρ_s : 固態燃料密度 (kg/m^3)

C_s : 固態燃料比熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{k}$)

\dot{q}_c'' : 對流熱通量 (kw/m^2)

\dot{q}_r'' : 輻射熱通量 (kw/m^2)

T_s : 固態燃料溫度 ($^{\circ}\text{C}$)

2. 熱薄型固態燃料 (假設溫度在垂直固態燃料方向為均勻分佈)

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{\dot{q}_c'' + \dot{q}_r''}{\rho_s C_s \delta} \quad (3.40)$$

其中 δ : 固態燃料厚度(m)

3. 液態燃料

燃燒時液體燃料蒸發，此現象為一函數，且與溫度與蒸氣濃度有關。當液體表面蒸氣之分壓等於 Clausius-Clapeyron 壓力時，將達平衡狀態。

$$p_{cc} = p_0 \exp \left[-\frac{h_v M_f}{\mathfrak{R}} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad (3.41)$$

其中 h_v : 蒸發熱

M_f : 分子重

T_s : 表面溫度

T_b ：燃料沸騰溫度

FDS 在求解以上之統御方程式、燃燒模式、熱輻射模式以及邊界條件上的計算上皆採用大渦流模擬法 (Large Eddy Simulation, LES) 計算方法，LES 法是將流體物理量區分為大尺度(grid-scale)及次網格尺度 (sub-grid scale, SGS) 兩部份。對於大尺度的物理量在 LES 中直接由 Navier-Stokes 方程式求解；而在次格點尺度內的物理量，將小於網格尺寸之漩渦或紊流以次網格紊流模式 (Sub-grid Turbulence Model) 表示，並直接計算流場暫態變化。另依方面 FDS 亦提供了 DNS 之計算方法，但由於 DNS 法需大量實驗資料作驗證而在計算上同時也需要相當龐大之硬體設備，因此考量學術上與工程上之實用性與經濟效應，本研究採用 FDS 技術手冊上建議使用之 LES 模式，DNS 法相關之模式內容則未於本論文中列舉。

3.1.2.2 FDS與Smokeview運算流程架構

FDS使用首先針對欲模擬之對象物，將蒐集完成的火場相關資料建立一資料輸入檔 (Input) *.data，包含計算範圍、計算格點數、物件尺寸及其熱屬性、火災情境、火源位置、內部空間的規劃、牆壁開口、撒水頭與其它邊界條件等，經FDS程式之計算後，製造輸出計算結果檔*.smv、*.sf、*.bf、*.end、*.s3d、*.q、*.sz等相關檔案，再經由瀏覽程式Smokeview之執行，以三維動畫圖形方式呈現火場情境。其應用架構圖與FDS所需輸入指令簡略說明，如圖3-1、表3-1所示。

FDS藉由Smokeview繪製火場情景，將模擬結果圖面化、色彩化、立體化、動畫化，讓使用者快速的建立火場圖像，如同身歷其境，因此可以快速的掌握火場資訊，進一步對火場進行分析，將危害定義出來。其功能包括：模擬火場中煙層 (氣流) 流動方向、煙層溫度、煙層下降速度、火場能見度、燃燒熱釋率 (HRR)、可燃物燃燒速度、火場輻射熱擴散、火場溫度分佈、氧氣、一氧化碳及二氧化碳濃度、排煙設備動作等。

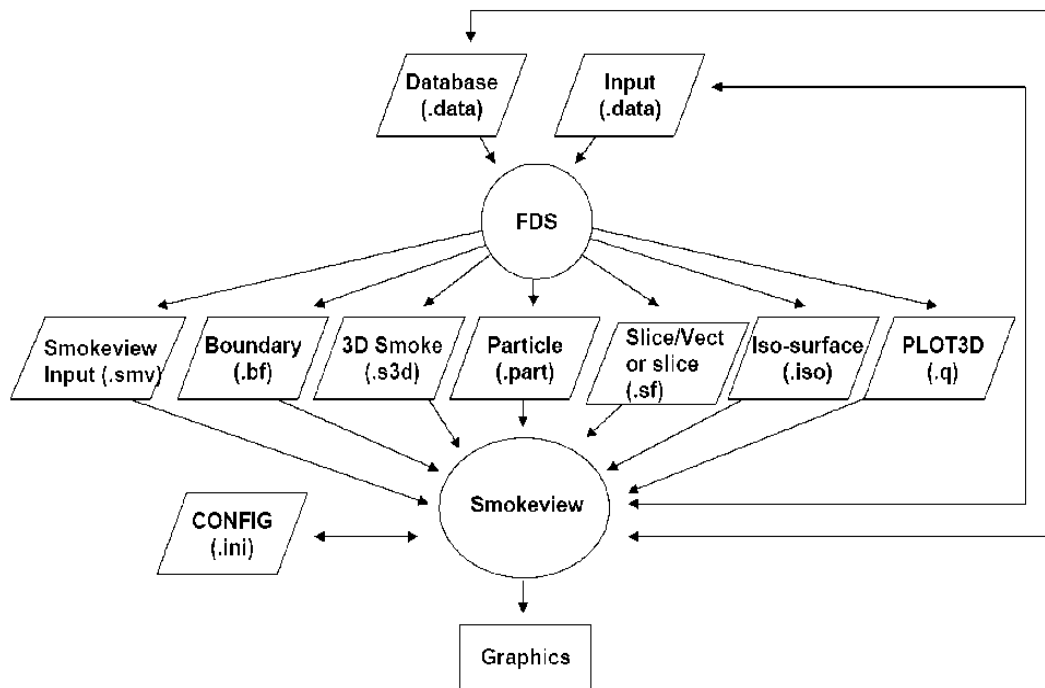


圖 3-1 FDS 與 Smokeview 使用流程架構圖[22]



表 3-1 FDS 輸入檔指令說明表[23]

指令名稱	代表意義	指令說明
HEAD	程式檔命名	HEAD包含CHID與TITLE兩參數，CHID是命名程式檔，執行FDS後所產生的檔案皆會以此一參數為主檔名。TITLE則為程式主題敘述。
MESH IJK	網格定義	即格點之尺寸設定。包含三個參數： IBAR：X軸切割之格數。 JBAR：Y軸切割之格數。 KBAR：Z軸切割之格數。
MESH XB	設定運算區域大小	設定運算區域範圍之大小及座標系延展，由XBAR、YBAR、ZBAR三參數所組成，其分別代表水平(X)、水平(Y)、垂直(Z)方向的區塊範圍。
TIME	設定模擬火災時間	包含DT、TWFIN兩參數，前者代表疊代時間間距，後者代表所需模擬時間。
SURF	設定表面及邊界條件	定義邊界條件所有固體表面物或開口、流動範圍，為火源、進氣、排風口之設定皆以此一指令設定相關細節參數。
OBST	內容物定義	代表計算區塊內之結構體。每一OBST列包含流體區域內的矩形固體座標，而此固體由兩個點 (X1,Y1,Z1) 及(X2,Y2,Z2)界定，並被鍵在OBST列上。
MISC	設定各雜項參數	指令由許多不同輸入參數所組成，例如TMPA參數代表環境周圍溫度等。
HRRPUA	熱釋放率	指單位面積之熱釋放率(kW/m^2)，用於控制燃料燃燒速率。
VENT	可穿透面定義	描繪結構體或外牆的鄰接表面，VENT可用於代表建築物內的通風系統如進風口或回風口。
DEVC	偵測點設置 (設備參數)	代表計算區域內部測點。此測點由X、Y、Z三點組成，經由輸入指定指令亦可紀錄欲測參數隨時間變化情形。
SLCF	動畫切面圖	切面動態效果輸出。

3.2 我國燃氣熱水器現行規範

我國燃氣熱水器及其配置裝置與試驗標準均依照「中華民國國家標準」(CNS)的規範，然而隨著社會發展演變，都市人口密集化，一氧化碳中毒事件不斷發生，使得政府重視並參酌世界各國之立法方向與實務經驗，於民國 94 年在消防法中納入燃氣熱水器之安全管理條文(消防法第 15 條之 1)，隨後相對應之燃氣熱水器管理子法相繼公布施行，對於燃氣熱水器的安全管理及一氧化碳防治，建立較完整的規範與預防措施，本研究整理相關法規與標準(如表 3-2)如下：

表 3-2 我國燃氣熱水器安全管理法規沿革

公布施行日期	法規名稱	規範目的及內容
94.02.02	消防法第 15 條之 1	燃氣熱水器承裝業營業登記之申請、由中央主管機關訂定安裝標準
94.07.22	燃氣熱水器及其配管安裝標準	各種燃氣熱水器及其配管安裝標準與竣工檢查
94.11.29	燃氣熱水器及其配管施工標籤及施工登錄卡作業規定	規範燃氣熱水器及其配管施工標籤及施工紀錄之規格及格式等事項
94.12.30	燃氣熱水器及其配管承裝業管理辦法	申請合格燃氣熱水器及其配管安裝業者之管理規定
95.01.12	直轄市縣(市)政府辦理燃氣熱水器承裝業管理作業要點	地方政府對於燃氣熱水器及其配管安裝業者之管理規定

資料來源：本研究內部整理

參酌上述燃氣熱水器及其配管安裝標準，現行國內較常用之燃氣熱水器型式，依照供排氣方式，可將熱水器型式分類如表 3-3：

表 3-3 國內常用燃氣熱水器型式（以供排氣方式區分）

設置場所	劃分		供排氣方式		符號
			供氣	排氣	
室內	半密閉式	自然排氣式	由室內自然供氣	以排氣管讓廢氣自然排放至室外	CF
		強制排氣式	由室內自然供氣	使用抽氣扇強制將廢氣沿排氣管排放至室外	FE
	密閉式	強制供排氣式	使用抽氣扇強制自室外沿供氣管採集供氣	使用抽氣扇強制將廢氣沿排氣管排放至室外	FF
室外	室外型		由室外自然供氣	由室外自然排氣	RF

資料來源：內政部消防署

針對各熱水器特性，說明如下：

1. CF式（Conventional Flue，簡稱CF式）：半密閉空間之自然排氣式熱水器，圖例如圖3-2。裝設環境必須要有「與屋外相通」的「供氣口」（例如裝置紗網的百葉窗）與「上部換氣口」，因採自然排氣方式，對於排氣管構造要求較為嚴格，因而國內絕大多數裝設CF式熱水器者，實際上無法符合規定。茲條列重要內容如下：

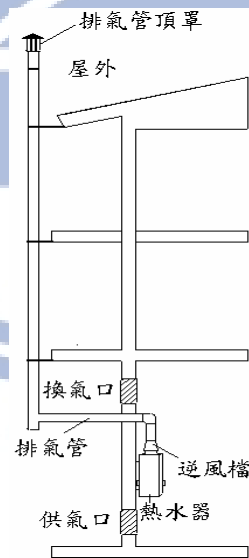


圖 3-2 CF 式熱水器裝設圖

- (1) 熱水器於同一室內空間裝設逆風擋，由逆風擋開口下端至排氣管頂罩開口中心點之實際高度(h)應在下列計算式所得之值 (h1) 以上。圖例如3-3：

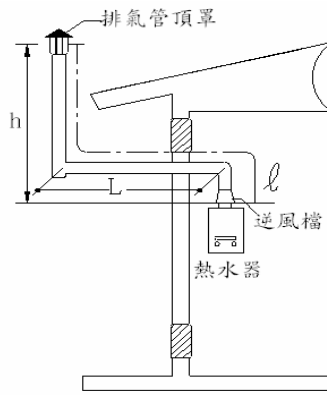


圖 3-3 CF 式熱水器排氣管及頂罩圖示

其中 h1 之計算式

$$h1 \equiv \frac{0.5 + 0.4n + 0.1\ell}{\left(\frac{Av}{5.16H}\right)^2} \quad (3.42)$$

算式中

h1：排氣管最小高度（單位：公尺）。

n：彎管數量。

ℓ：由逆風擋開口下端至排氣管頂罩開口中心點之長度（單位：公尺）。其長度超過 8 公尺者，以 8 公尺計算。

Av：排氣管之截面積（單位：平方公分）。

H：熱水器燃氣消耗量（單位：千瓦）。

- (2) 排氣管水平配置長度在 5 公尺以下，且不得向下傾斜，其彎頭數量在 4 個以下。
- (3) 排氣管高度在 10 公尺以下（超過時應採取保溫措施），且其頂罩高度高於屋頂 60 公分以上。排放廢氣溫度如在 260°C 以上，且排氣管頂罩水平距離 1 公尺內有建築物時，排氣管頂罩高度應高於該建築物 60 公分以上。
- (4) 位置易於檢查維修，設於天花板內者，天花板可拆卸，且能對全部隱蔽部分施以檢查、維修及更換。

因CF式熱水器之排氣管需延伸至屋頂以上方可達到自然排氣之效果，若裝設於公寓大樓則需配置很長的配管，在美觀及經濟考量下，國內民眾裝設此型式熱水器時均未合格裝設排氣管或簡便裝設排油煙機之排氣管替代，當熱水器使用環境通風條件不佳時，瓦斯燃燒不完全產生之一氧化碳中毒無法排出，在室內累積而發生許多因此中毒之案例，在新法規施行後，針對裝設不合規定之燃氣熱水器訂有罰則，且因此致人傷亡還得附帶刑責，考量種種原因之下，此型式已不符合民眾安全及經濟需求，因此目前市面上已無販售此型式之熱水器，也間接降低了一氧化碳中毒機率，但在94年法規施行之前所安裝之此型式不合格熱水器不在少數，也成為潛在之一氧化碳中毒因子。

2.FE式（Forced Exhaust，簡稱FE式）：半密閉空間之強制排氣式熱水器，圖例如圖3-4。熱水器燃燒使用之空氣取自屋內，並將廢氣以排氣風機等機械方式，經排氣管強制排放至屋外，與CF式相較，排氣管易於裝設，也是國內現行建築物型態及價格上最易被接受之類型。

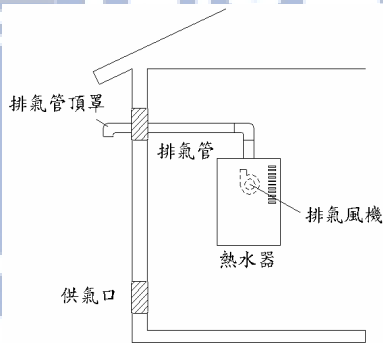


圖3-4 FE式熱水器裝設圖示

3.FF式（Forced Drought Balanced Flue，簡稱FF式）：密閉空間之強制排氣式熱水器，裝設圖示如圖3-5。熱水器燃燒使用之空氣取自室外，並將廢氣以排氣風機等機械方式，經排氣管強制排放至室外，依國內建築型態，密閉空間適宜裝設此種熱水器或電熱水器，隨著強制排氣型熱水器普遍化，價格也逐漸下降至2萬元以下，目前有更多消費者選擇裝設此種熱水器。

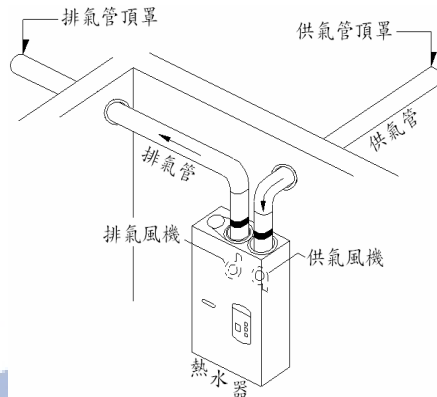


圖 3-5 FF 式熱水器裝設圖示

4.RF式 (Roof Top Flue, 簡稱RF式)：室外空間之自然換排氣型熱水器，熱水器燃燒使用之空氣取自屋外，並將廢氣以自然方式排放至屋外，具有防風防雨之功能，且價位低廉，普遍安裝於一般透天住宅或飲食店，惟不得安裝於屋內或有任何影響空氣流通設施之處所，裝設圖示如圖3-6。

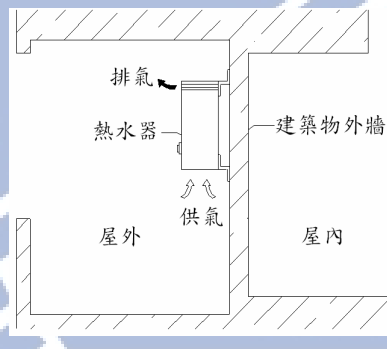


圖 3-6 RF 式熱水器裝設圖示

上述國內常用燃氣熱水器型式CF、FE、FF及RF等4種型式熱水器中，以RF及CF最易導致一氧化碳中毒事件。前者適於室外空間使用，以一般常見的12 L/min規格而言，如於室內面積1.81坪、高度2.7m的密閉小空間使用，於使用30分鐘左右即可蓄積達1,600ppm之一氧化碳濃度。後者雖屬室內型，但如陽台設有鋁窗又無足夠之供氣口，同樣將導致不完全燃燒產生一氧化碳，此時一氧化碳若無法順利由排氣管以自然排氣方式排出，則將由熱水器的底部、側邊排放至室內，進而造成人員產生一氧化碳中毒現象。另一方面，熱水器及熱水器排氣管出口應避免安裝在冷氣機的換氣口週遭，以防冷氣機將排出的廢氣再吸入至室內，造成內部人員吸入中毒。

