

國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系

防災與環境資源工程組

碩士論文

MS in Disaster Prevention and Environmental Resources Engineering

Department of Safety, Health and Environmental Engineering

National Yunlin University of Science & Technology

Master Thesis

以縮小模型驗證氣簾阻煙並應用於建築物火災之探討

Validating Air Curtain as a Smoke Barrier via the Reduced

Model and Studying its Application in a Building Fire



陳忠凱

Zhong-Kai Chen

指導教授：易逸波 博士

Advisor: Yet-Pole I, Ph.D.

中華民國 105 年 6 月

June 2016

國立雲林科技大學
研究所碩士班學位論文考試委員會審定書

本論文係陳忠凱君在本校 環境與安全衛生工程系提論文「以縮小模型驗證氣簾阻煙並應用於建築物火災之探討」合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可，特此證明。

口試委員：

易逸波

易逸波

劉永銓

劉永銓

何三平

何三平

指導教授：

易逸波

易逸波

所長：

林啟文

中華民國 105 年 7 月 25 日

摘要

本研究使用美國國家標準暨技術研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 所研發的火災動態模擬器 (Fire Dynamics Simulator, FDS) 軟體來進行火災煙控的模擬以及本實驗所開發之火災整合式縮小模型實驗系統 (Fire's Integrated Reduce-model Experimental System, FIRES) 對於 Arduino 單晶片微控制器、MAX6675 溫度感測模組、光敏電阻等軟體和硬體整合，以便應用於縮小模型的中央控制，利用一封閉式縮小尺度建築物進行火災實驗與 FDS 數值模擬，並修正實驗模型內部風速與 FDS 軟體之風速設定、氣簾設定及燃料設定參數等進行討論，隨後將縮小模型實驗與模擬結果進行比較討論，並參考法規設置建築物進排氣之設定，觀察比較 FDS 不同尺度模擬與實驗下煙流之變化。由研究結果顯示，經修改過進排氣風速後，FDS 小尺度模擬與實驗煙流趨勢相近，但在溫度數據上，全尺度明顯高於小尺度，在阻煙策略中添加阻煙氣簾，會因為氣簾氣流干擾加上模型不利擴散，使得煙氣無法順利排出，劣於原先阻煙策略之效果，自然排煙情形下，在裝設氣簾下在初期有較好的阻煙效果，且在通往梯間的門口可以維持較低的溫度，對於較短走廊仍需增設排煙設施；另外長走廊模型研究中氣簾在速度設置 17m/s 時雙氣簾優於單氣簾，同時單氣簾設置於樓梯間外側靠近走廊處又優於設置於樓梯間內側的單氣簾，在能見度及溫度上都有明顯下降，同時在雙氣簾風速綜合測試下，得到一設置臨界風速值 4 m/s 同時保持良好的阻煙效果；應用雙氣簾於各梯間中於高樓建築中，再搭配適當的排煙措施，能有效的阻止煙流進入梯間區域。

關鍵字：火災動態模擬器、縮小模型、福勞德模型、火災實驗、阻煙策略、通風、氣簾

ABSTRACT

This research employs the NIST (National Institute of Standards and Technology) developed software, FDS (Fire Dynamics Simulator) to simulate smoke control of a fire and the study employs previous designed FIRES (Fire's Integrated Reduce-model Experimental System), which includes different software and hardware such as Arduino microcontroller, MAX6675 temperature-sensing module, and photosensitive resistors in order to apply its central control function on a reduced model. The experiment is performed in a reduce-scale building model and is compared with the FDS simulation. During the study, the parameters of experimental fan speed, air curtain wind speed and fuel setting in the FDS are updated analytically; moreover, the simulation and the experimental results of the reduce scale model are compared with the simulation results of the full-scale model. The result from the study shows, after correcting the intake and exhaust wind speed, the small-scale FDS simulation and its experimental result have similar trend. However, temperature of the full-scale model is significantly higher than that of the small-scale model. For the case of natural ventilation, installation of an air curtain has a better smoke-barrier effect in the early stage and can maintain a lower temperature at the entrance of staircase. As for the short corridor, it still needs additional exhaust facilities. Another study for the long corridor model shows double air curtain is superior than single one while air curtain speed is set at 17 m/s. While a single air curtain set on the outer side of the staircase entrance, its performance is better than that of the inner side, the visibility and temperature has decreased. During the integrated test double air curtain, a critical wind speed of 4 m/s can still maintain good smoke barrier effect. While apply this double air curtain in a high-rise building with suitable smoke control measures it shows such combination can effectively prevent smoke entering the staircase area.

Keywords: Fire Dynamics Simulator (FDS), scale-model, Froude model, fire experiment, smoke control, ventilation, air curtain.

目錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
目錄	iii
表目錄	vii
圖目錄	ix
符號說明	xvi
第一章、緒論	1
1.1 研究緣起	1
1.2 研究動機與目的	2
1.3 研究流程	4
第二章、文獻回顧	6
2.1 高層建築及火災之概述	6
2.1.1 高層建築之定義	6
2.1.2 各國現有高層建築之概況	7
2.1.3 高層建築之特性	8
2.1.4 高層建築火災之危險性	10
2.1.5 高層煙層流動與蔓延性	11
2.1.6 火災的危害	16
2.1.7 火源設計	18
2.1.8 煙層控制與安全之判定原則	25
2.1.9 煙控系統設計	27
2.2 氣簾介紹及應用	33
2.2.1 氣簾的基本原理	34

2.2.2	氣簾種類	35
2.2.3	氣簾速度之影響	36
2.2.4	氣簾規格之介紹	38
2.2.5	氣簾之應用	38
第三章、研究方法		40
3.1	縮小模型尺度理論	40
3.1.1	無因次群之組合	40
3.1.2	福勞德模型 (Froude modeling)	44
3.1.3	熱釋放率	46
3.1.4	FDS 液態燃料熱釋放率的問題	47
3.1.5	FDS 液態燃料吸收係數	48
3.1.6	火燄高度	49
3.2	軟體介紹	50
3.2.1	FDS 軟體	50
3.2.2	繪製 3D CAD/GE1 模型	51
3.2.3	FDS 與 Smokeview 之運算架構與流程	53
3.2.4	FDS 模擬織理論基礎	55
3.2.5	FIRES 火災監控系統軟體介紹	57
3.3	縮小尺度案例情境設定	61
3.3.1	FDS 小尺度模型設定	61
3.3.2	FDS 全尺度模型設定	63
3.3.3	FDS 模型設置氣簾	64
3.3.4	實驗模型設置	66
3.3.5	火源設定	69
3.3.6	模型網格分析	73

3.3.7	模型測點設置	75
3.3.8	案例情境設定	78
3.3.9	實驗操作步驟	80
3.3.10	縮小尺度改善	81
3.4	長走道模型介紹	88
3.5	高樓建築案例模型介紹	90
3.5.1	高樓建築模行介紹	90
3.5.2	火源設定	93
3.5.3	模型網格分析	94
3.5.4	模型測點設置	95
3.5.5	案例情境設定	96
第四章	、結果與討論	98
4.1	FDS 模擬及實驗討論	98
4.1.1	Case1 案例分析	100
4.1.2	Case2 案例分析	109
4.1.3	Case3 案例分析	118
4.1.4	Case4 案例分析	127
4.1.5	Case5 案例分析	136
4.1.6	Case6 案例分析	145
4.1.7	Case7 案例分析	154
4.1.8	Case8 案例分析	162
4.1.9	Case9 案例分析	171
4.2	長走道氣簾阻煙探討	180
4.2.1	綜合煙流分析	180
4.2.2	綜合溫度分析	185

4.2.3 綜合能見度分析	189
4.2.4 氣簾臨界速度分析	192
4.3 高樓層建築火災探討	195
4.3.1 Case1 案例分析	196
4.3.2 Case2 案例分析	206
4.3.3 Case3 案例分析	213
第五章、結論與未來展望	222
5.1 結論	222
5.2 未來展望	223
參考文獻	225
附錄	229



表目錄

表 2.1 高層建築物、準高層建築物及超高層建築物之定義	7
表 2.2 氧氣濃度下降與人體可能出現不適症狀對照表	17
表 2.3 一氧化碳濃度與人體可能出現不適症狀對照表	17
表 2.4 二氧化碳濃度與人體可能出現不適症狀對照表	17
表 2.5 煙霧濃度與可視距離的關係	18
表 2.6 不同物質之最大熱釋放率	19
表 2.7 火源成長模式的係數	21
表 2.8 性能式煙控系統設計之模擬結果判定標準	27
表 2.9 依照裝配方式將空氣門進行分類 ^[14]	36
表 2.10 氣簾不同速度之影響示意圖 ^[14]	36
表 2.11 蒲福風級表(台灣颱風資訊中心) ^[15]	37
表 2.12 各氣簾機型規格介紹表 ^[14]	38
表 3.1 縮小尺度法則 (Scaling Law)	45
表 3.2 Babrauskas 實驗得到的各項燃料參數值	47
表 3.3 REAC 模擬設置參數	70
表 3.4 REAC 參數說明	72
表 3.5 測點位置示意表	78
表 3.6 案例情境設定	78
表 3.7 長走道氣簾設置案例	89
表 3.8 本案例模擬所使用之材質參數設定一覽表	92
表 3.9 七樓溫度測點位置圖	95
表 3.10 模型環境設定	96
表 3.11 各案例情境設定	96