3.3 全尺寸實驗情境介紹

本論文參考勞研所於 95 年 12 月所發表之「陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究」，模擬建構瓦斯熱水器於密閉式陽台使用時之一氧化碳累積情況，以下簡述該研究所設定之實驗條件。

3.3.1 實驗空間及器材

勞研所實驗利用該所學員大樓現有學員宿舍選其宿舍一間，將其開放式陽台改建為封閉式陽台並加裝鋁窗以模擬實際住家陽台改建之情形。學員宿舍陽台為一長方形格局，長 2.9 公尺、寬 1.27 公尺、高 3.8 公尺（體積約為 14 立方公尺），而室內房間體積約 78 立方公尺；陽台所加裝之鋁窗尺寸有兩種，上方為小型鋁窗，開窗面積為 53×40 平方公分，下方為大型鋁窗，開窗面積為 144×40 平方公分，房間配置平面圖如圖 3-7 所示。除了封閉式鋁窗陽台的建立外，並裝設一套家用瓦斯熱水器系統進行相關實驗，選用的熱水器為一般住家最常用的室內陽台自然排氣型（CF 式），而實驗以模擬冬天天冷所需水溫高而開大火的情形下進行實驗。

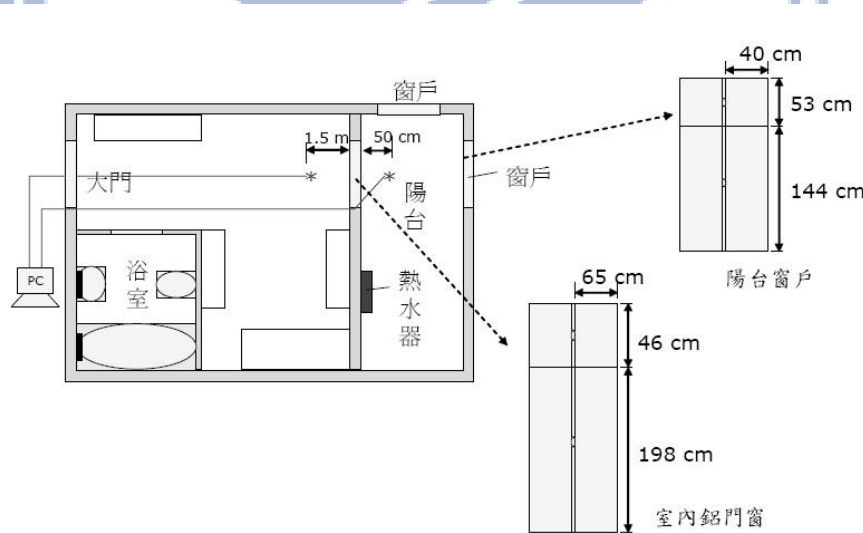


圖 3-7 實驗房間配置平面圖

資料來源：勞工安全衛生研究季刊(95 年 12 月)

3.3.2 氣體濃度的量測

為了量測瓦斯熱水器燃燒不完全所產生的一氧化碳、燃燒所造成的二氧化碳濃度累積及空間氧氣濃度衰減情形，勞研所實驗所選用的測量儀器為兩具五用氣體偵測器 (MultiWarn II)。其量測原理主要分為觸媒燃燒式、電化學式及紅外線式三種，可同時偵測五種氣體並可因現場需求調整其偵測範圍。

勞研所實驗主要探討的有密閉空間、室內門窗的開關及強制通風等對於室內一氧化碳濃度累積的影響。量測方式主要是將量測導管置於室內通往陽台之出入口內外各取一量測點，量測點高度則為人體呼吸帶高度 (約為離地面 150 公分左右)。因模擬寒流天冷，熱水器設定出水水溫偏高，故熱水器的使用設定調整為大火等級，固定瓦斯熱水器的溫度並如同一般住家使用操作的習慣，先將瓦斯桶開關開啟，然後於浴室開啟水龍頭開關使熱水器點火並開始運作。

有關 3 種情境實驗方式介紹如下：

1. 密閉空間之實驗方法是將陽台對外窗戶及對內門窗全數關閉，量測點位置則是置於陽台欲進入室內人體呼吸帶高度的位置，當瓦斯熱水器啟動時藉以量測此密閉陽台內氣體濃度累積之情形。
2. 室內門窗的開關影響之實驗方法則是在密閉空間條件下多開啟通往室內之落地窗，面積大小約為 65×198 平方公分 (如圖 3-7 所示)，其他窗戶均關閉，瓦斯熱水器啟動時量測陽台及室內氣體濃度累積之情形。
3. 強制通風情境則是開啟陽台上方一氣窗及陽台通往室內之氣窗，面積大小分別約為 40×53 平方公分及 65×46 平方公分，並於陽台氣窗上裝設一小型抽氣風扇以模擬風由室外向屋內吹，風速約為 0.9 m/s (如圖 3-8、3-9 所示)，瓦斯熱水器啟動時量測陽台及室內氣體濃度累積之情形。

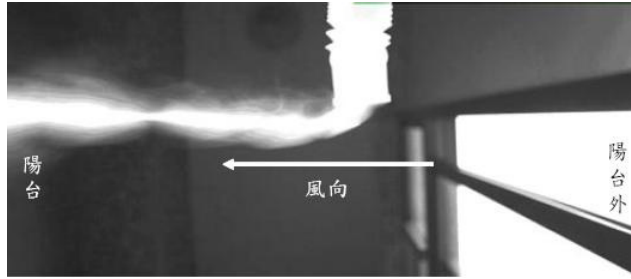


圖 3-8 風向煙流可視化 (風由窗戶外朝向陽台屋內吹)

資料來源：勞工安全衛生研究季刊(95 年 12 月)

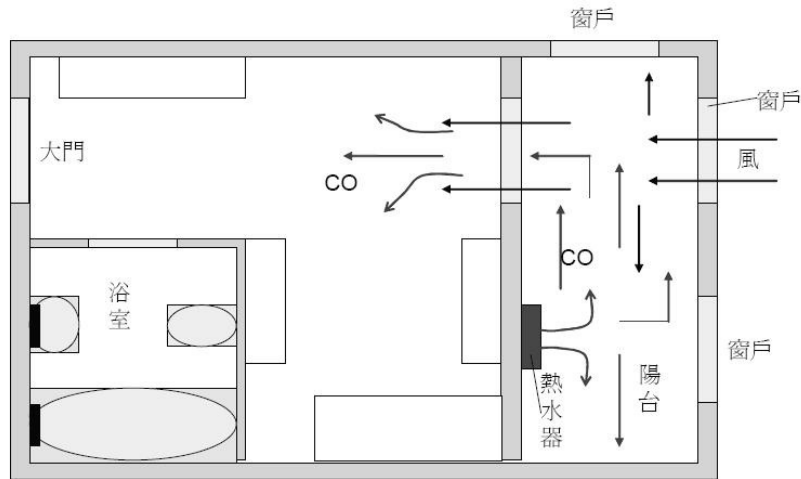


圖 3-9 強制通風情境示意圖

資料來源：勞工安全衛生研究季刊(95 年 12 月)

3.4 模擬實驗邊界條件與參數設定

3.4.1 模擬模型

從勞研所之實驗中可得知宿舍空間之陽台為一長方形格局，其長寬高分別為2.9 m×1.27 m×3.8 m（體積約為14 m³），而其室內房間為2.9 m×7.07 m×3.8 m，體積約78 m³；陽台所加裝之鋁窗尺寸有兩種，上面為小型鋁窗，開窗面積為53 cm×40 cm，下面為大型鋁窗，開窗面積為144 cm×40 cm，房間配置如圖3-10所示。依據文獻之實驗空間規格來當作模擬模型的基準，其模擬圖如圖3-11所示，而熱水器與陽台、窗戶相關位置如圖3-12所示，主要開啟陽台窗戶位置與上、下窗戶位置則如圖3-13所示，實驗空間陽台窗戶內部及外觀照片如圖3-14、3-15所示。

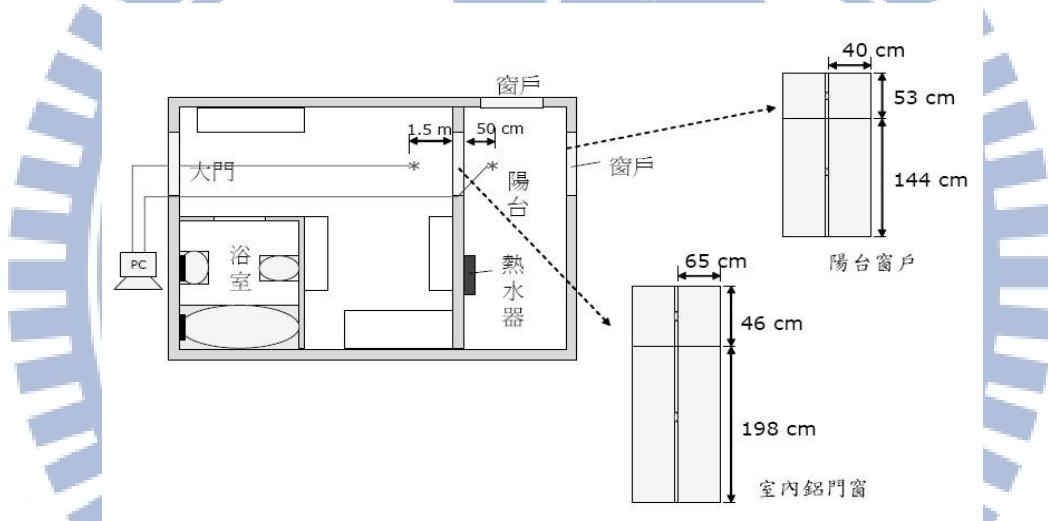


圖3-10 實驗空間示意圖

資料來源：勞工安全衛生研究季刊(95年12月)

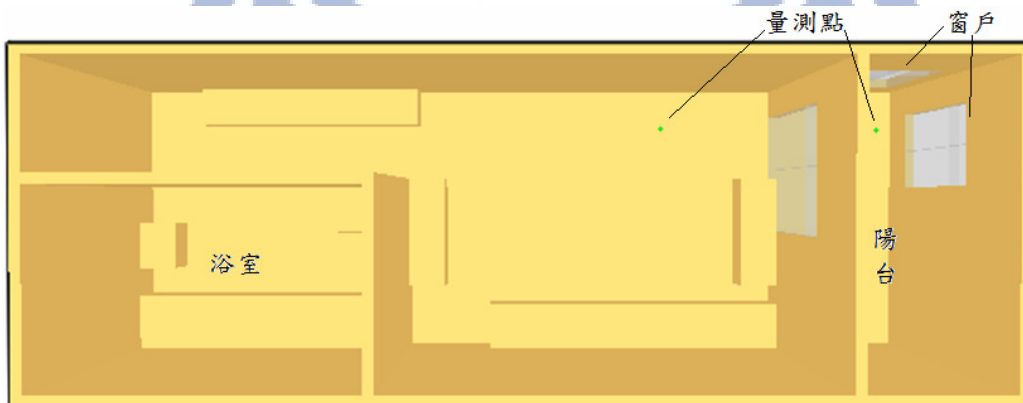


圖3-11 模擬空間示意圖

資料來源：本研究繪製

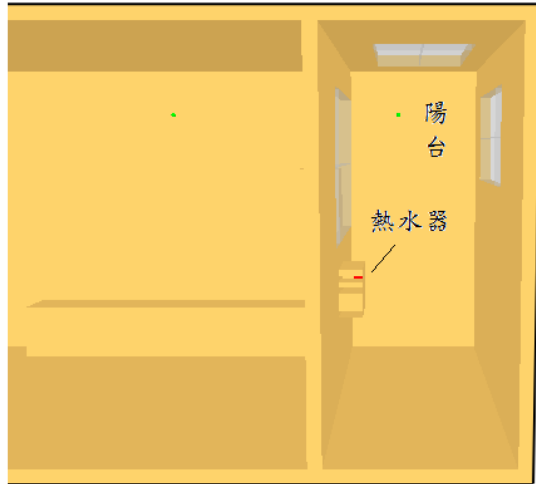


圖3-12 模擬空間陽台示意圖

資料來源：本研究繪製

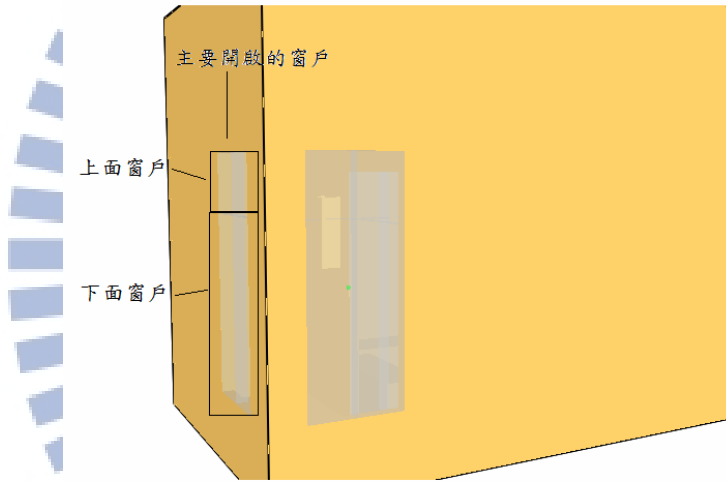


圖3-13 模擬空間窗戶示意圖

資料來源：本研究繪製

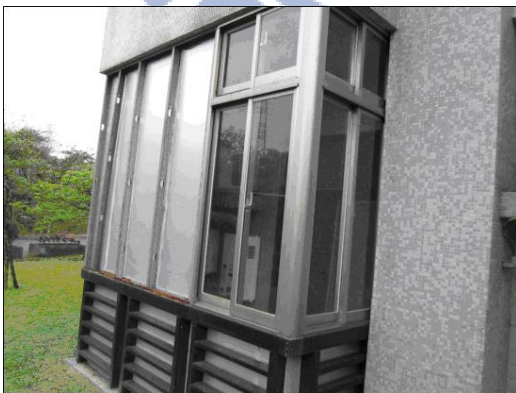


圖3-14 實驗空間陽台外觀照片

資料來源：本研究實地拍攝



圖3-15 實驗空間陽台內部窗戶照片

資料來源：本研究實地拍攝

3.4.2 火源設定

火源設定主要是參考文獻中所使用之CF型瓦斯熱水器（如圖3-16所示），故採用10L的瓦斯熱水器機型來做為模擬之瓦斯熱水器規格，其火源大小為21.4KW，而火源規格有13排，單排的火源尺寸為0.55×10.5CM（為固定規格品），13排總寬度21.8CM（如圖3-17所示），所以模擬的火源大小為0.105m×0.218m，熱釋放率為21.4KW。

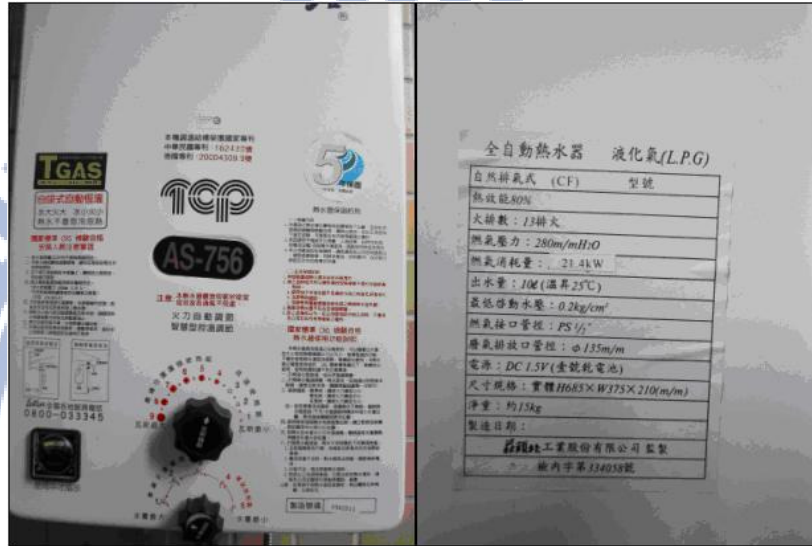


圖3-16 實驗瓦斯熱水器外觀及規格照片



圖3-17 實際火源規格示意圖

圖3-16、圖3-17資料來源：本研究實品拍攝

3.4.3 格點測試

在格點測試中主要針對CO與O₂來做分析，以CO與O₂量測值的誤差與格點數的多寡來相互比較，得出採用0.05來作為此次模擬中火源區域之格點大小最為恰當。

表3-4 格點測試

格點大小 (m) X×Y×Z	格點數	量測點 1 CO(ppm)	量測點 2 O ₂ (%)	最大誤差值
0.025×0.025×0.025	115.2 萬	18.4	19.6	0%
0.05×0.05×0.05	14.88 萬	17.8	19.9	3.26%
0.1×0.1×0.1	1.86 萬	4.8	20.6	73.9%

資料來源：本研究內部整理

3.4.4 其他相關參數設定

模擬所設定之其他相關參數皆可參考表3-5所示。

表3-5 模擬相關參數設定

設定條件	設定值	說明
起始溫度	25°C	夜間之常態溫度
火載量	21.4KW	全尺寸實驗所使用之CF型熱水器(LPG型)10L之火源大小規格為21.4KW，燃燒面積為0.105m×0.218m
燃料	丁烷(C ₄ H ₁₀)	液化石油氣(LPG)主燃料
模擬時間	1000秒~60分鐘	配合全尺寸實驗所量測時間為依據，故模擬時間為1000秒~60分鐘
陽台空間縫隙大小	長1.6m×寬0.05m	全尺寸實驗無法達到完全密閉，需設定一合理洩漏量

資料來源：本研究內部整理

第四章 結果與討論

4.1 模擬情境結果與實驗比對

4.1.1 密閉陽台情境模擬結果與實驗比對

本小節主要是針對實驗的密閉情境來做模擬，將模擬結果與實驗的數據來做比較，主要比較的項目有 CO_2 、 O_2 以及 CO 氣體濃度曲線圖，分別如圖 4-1~圖 4-3 所示。

本案例主要是模擬熱水器在密閉陽台下燃燒的情境，將陽台上的窗戶全數關閉，當熱水器燃燒的時候會消耗陽台內的 O_2 ，進而產生出 CO_2 ，從圖 4-1 與圖 4-2 的模擬結果中可發現到隨著熱水器的燃燒， O_2 的濃度不斷的降低，而 CO_2 的濃度卻不斷的增加，這趨勢與實驗出來的結果趨勢相符合，但從圖 4-2 可以發現到模擬值的 O_2 濃度在接近 4 分鐘的時候其下降趨勢較實驗值來的快，因此圖 4-1 相對應的 CO_2 濃度卻在同時上升的趨勢較實驗值來的高，當時間到達 8 分鐘的時候， O_2 濃度已經低於 14% 且不再下降，此時 CO_2 的濃度也在 8 分鐘後不再上升；反觀圖 4-3 的 CO 濃度變化圖在 6 分鐘以前因為 O_2 濃度高於 15%，故其曲線上升趨勢較為緩慢，而當 6 分多鐘時 O_2 濃度低於 15%，其 CO 濃度上升的趨勢更快，在 7 分多鐘即到達 1500ppm，對陽台空間造成危害。

從模擬值與實驗值的曲線圖來比較，可發現模擬曲線變化的趨勢都比實驗值還要來的高，主要是因為模擬所設定之密閉空間與實驗場地比較下，其環境為完全封閉，實驗場地本身含有 2 個窗戶及 1 扇落地窗，考量現場會因各窗戶的縫隙而使該空間 O_2 含量受到補充，因此造成 O_2 的下降趨勢沒那麼快，間接影響到 CO_2 及 CO 的產生。

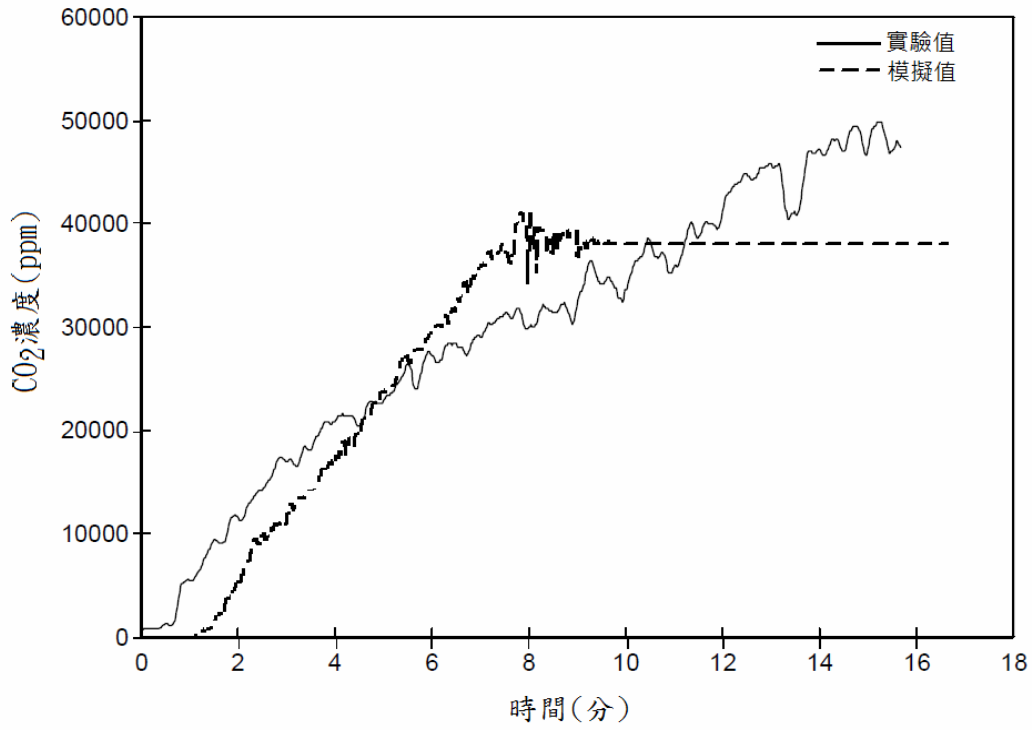


圖 4-1 密閉陽台實驗值與模擬值 CO₂ 濃度比較圖

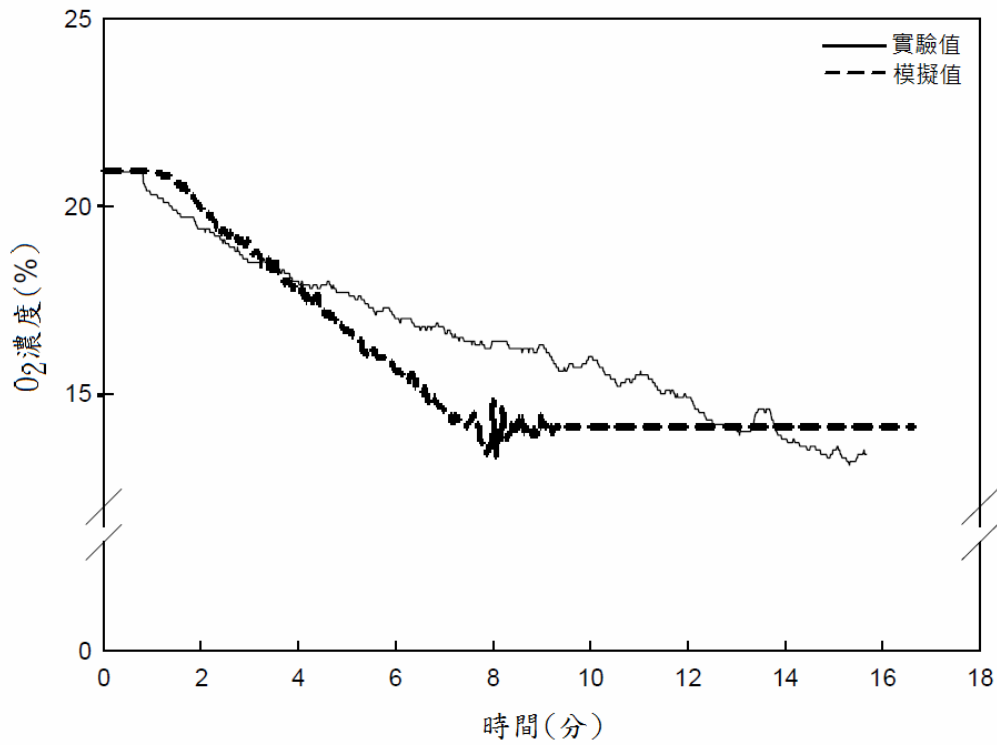


圖 4-2 密閉陽台實驗值與模擬值 O₂ 濃度比較圖

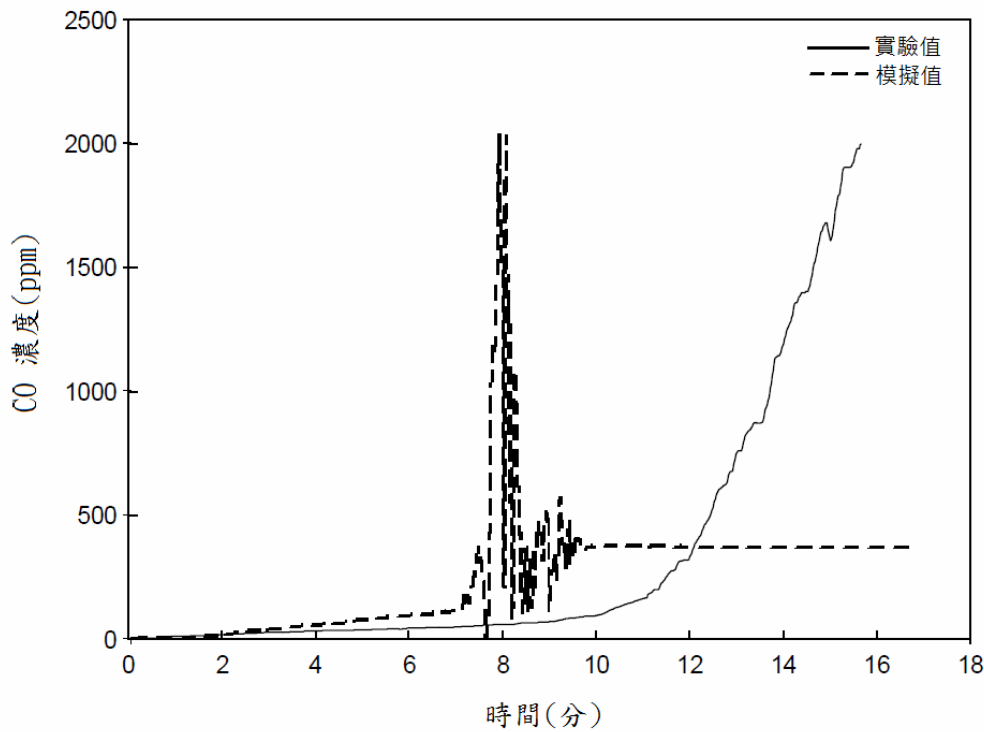


圖 4-3 密閉陽台實驗值與模擬值 CO 濃度比較圖

4.1.2 修正密閉陽台模擬結果與實驗比對

由 4.1.1 小節可得知，實驗陽台存在有縫隙的問題，因此本小節會增加縫隙來使模擬情境更符合實際實驗場地，本情境將縫隙尺寸設定為長 1.6M×寬 0.05M，並以實驗值來比較，確認縫隙影響模擬結果的狀況。

從圖 4-4~圖 4-6 中可發現，模擬值的結果和趨勢與實驗值來做比對，其曲線圖較為相近，而從圖 4-5 的 O_2 濃度曲線圖中可發現，當 O_2 濃度低於 15% 時（模擬時間約 10 分鐘時），其 CO 濃度的曲線會開始有比較明顯的上升，主要因為在 FDS 模擬軟體的設定中，當 O_2 濃度低於 15% 時才會產生較多量的 CO，此現象在 4.1.1 小節中也有相同的趨勢；而當 CO 濃度快速上升的同時，會對空間中的流場造成影響，而使得 CO 濃度曲線圖有上下起伏的現象（模擬時間約 10~14 分鐘時），爾後再往上飆升。

由 4.1.1 和 4.1.2 小節的討論中可發現，使用 FDS 來進行模擬時，模擬空間與實際空間的差異性在於模擬空間能做到完全密閉，而實驗

空間並不能達到完全密閉，此因素會對模擬結果有所影響，在模擬的時候需加以考慮；另外，FDS 程式中，CO 是因為燃燒不完全所產生的產物，當 O₂ 濃度低於 15% 時才會大量產出，所以 CO 濃度的曲線圖會有急速飆升的現象。

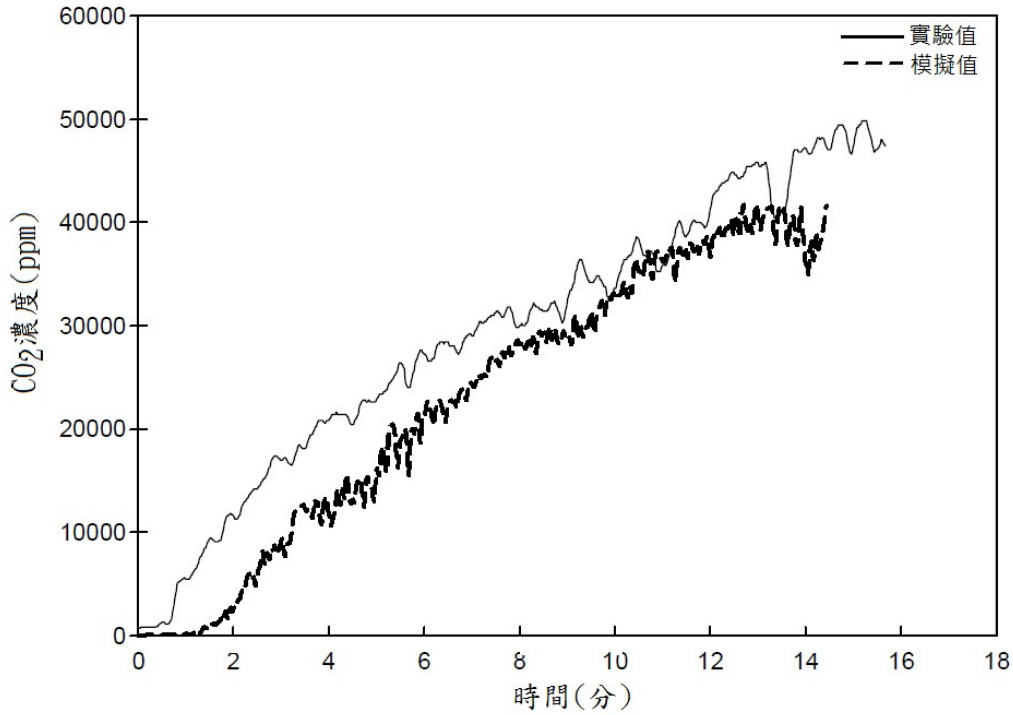


圖 4-4 修正密閉陽台實驗值與模擬值 CO₂ 濃度比較圖

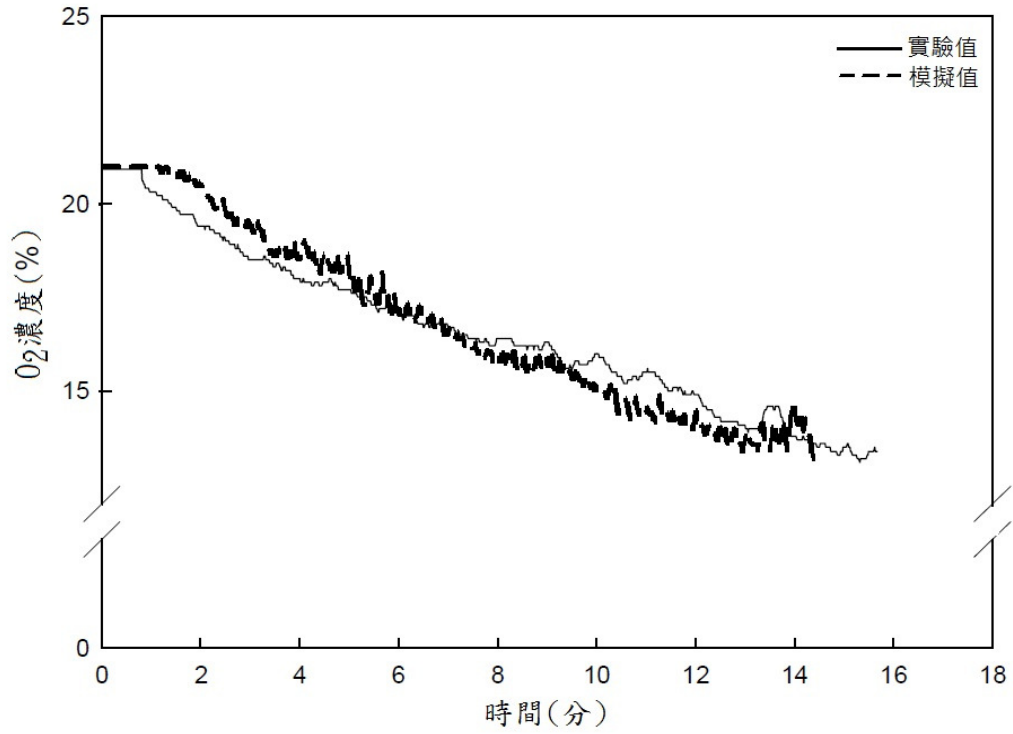


圖 4-5 修正密閉陽台實驗值與模擬值 O_2 濃度比較圖

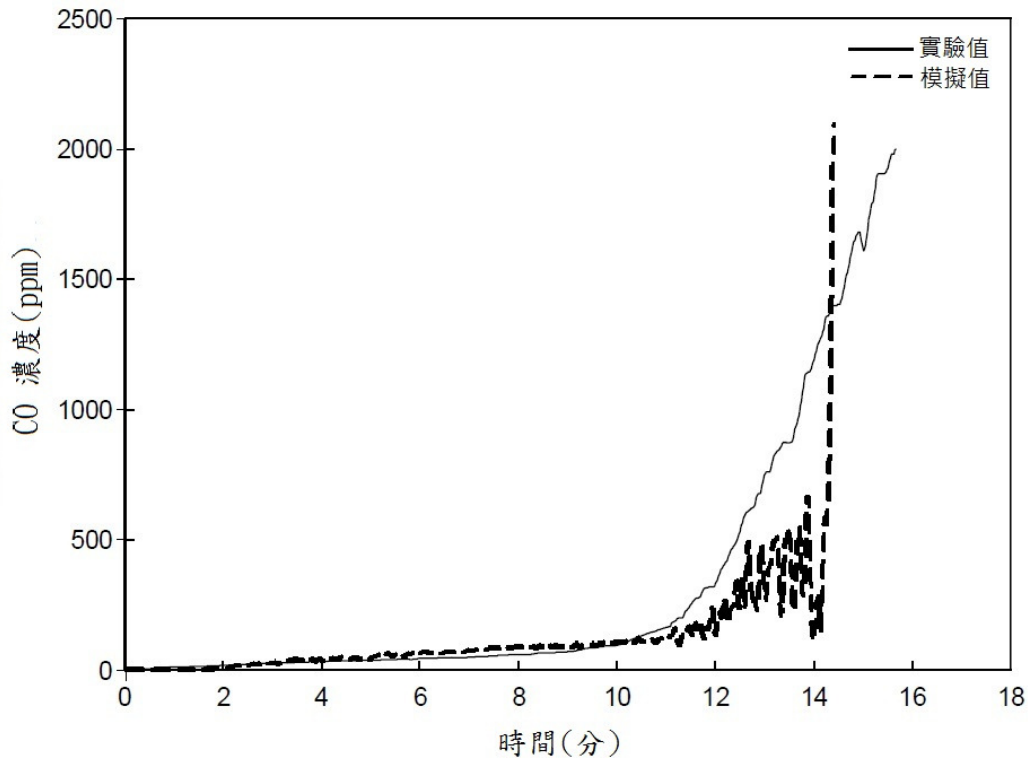
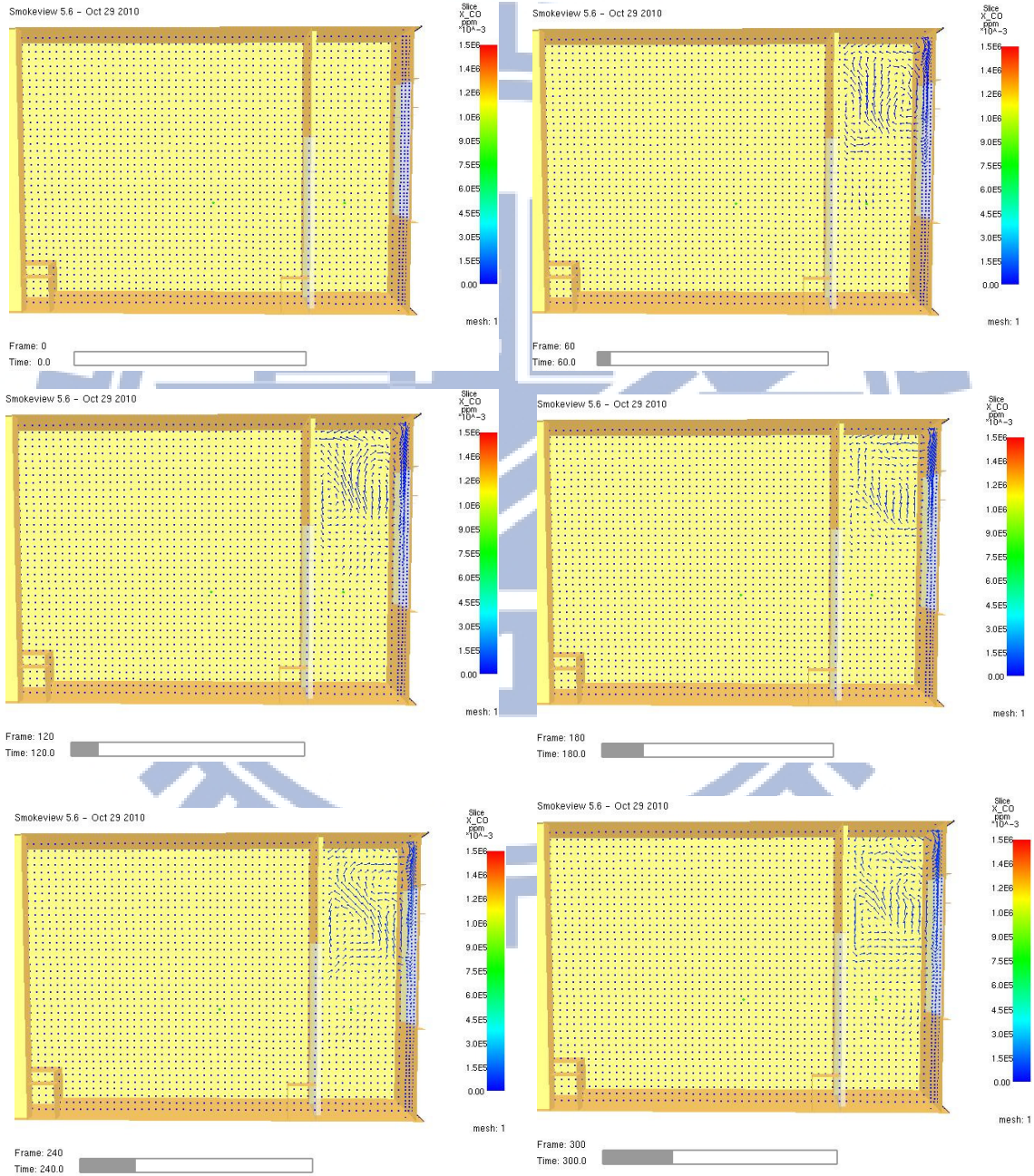


圖 4-6 修正密閉陽台實驗值與模擬值 CO 濃度比較圖

以 FDS 向量立面切片圖來看，從圖 4-7 中可發現當模擬時間在第 600 秒時，其 CO 濃度顏色明顯的轉為淡藍色，表示這時候的 CO 濃度已有明顯的增加，接下來的 4 分鐘內，陽台空間中 CO 濃度的變化較為快速，主要是受到 O₂ 濃度不足產生不完全燃燒的影響，而使 CO 濃度在 600 秒~840 秒中快速增加；從濃度向量圖中也可發現 CO 會往空間中較高的地方擴散蓄積，濃度變化也從高處產生蓄積後再往低處擴散。



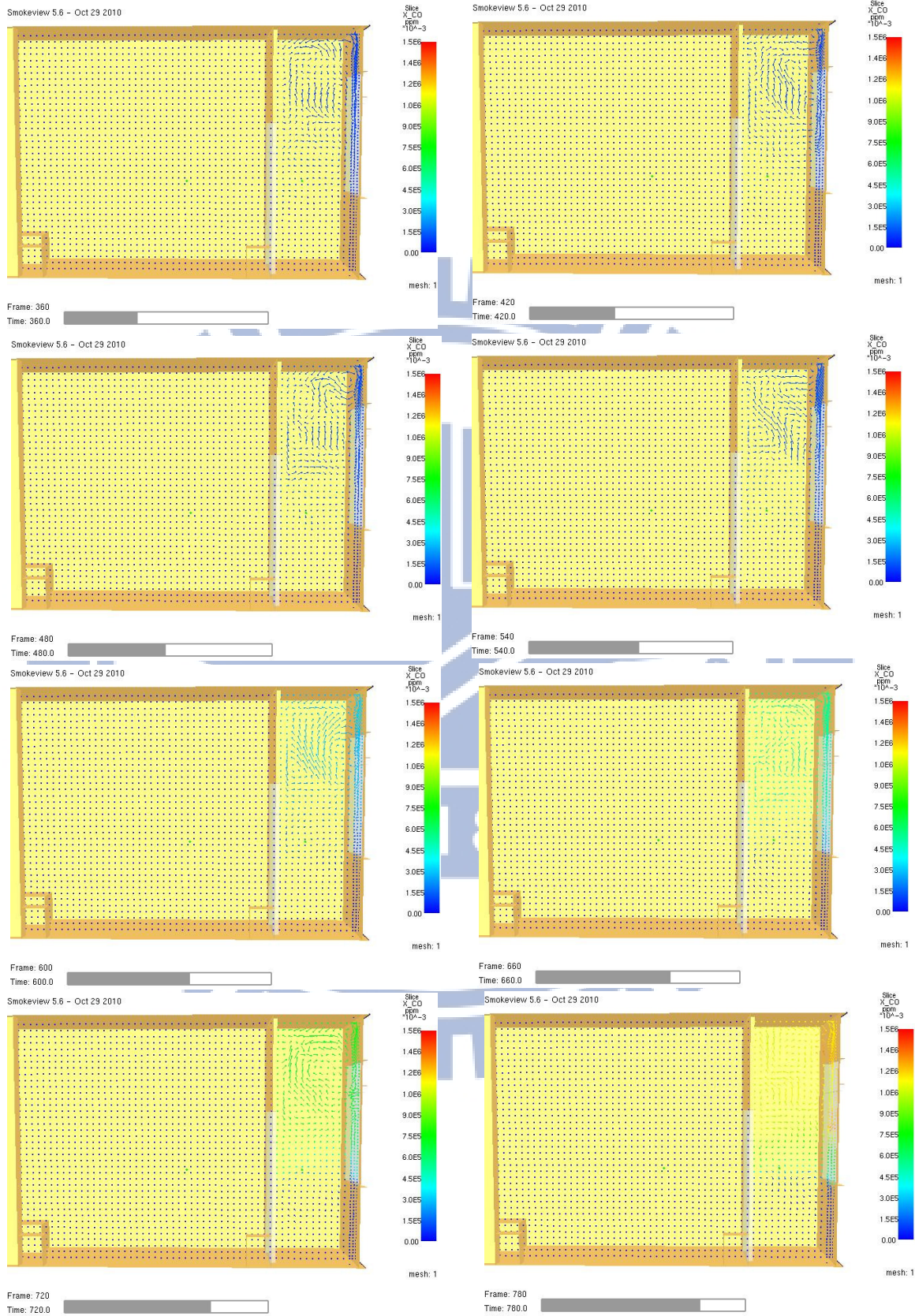


圖 4-7 模擬密閉陽台空間 CO 濃度向量立面切片圖 (共 14 幅)

4.1.3 陽台對內落地窗開啟情境模擬結果與實驗比對

本小節實驗情境主要是將密閉陽台通往室內之落地窗打開，觀察居室內部的 CO₂、O₂ 和 CO 氣體濃度曲線變化；本小節模擬情境與全尺寸實驗情境設定參數相同，並參考密閉陽台之修正模擬結果，同樣增加長 0.16m×寬 0.05m 的縫隙來模擬此情境。

此情境增加 78m³ 的內部居室空間，故其空間中的 O₂ 總量較陽台空間 14m³ 還要來的多；從圖 4-8 中可發現當時間在 23~58 分鐘時，模擬值之 CO 濃度都較實驗值還要來的低，而在 50 分鐘的時候有比較明顯的飆升，而對照圖 4-9 的 O₂ 濃度曲線圖，O₂ 濃度呈現一定的比例下降，而在 50 分鐘的時候低於 15%，故此時 CO 濃度會大量產生，此結果與前 2 小節相同，FDS 程式中當 O₂ 濃度低於 15% 時，CO 濃度因不完全燃燒而大量產生，而之後其 CO 濃度才會逐漸逼近實驗值，而陽台空間的 CO 及 O₂ 濃度則與室內空間相同，在 55 分鐘後才有明顯的上升（如圖 4-10、4-11）。

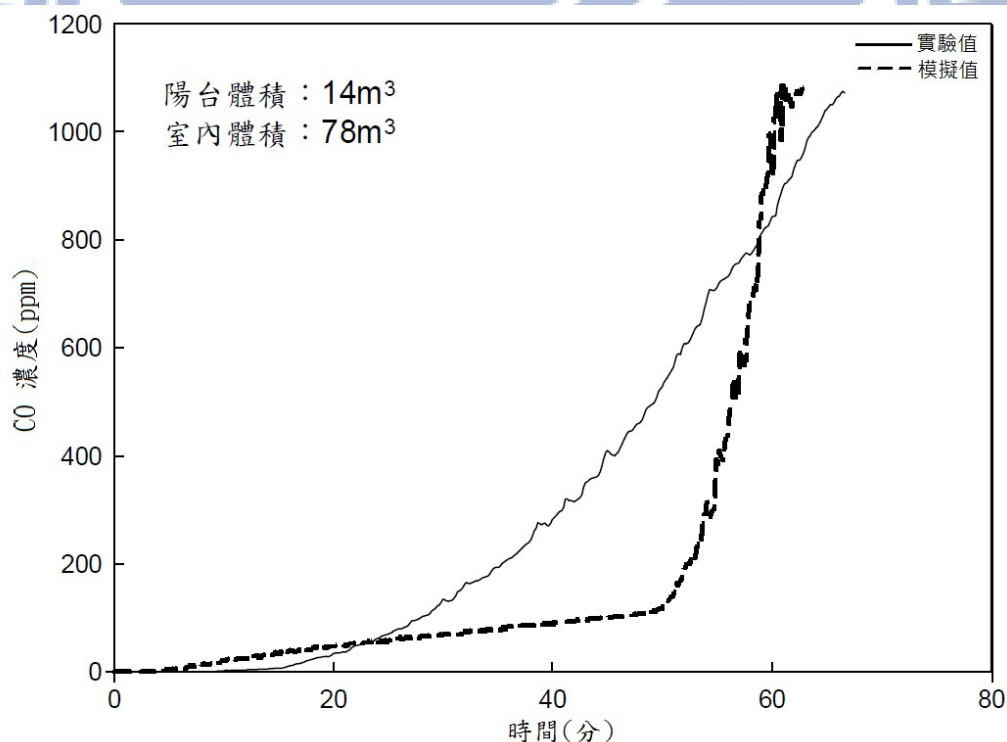


圖 4-8 陽台對內落地窗開啟情境之 CO 濃度比較圖（室內空間）

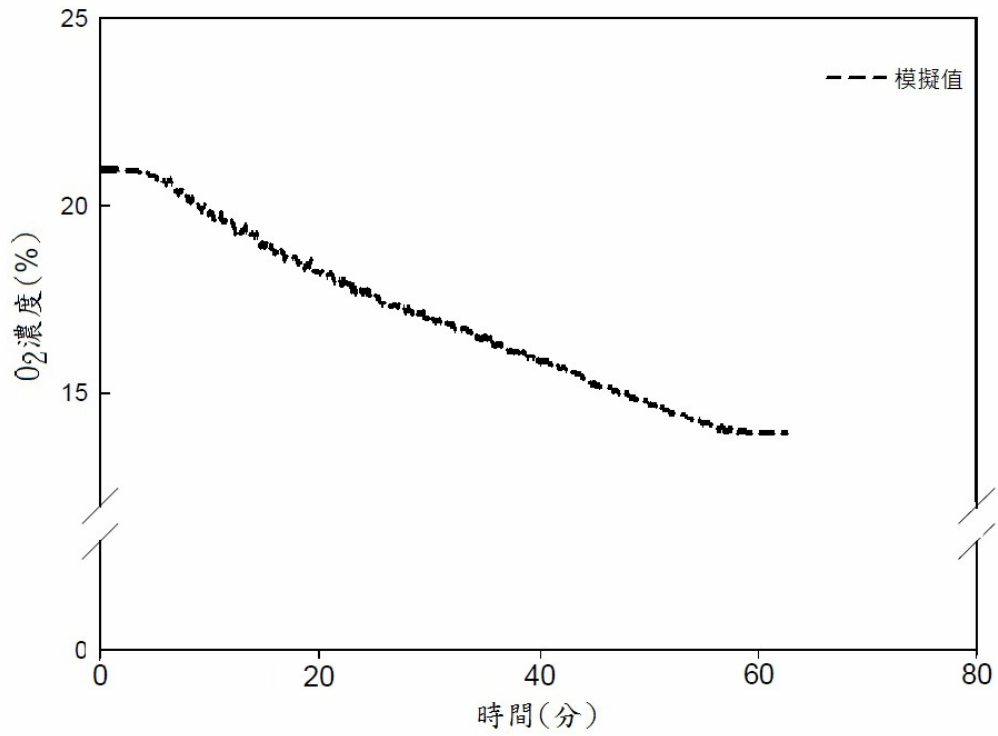


圖 4-9 陽台對內落地窗開啟情境之 O_2 濃度比較圖 (室內空間)

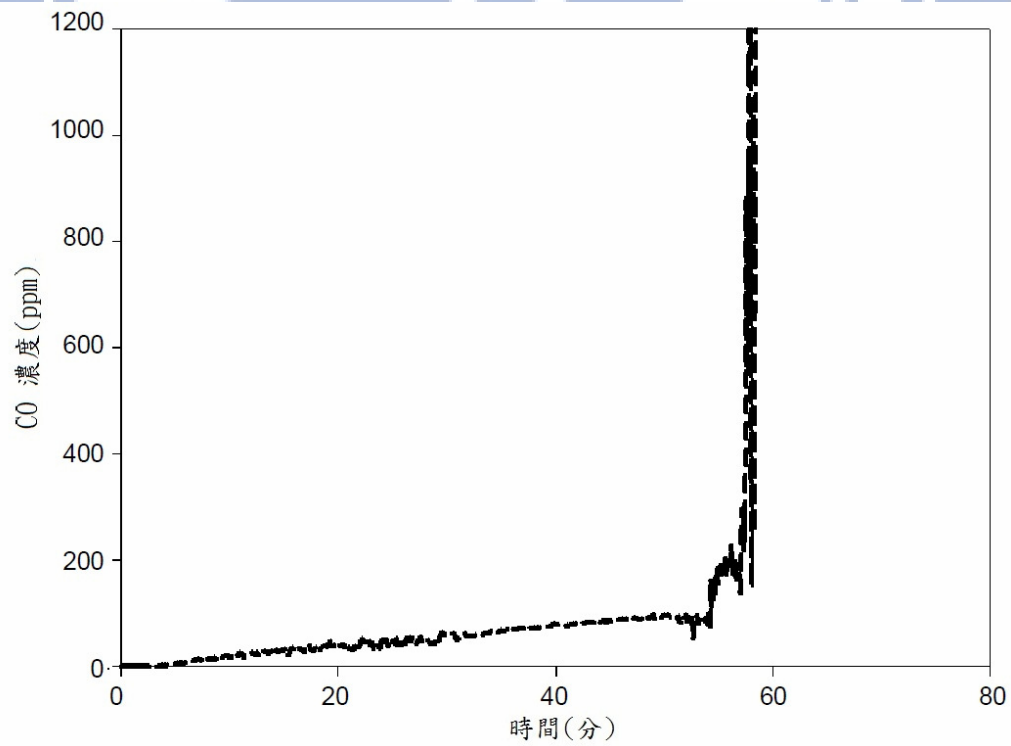


圖4-10 陽台對內落地窗開啟情境之CO濃度圖 (陽台空間模擬值)

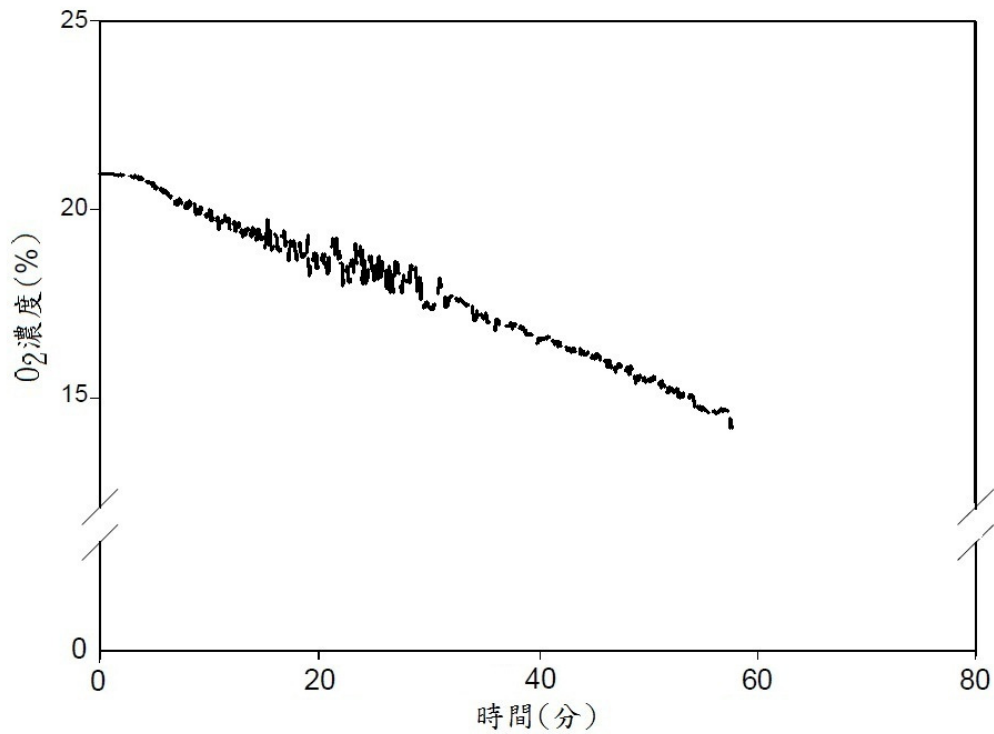
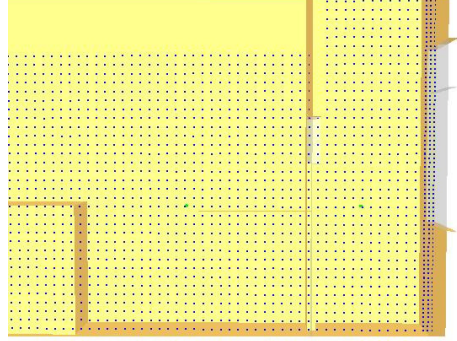


圖4-11 陽台對內落地窗開啟情境之O₂濃度圖（陽台空間模擬值）

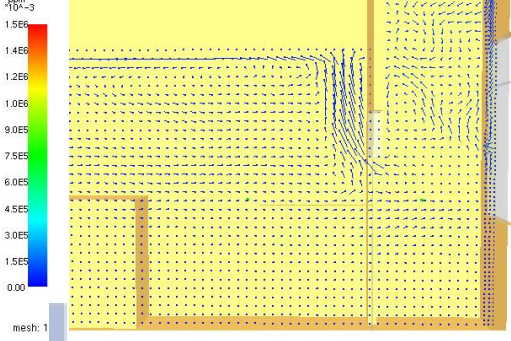
以FDS向量立面切片圖來看，從圖4-12中可發現當模擬時間在第2641.8秒（約第44分鐘）的時候，其CO濃度顏色明顯的轉為淡藍色，表示這時候的CO濃度已有明顯的增加，因陽台空間之O₂濃度持續下降，陽台空間中CO濃度快速上升，並往室內空間擴散（第3120.6秒），隨著時間演進，整個空間的CO濃度均往上飆升。

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



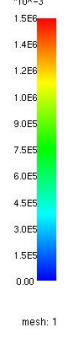
Frame: 0
Time: 0.0

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



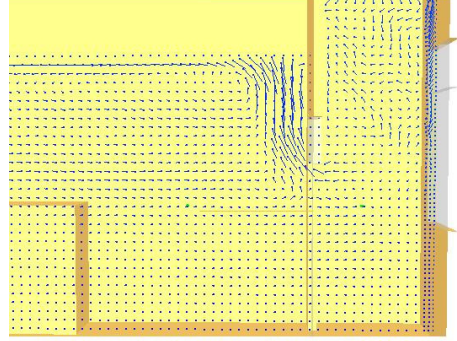
Frame: 143
Time: 600.6

Slice X_CO ppm 10^-3



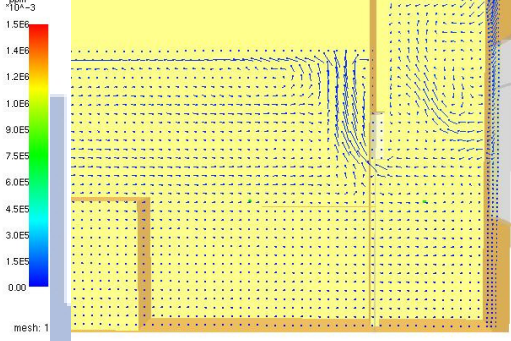
mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



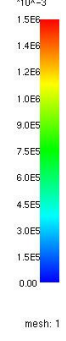
Frame: 257
Time: 1079.4

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



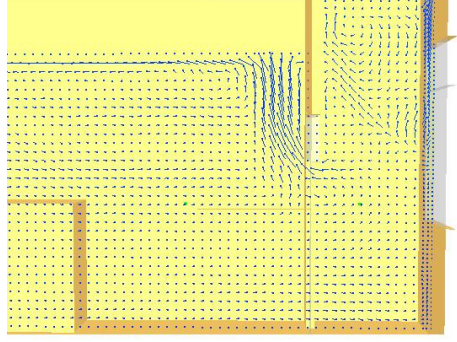
Frame: 314
Time: 1318.8

Slice X_CO ppm 10^-3



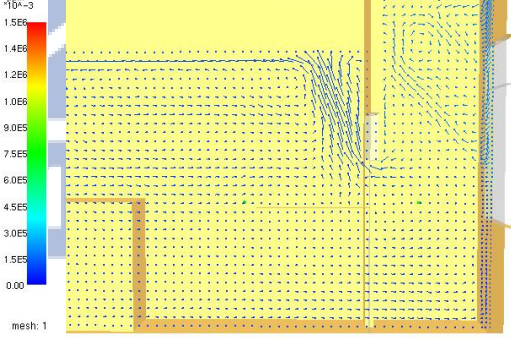
mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 486
Time: 2041.2

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



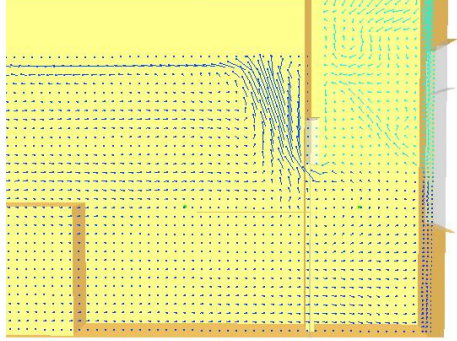
Frame: 543
Time: 2260.6

Slice X_CO ppm 10^-3



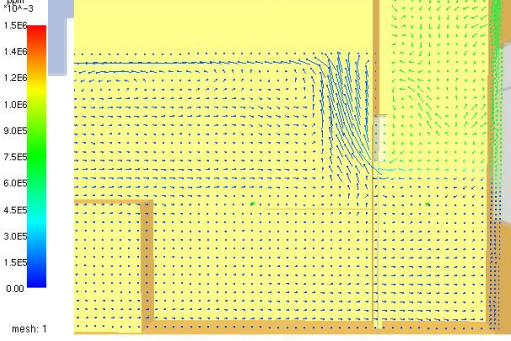
mesh: 1

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 629
Time: 2641.8

Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



Frame: 606
Time: 2881.2

Slice X_CO ppm 10^-3



mesh: 1

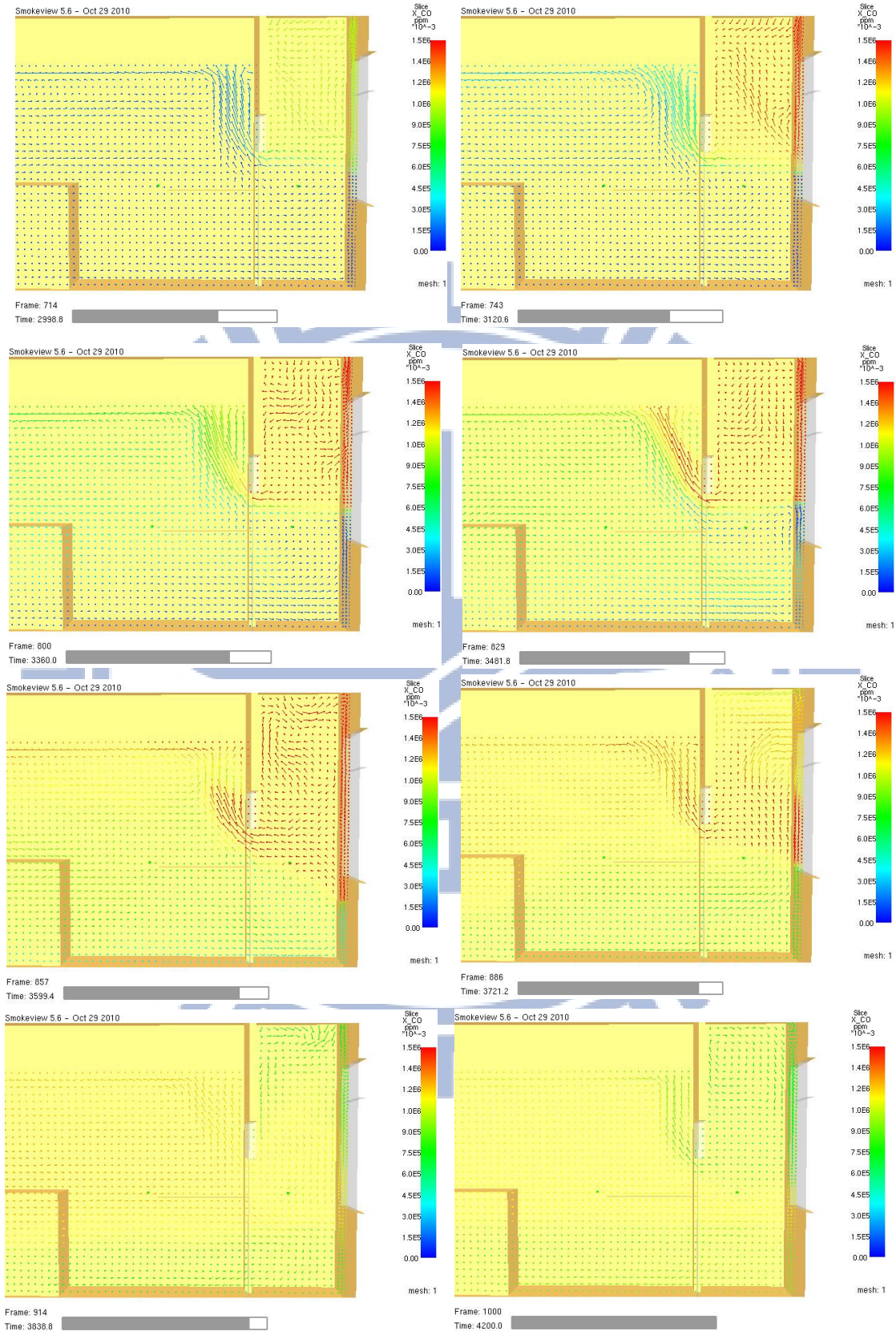


圖4-12 模擬陽台對內落地窗開啟情境CO濃度立面切片圖（共16幅）

4.1.4 強制通風情境模擬結果與實驗比對

上述 2 個情境主要是探討外氣密閉時，熱水器在內部陽台與居室長時間燃燒下，其對空間之影響，而本小節則是在陽台對外窗戶開口處增加風扇，模擬外氣強制通風的環境，觀察如窗戶開啟的狀態下，遇到吹入室內的外氣時，陽台內 CO 濃度值之變化。

本小節依照實驗所給予的參數來做為模擬之參數設定，陽台空間 14m^3 、室內空間 78m^3 ，其強制進氣風速為 0.9m/s ，因考量風扇實際進氣與估測值之誤差，故將風扇風速乘以 0.9 ，而採用 0.8m/s 來做為模擬之風扇風速值。

從圖 4-13 之 CO 濃度圖可發現，強制通風的情境下，由於外氣強制進氣使得 O_2 濃度得以補充，故 CO 濃度值都較密閉空間情境還要來的低很多（模擬值最高僅有 120PPM ），將圖 4-14 與圖 4-9 來做比較，強制通風情境下 O_2 濃度曲線下降趨勢較為緩慢，且在外氣不斷補給的同時， O_2 濃度均高於 15% ，CO 濃度無明顯快速上升的現象，因此在強制通風的情境下， O_2 濃度的補給減緩不完全燃燒發生的時間，使室內空間內 CO 濃度值無明顯上升，空間內較為安全；而陽台空間內之因 O_2 不斷補給，CO 濃度曲線呈現平緩上升趨勢，且保持在低濃度狀態（如圖 4-15、4-16）。

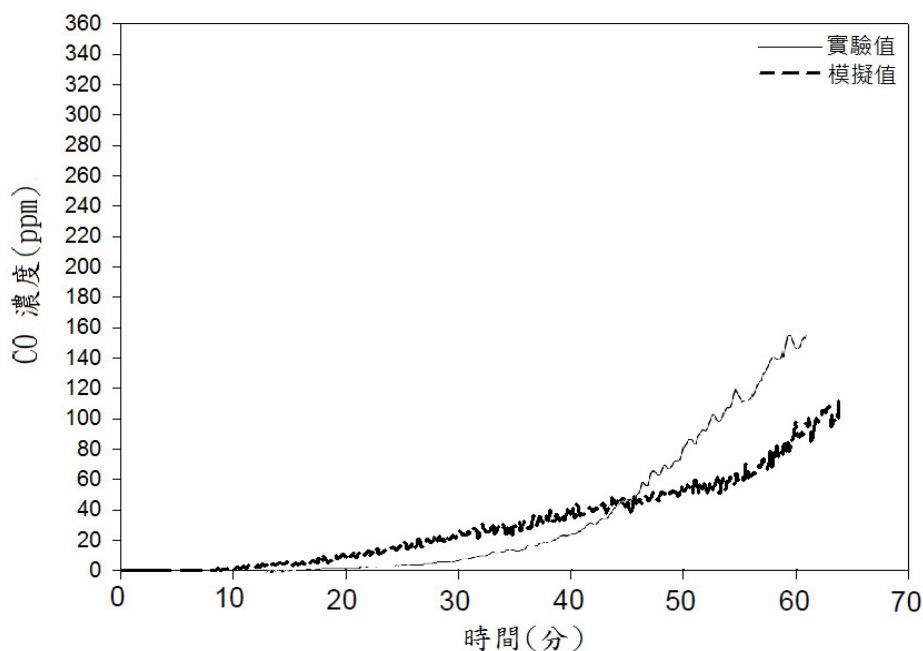


圖 4-13 強制通風情境之室內空間 CO 濃度比較圖

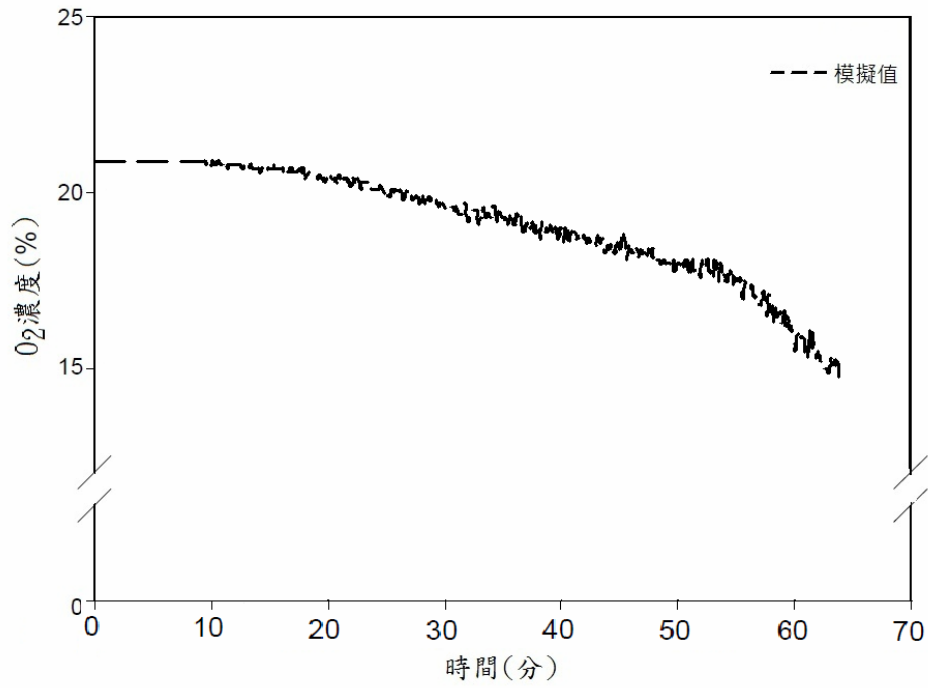


圖 4-14 強制通風情境之室內空間 O₂ 濃度比較圖

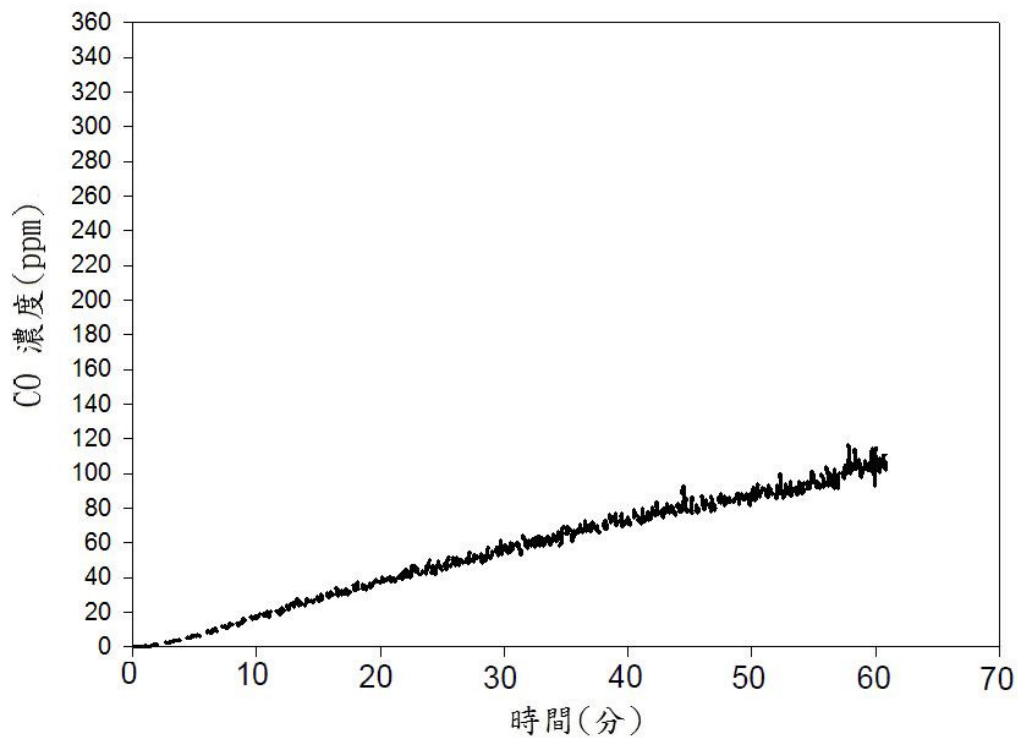


圖4-15 強制通風情境陽台之CO濃度圖 (陽台空間模擬值)

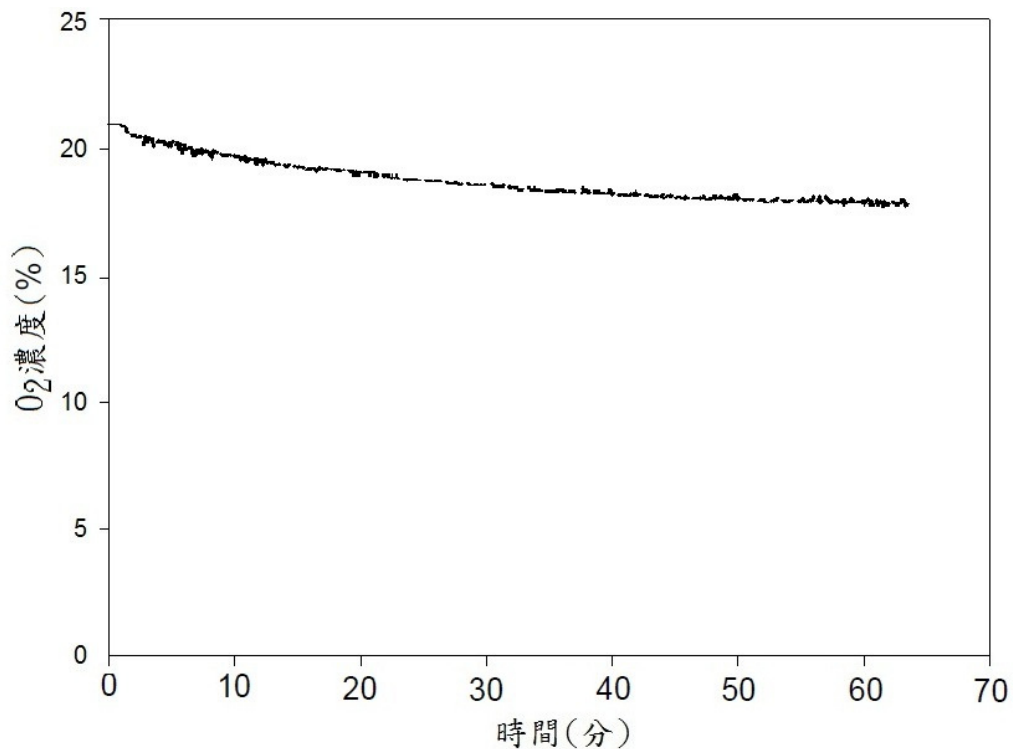
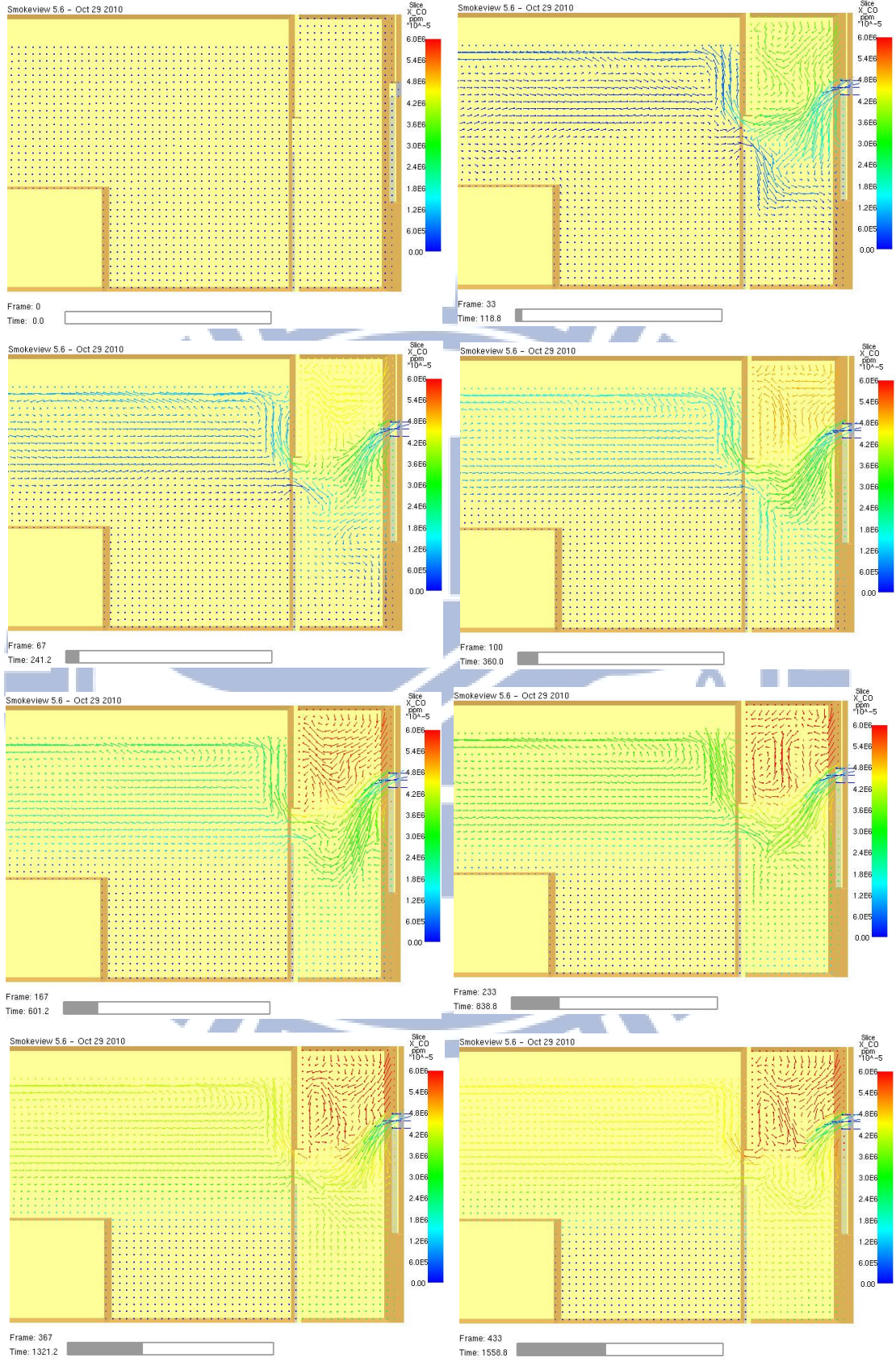


圖4-16 強制通風情境陽台之O₂濃度圖（陽台空間模擬值）

以FDS向量立面切片圖來看，從圖4-17中可發現當模擬時間在第838.8秒（約第14分鐘）的時候，其陽台CO濃度顏色明顯的轉為紅色，表示這時候的CO濃度已有明顯的上升，因強制通風口處可持續補O₂，通風口附近CO濃度始終較其他空間來得低許多，隨著時間演進，陽台產生之CO也擴散到室內空間，最後整個空間的CO濃度均往上飆升。



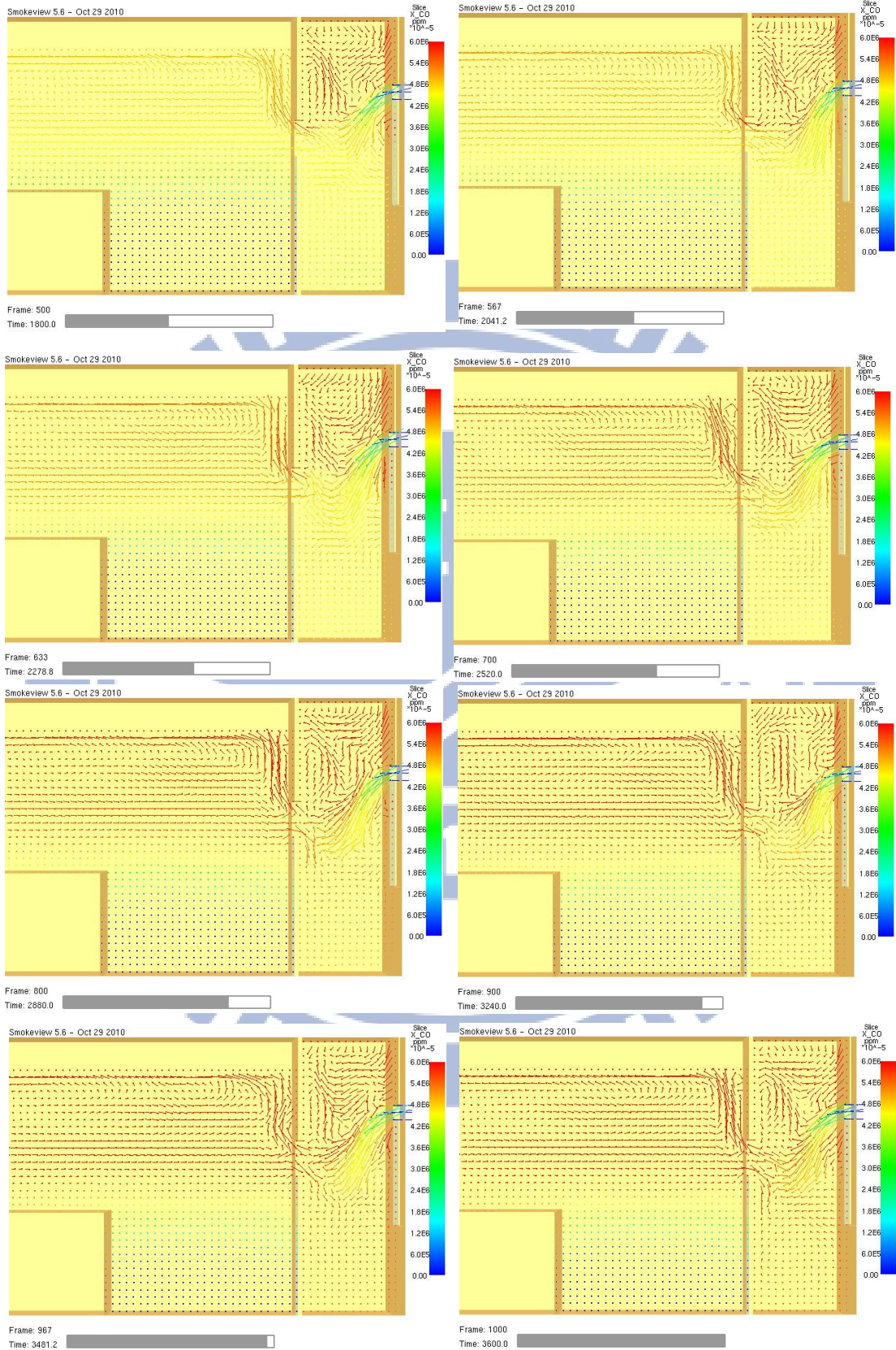


圖4-17 模擬強制通風情境CO濃度立面切片圖 (共16幅)

4.2 燃燒所需燃料之影響

本小節主要是探討模擬採用丁烷(C_4H_{10})來做為燃燒所需燃料之合理性，一般市面上瓦斯桶燃料都是丙烷與丁烷混合填充，其混合比例大約為1:1~3:7，本小節將以密閉陽台之情境，將燃料改為丙烷(C_3H_8)並加以比對，來驗證使用丁烷(C_4H_{10})來做為燃料是否合理。

不同燃料的 CO_2 、 O_2 和 CO 濃度曲線比較圖如圖4-18~圖4-20所示，可發現分別使用 C_4H_{10} 與 C_3H_8 來做為模擬的燃料，其各氣體之濃度曲線圖相當接近，因此本實驗使用 C_4H_{10} 來做為模擬燃料其結果會與一般市售瓦斯桶的混合氣體誤差極小，可忽略之。

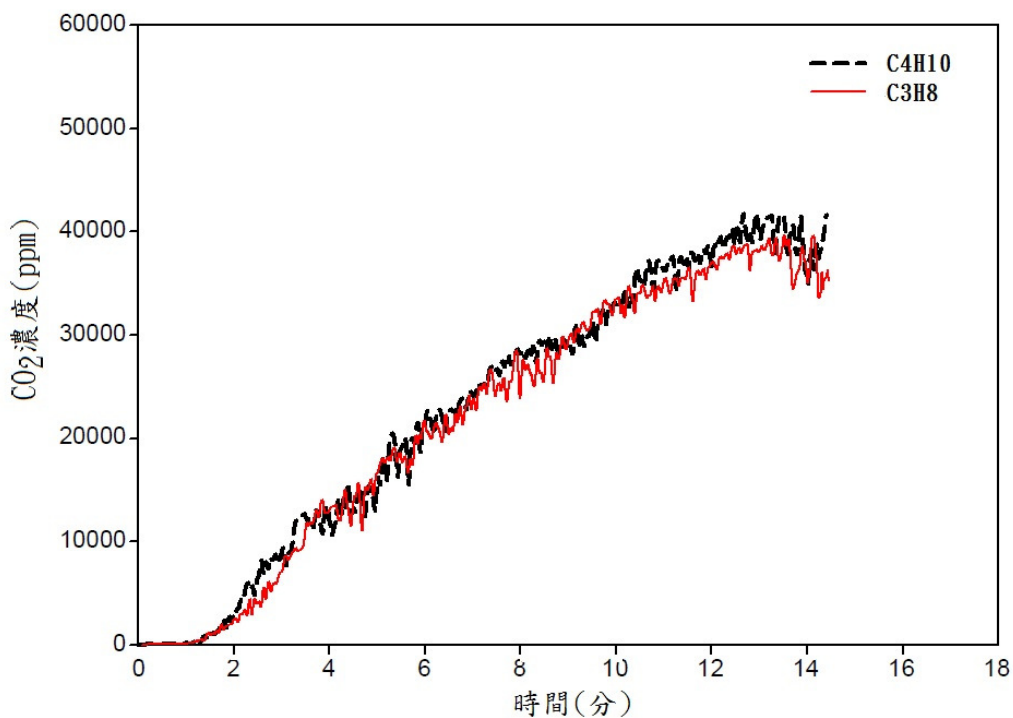


圖 4-18 不同燃料模擬之 CO_2 濃度比較圖

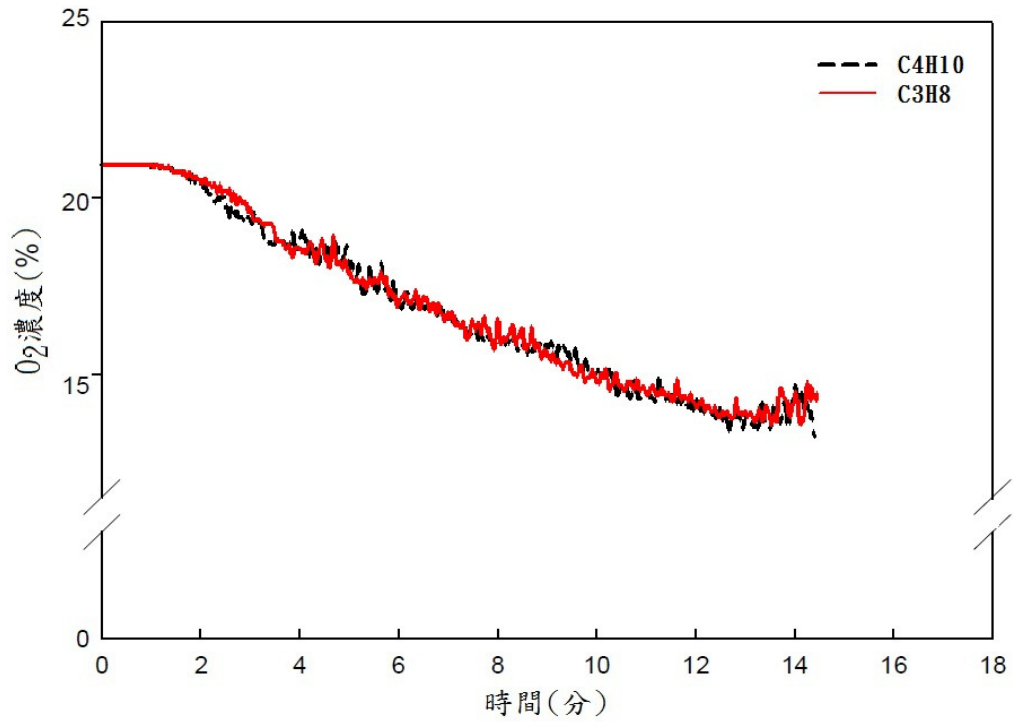


圖 4-19 不同燃料模擬之 O_2 濃度比較圖

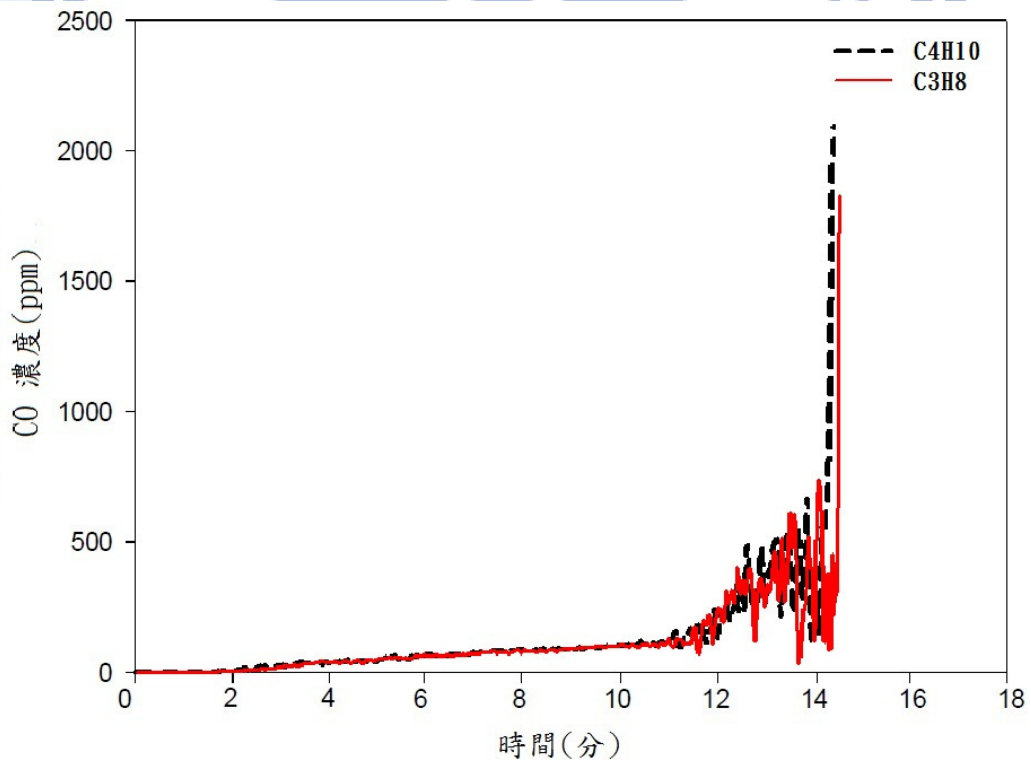


圖 4-20 不同燃料模擬之 CO 濃度比較圖

4.3 使用熱水器安全模式之探討

4.3.1 開窗面積對陽台空間安全之影響

從 4.1 各小節之研究探討中可發現，環境之密閉性對熱水器產生 CO 有很大的影響，本小節將探討不同對外開窗面積大小對於陽台空間內產生之 CO 濃度來做比較，試著找出可維持陽台空間安全之適當開窗面積。考慮一般市售之熱水器在正常使用下，連續使用 20 分鐘就會啟動安全裝置，阻斷瓦斯的供給，以降低意外發生，故本小節模擬時間設定為 20 分鐘，開啟陽台空間的小窗戶，其窗戶高度為 0.5m，模擬開窗寬度分別為 0.05m、0.1m、0.15m、0.2m、0.25m、0.3m、0.35m 及 0.4m 等 8 種。

圖 4-21 為開啟不同大小窗戶所產生之 CO 濃度比較圖，可發現到當窗戶開啟的面積愈大時，其 CO 濃度超過 1,000PPM 的時間就愈晚發生，而當開窗大小超過 0.3m 時，陽台空間內之 CO 濃度值均在 150PPM 下，則該空間在 20 分鐘內均屬於安全範圍，主要是因為窗戶開啟愈大時， O_2 的補給量就愈多， O_2 濃度低於 15% 的時間就愈晚(如圖 4-22 所示)，因此當開窗寬度超過 0.3m 時， O_2 濃度始終高於 15%，使陽台空間未因不完全燃燒而產生大量 CO。

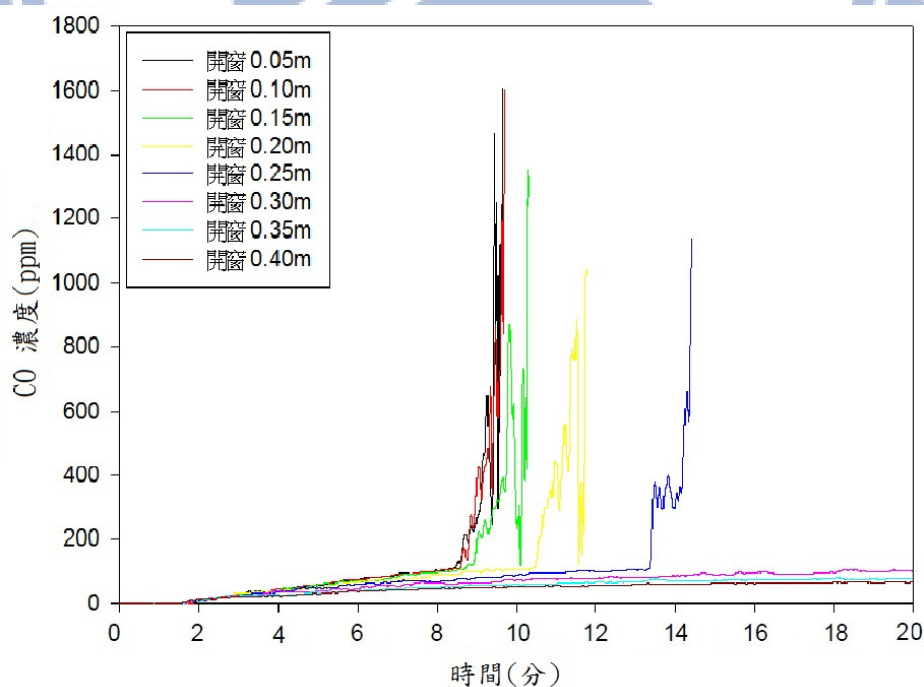


圖 4-21 開窗大小之 CO 濃度比較圖

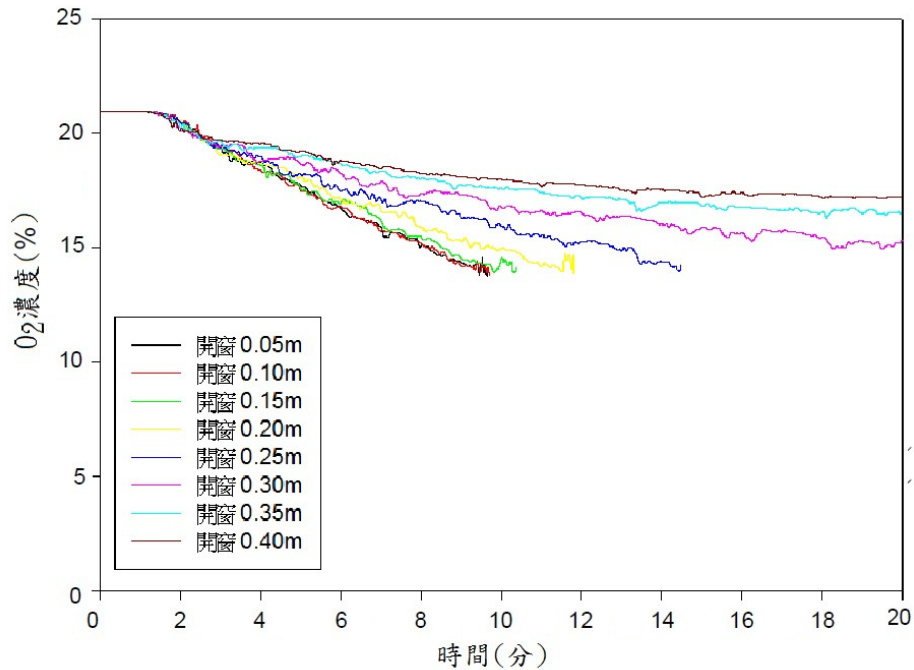


圖 4-22 開窗大小 O₂ 濃度比較圖

4.3.2 外氣風速對陽台空間安全之影響

4.3.1 小節中所探討的開窗情境，是假設在無外氣風速的自然通風下來探討其對陽台空間之影響，然而在一般正常的狀況下，隨著季節的不同會伴隨著不同的外氣風速，因此本小節假設以不同風速之自然風，由對外窗戶往陽台內部進氣，考慮開窗寬度在 0.2m 的情境下（仍屬危險狀態下），外氣風速在 0m/s、0.5m/s 及 0.9m/s 其對陽台內部 CO 濃度之影響。

從圖 4-23 中可發現在外氣風速不同的情境下，風速愈大則 CO 濃度愈低，因為在自然通風的情境中（風速為 0），外氣並非強制進入，故 O₂ 補給量遠小於在相同開窗面積下外氣風速 0.5m/s 及 0.9m/s 的補給量，因此 O₂ 濃度隨時間而降至 15% 以下，進而產生不完全燃燒使 CO 大量產生，其 O₂ 濃度曲線圖如圖 4-24 所示，相對而言，在外氣風速 0.5m/s 及 0.9m/s 的條件時，O₂ 濃度始終維持在 20% 上下，呈現平穩的狀態，也因此 O₂ 濃度充足下，並不會產生大量 CO。故由本小節得知在相同的開窗大小條件下，可發現在有外氣往陽台內部進入時，會因 O₂ 的補給而使得陽台空間較為安全，且風速越大所產生之 CO 濃度值越低，空間越安全。

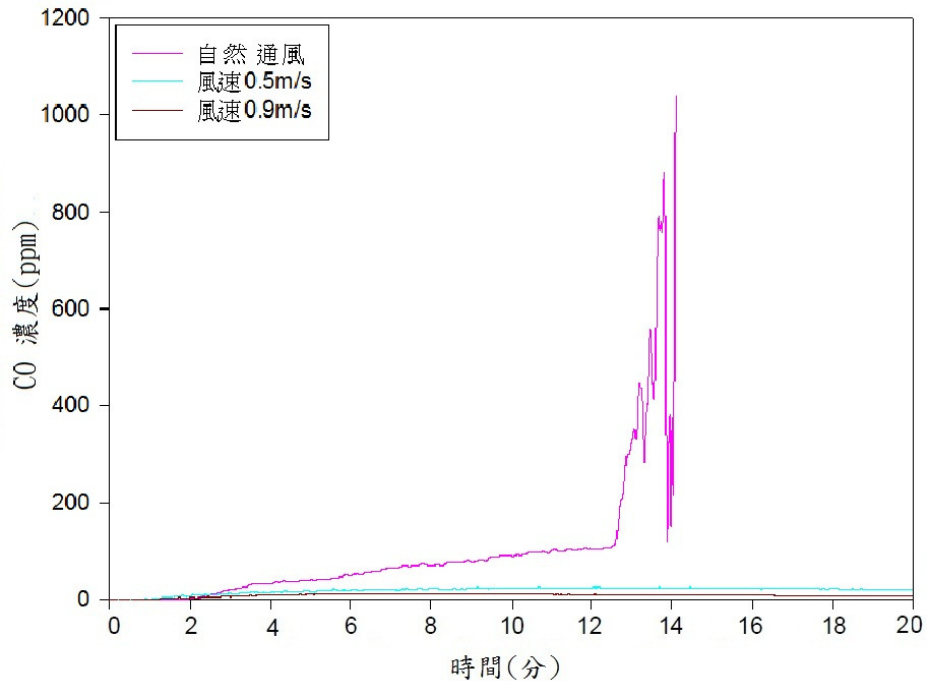


圖 4-23 風速大小之 CO 濃度比較圖

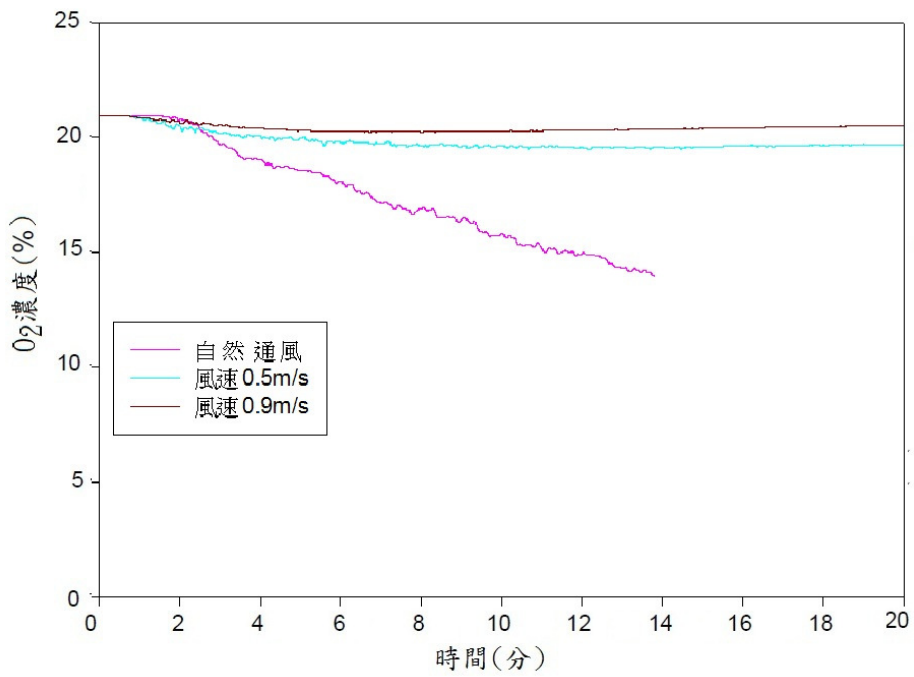


圖 4-24 風速大小之 O₂ 濃度比較圖

4.3.3 熱水器型號對陽台空間安全之影響

在 4.3.1 小節中可得知，當使用 10L 的瓦斯熱水器時，高 0.5m 的窗戶至少要開啟 0.3m 以上，然而在一般市售的家用瓦斯熱水器中，除了本模擬所使用的 10L 瓦斯熱水器外，尚有 12L 及 16L 的瓦斯熱水器，其熱釋放率分別為 26.1KW 和 33.1KW，因此本小節將探討在 14m³ 的陽台空間之下，不同瓦斯熱水器是否需要較大的開窗面積，始可保持陽台空間安全。

本模擬採無外氣風速狀態下進行實驗，在 4.3.1 小節中可得知原本在窗戶開啟 0.3m 時，10L 的瓦斯熱水器是屬於安全的，而當 12L (26.1KW) 的瓦斯熱水器在一樣的條件下卻是危險的 (如圖 4-25)，主要是因為 12L 的瓦斯熱水器熱釋放率較高，需要較多的 O₂ 來做為燃燒使用，因此原本 0.3m 的窗戶開啟大小無法供應足夠的 O₂ 以供燃燒使用，故使用 12L 的瓦斯熱水器時，其開窗大小須達到 0.35m 以上，才能確保在 20 分鐘內使用熱水器是安全的。

由圖 4-26 之曲線中同樣可發現當熱釋放率變大時，其開窗面積需愈大，以確保空間不會產生大量 CO，故使用 16L (33.1KW) 的瓦斯熱水器時，其開窗大小須達到 0.4m 以上，才能確保在 20 分鐘內使用熱水器是安全的。

綜上所述，在陽台空間 14m³ 時，10L、12L 和 16L 的瓦斯熱水器，其所需的開窗大小分別為 0.30m、0.35m 和 0.40m (窗高 0.5m)，才能確保在 20 分鐘內使用熱水器是安全的，熱釋放率越高，相對開窗面積應越大，方可確保空間之安全。

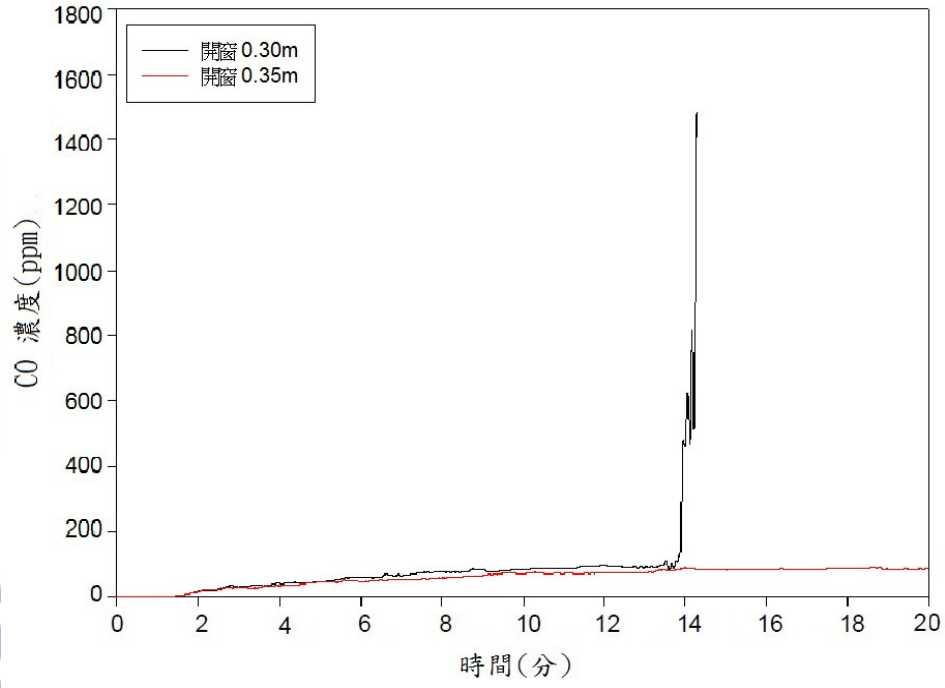


圖 4-25 陽台空間開窗大小之 CO 濃度比較圖 (12L 熱水器)

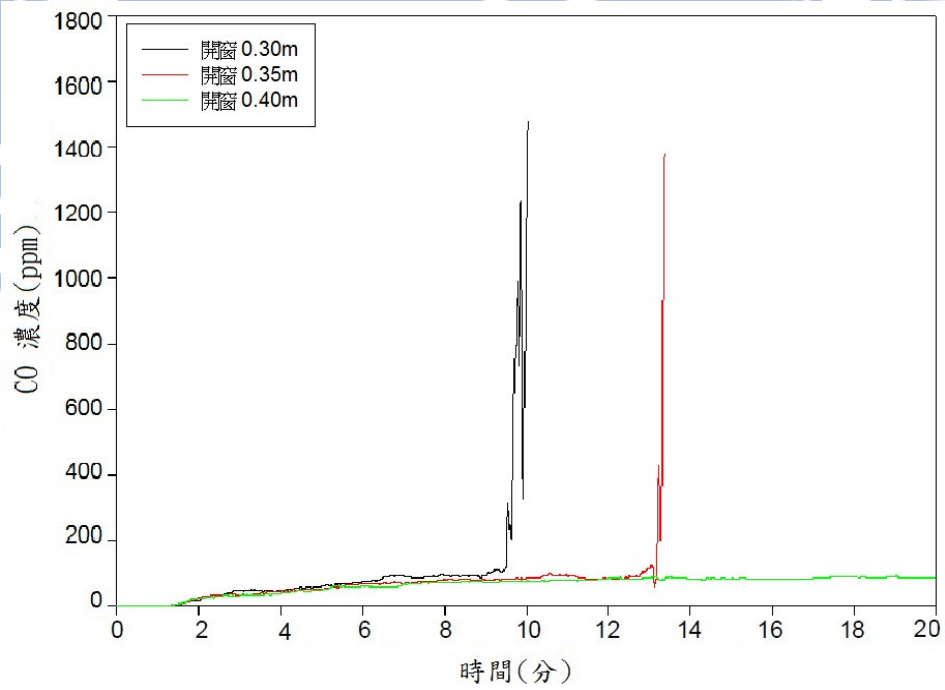


圖4-26 陽台空間開窗大小之CO濃度比較圖 (16L熱水器)

4.3.4 小結

由 4.3.1~4.3.3 小節之各種模擬實驗中，可歸納出以下幾點，提供安全使用瓦斯熱水器之建議：

1. 因陽台晾曬衣物可能影響空間內氣體流動情形，故本實驗以陽台未晾曬衣物為前提建構模型。
2. 本實驗所採陽台空間 14m^3 為單人宿舍之尺寸，一般住家之陽台空間應大於此規格，陽台空間越大， O_2 越充足，空間越安全。
3. 在無風狀態下，陽台空間補 O_2 率最低，由對外窗戶往陽台內部進氣之風速越高，補 O_2 率越高，空間越安全。
4. 使用瓦斯熱水器之公升數越高，熱釋放率越高，因此開窗面積應加大以增加補 O_2 率，增加所需 O_2 濃度以維持空間之安全。
5. 陽台與室內相通之門窗應於使用時將之關閉，以避免產生之 CO 擴散至室內對人員產生危害。

總和以上所述，在陽台未晾曬衣物為前提下，提出安全使用瓦斯熱水器之建議為：在陽台空間大（等）於 14m^3 ，使用瓦斯熱水器規格小（等）於 16L (33.1KW)，關閉陽台與室內相通門窗之環境下，將陽台對外窗開啟 $0.5\text{m}\times 0.4\text{m}=0.2\text{m}^2$ 以上時，即可保持室內空間之人員安全。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本論文參考勞研所於 95 年 12 月所發表之「陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究」，模擬建構瓦斯熱水器於不同情境下於陽台使用時之一氧化碳累積情況，經由 FDS 電腦模擬的結果可以發現以下幾點結論：

1. 利用 FDS 模擬密閉空間情境時，須考慮其實驗環境是否為完全密閉的狀態，適時設定縫隙來符合實際實驗空間之現況，如此可使模擬所得數據具有可信度。
2. 在 FDS 內建程式中，CO 是燃燒不完全所產生的產物，因此當 O₂ 濃度低於 15% 時才會大量產出，所以 CO 濃度的曲線圖在 O₂ 濃度低於 15% 時才会有明顯上升的趨勢，O₂ 濃度再降低，CO 濃度就會有急遽上升的現象出現。
3. 透過模擬強制通風的情境可得知，空間內因有 O₂ 的補給，減緩發生不完全燃燒的時間，使空間內 CO 濃度值無明顯上升，空間內較為安全。
4. 在有外氣進入的情況下，熱水器所在陽台空間之危險性較自然通風（無外氣進入）安全，故可利用自然通風（無外氣）的情境來探討熱水器所在環境的安全性。
5. 在陽台未晾曬衣物為前提下，提出安全使用瓦斯熱水器之建議為：在陽台空間大（等）於 14m³，使用瓦斯熱水器規格小（等）於 16L（33.1KW），關閉陽台與室內相通門窗之環境下，將陽台對外窗開啟 0.5m×0.4m=0.2m² 以上時，即可保持室內空間之人員安全。

5.2 建議

依據本研究結果，針對現行防制一氧化碳中毒措施提出建議如下：

1. 法規面：

(1) 燃氣熱水器承裝業管理制度部分：

I. 因目前市面仍有部分水電或廚具業者未申請合格燃氣熱水器承裝業，且以低價競爭方式排擠合法同業，建議將現行燃氣熱水器承裝業登記制改採許可制，並加重相關罰則，以落實承裝業管理制度。

II. 另針對 94 年燃氣熱水器承裝業管理法規施行以前，既設場所及

一般住宅不易要求改善之執行問題，於該房屋租賃買賣時，加強要求應點檢燃氣熱水器安裝之正確性。

(2) 建築法令部分：

- I. 因應台北縣永和市恆豐大樓案例，建議將大樓管道間與管道出口增列至建築物公共安全檢查簽證申報項目，宣導設置管道間強制排氣設備或逆止閥門，並加強管理委員會之自主檢查。

2. 政策面：

(1) 熱水器遷移或更新補助執行措施部分：

- I. 目前政府每年均編列預算針對裝設不合規定之熱水器家戶補助遷移或更新熱水器，每戶補助上限為新台幣3,000元整，相較市售之FE型（強制排氣型）熱水器含安裝售價最低約新台幣9,000元整，尚有6,000元以上之差距，造成民眾意願不高，建議可增加補助金額或與熱水器製造商協商降低售價，以提高民眾更換意願。

- II. 因補助政策自97年起即已推行，目前民眾申請案量有遞減趨勢，且多是家中熱水器已經故障才提出申請，顯見民眾無自行檢視熱水器安全的行為，建議應再加強宣導補助專案，並提醒民眾自我檢視。

3. 實驗設計面：

- (1) 本研究採用液化石油氣（LPG）為熱水器燃料，分析一氧化碳中毒案例，採天然氣（NG）為燃料之熱水器亦不在少數，建議後續研究者可改採天然氣（NG）為燃料進行模擬，可探討兩者之間差異性。

鑑於目前台灣民眾普遍使用不合規定之熱水器型式，有效預防一氧化碳中毒之最好方式，仍以民眾自發性採取防範中毒措施為主。然而，為避免民眾一時的疏失造成永久的遺憾，政府單位仍應持續加強宣導、教育或予以補助，讓民眾願意主動採取防範措施，而透過模擬實驗可得到相當寶貴的資料以作為防制一氧化碳中毒政策的參考，讓民眾的居家安全獲得保障，住家才能真正安全無虞。

參 考 文 獻

- [1] 呂博弘、陳春萬、張振平，「陽台通風影響瓦斯熱水器一氧化碳累積之研究」，勞工安全衛生研究季刊，第 14 卷第 4 期，第 299~307 頁，民國 95 年 12 月。
- [2] Forbes WH, Sargent F, Roughton FJW. Rate of carbon monoxide uptake bt normal men. *Am J Physiol* 1945; 143: 594-608.
- [3] Rodkey F, O'Neal J, Collision H. Relative affinity of hemoglobin S and hemoglobin A for carbon monoxide and oxygen. *Clin Chem* 1974; 20: 83-4.
- [4] Roughton FJW, Darling RC. The effect of carbon monoxide on the oxyhemoglobin dissociation curve. *Am J Physiol* 1943; 141:17.
- [5] NFPA, Symptoms of CO poisoning, <http://www.nfpa.org/fire/2008>.
- [6] 張瑋如，「室內空間一氧化碳擴散現象之 CFD 研究」，國立台灣科技大學，博士論文，民國 99 年。
- [7] 李東昇，「公寓住宅火災模擬分析」，國立屏東科技大學，碩士論文，民國 98 年。
- [8] 蔡銘儒等，「以 FDS 模擬局限空間火災與實驗檢證之研究」，內政部建築研究所，民國 97 年。
- [9] 何明錦等，「住商複合建築物火災危險評估與防火避難安全對策之研究」，內政部建築研究所，民國 94 年。
- [10] 紀人豪等，「原有合法小規模旅館建築物防火避難改善方案之實驗驗證及電腦模擬分析」，內政部建築研究所，民國 99 年。
- [11] 王佩琪，「住宅一氧化碳中毒防範措施之評估」，國立台北科技大學，碩士論文，民國 98 年。
- [12] Health and Safety Executive (2009), Gas appliances-Get them checked Keep them safe, <http://www.hse.gov.uk/pubns/indg238.pdf>。
- [13] Health and Safety Executive (2002), 業主責任指引：1998 年氣體安全（安裝及使用）條例，<http://www.hse.gov.uk/pubns/chinese/indg285.pdf>。
- [14] Centers for Disease Control and Prevention (2009), Prevent Carbon Monoxide Poisoning: The Quiet Killer, <http://www.cdc.gov/Features/COpoisoning/>。

- [15] National Conference of State Legislatures (2009), Carbon Monoxide Detectors-State Statutes, <http://www.ncsl.org/default.aspx?tabid=13238>。
- [16] 機電工程署氣體安全標準事務處(2000), 無煙道式氣體熱水爐及其他氣體熱水爐, 2000年3月27日立法會CB(1)1228/99-00(05)號文件, http://www.legco.gov.hk/yr99-00/chinese/panels/es/papers/es_f.htm。
- [17] 機電工程署(2002), 新聞公報—正確使用無煙道式熱水爐, http://www.emsd.gov.hk/emsd/chi/wnew/wn_n_gas_flue.shtml。
- [18] 簡賢文、高惠瑜, 「火災模擬軟體的區域模式分類」, 消防與防災科技雜誌, 第22期, 第87~91頁, 民國94年。
- [19] 馮玉明, 「火災危害分析」, 行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告, 民國96年。
- [20] 張文政, 「桃園縣中壢大同路民宅火災模擬」, 元智大學, 碩士論文, 民國96年。
- [21] McGrattan, K.B., Hamins, A.N., 2002, Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, NIST, 2001, Fire Research Division Building and Fire Research Laboratory.
- [22] National Institute of Standards and Technology, 2005, User's Guide for Smokeview, Version 4—A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data.
- [23] McGrattan, K.B., et al., 2002, Fire Dynamics Simulator (Version 3)-User's Guide.