表 4.1 風扇校正前後風速比較表	99
表 4.2 高樓建築情境設定	196
附表 5.1 未移除構造物之先前案例情境表	229



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖	4
圖 2.1 近 10 年國內建築分布情況 (30~45 公尺).....	8
圖 2.2 室內外溫差影響氣流模式	12
圖 2.3 煙囪效應對火災煙霧流動之影響示意圖	13
圖 2.4 煙流受熱浮力效應影響示意圖	13
圖 2.5 氣體受熱膨脹效應示意圖	13
圖 2.6 建築物四周的氣流型態	14
圖 2.7 建築物之中性戴受風壓影響之變化情形	14
圖 2.8 空調防排煙系統示意圖	15
圖 2.9 活塞效應示意圖	15
圖 2.10 火源成長曲線	20
圖 2.11 T-squared fires 火源成長曲線圖	20
圖 2.12 火源 15MW 之 JP-5 模擬 (實線) 與 McCaffrey 關係式 (圓圈) 比較	23
圖 2.13 不同格點之比較 (熱釋放率=24kW)	23
圖 2.14 熱釋放率 48 kW 居室陽台格點分析結果	24
圖 2.15 熱釋放率 48 kW 居室陽台模擬(a)-(e)與實驗(f)-(i)之火場溫度結果	25
圖 2.16 增壓化以阻止煙自門縫洩漏示意圖	29
圖 2.17 減壓化使煙排出建築物外示意圖	29
圖 2.18 以足夠速度的氣流阻擋煙之蔓延示意圖	30
圖 2.19 濃煙分布區域分析圖 (立體截面圖)	30
圖 2.20 濃煙局部排放方式示意圖	31
圖 2.21 建築物樓層區劃煙控系統圖 (核心式加壓系統)	32
圖 2.22 樓層區劃正負壓煙控系統圖	33

圖 2.23 氣簾安裝示意圖	34
圖 2.24 室內與室外空氣達平衡示意圖	34
圖 2.25 無空氣門噴射氣流時產生之對流示意圖	35
圖 2.26 使用空氣噴射氣流室外空氣將獨立流動示意圖	35
圖 3.1 Cai 和 Chow 學者研究 FDS 使用液態燃料預測和實際實驗的差異	48
圖 3.2 池火火焰週期變化圖	49
圖 3.3 實驗測定火焰高度	50
圖 3.4 FDS 應用於建築物火災模擬	51
圖 3.5 DXF 檔匯入與 CAD 模型重現示意圖	52
圖 3.6 FDS 模型與 CAD/GE1 匯入 FDS 比較圖	52
圖 3.7 FDS 與 Smokeview 組織架構流程圖	54
圖 3.8 FIRES 系統主要模組示意圖(左:以 Arduino 為主體之數據擷取硬體、右上: 以 LabVIEW 開發之 GUI 監控介面、右下:裝設各類感測器之建物模型)	60
圖 3.9 FIRES 系統之 GUI 控制介面	60
圖 3.10 以 FIRES 系統進行火災煙流實驗之配置圖	61
圖 3.11 案例模型側視圖	62
圖 3.12 PVC 材質設定	63
圖 3.13 石膏材質設定	63
圖 3.14 氣簾於建築模型建置示意圖	64
圖 3.15 氣簾速度設置圖	65
圖 3.16 移除門及上方牆面示意圖	65
圖 3.17 小尺度 (1:10) 尺寸壓克力實驗模型外觀	66
圖 3.18 小尺度 (1:10) 尺寸壓克力實驗模型左右視圖	67
圖 3.19 氣簾模型圖	68
圖 3.20 氣簾裝設於模型示意圖	68

圖 3.21 進氣系統設備	69
圖 3.22 氣簾速度調節閥	69
圖 3.23 FDS 油盆模型圖	70
圖 3.24 實驗油盆示意圖	70
圖 3.25 煤油參數設定	72
圖 3.26 液態煤油表面設定	73
圖 3.27 模型網格示意圖	74
圖 3.28 通道溫度記錄器	75
圖 3.29 溫度模組擷取 6 通道溫度訊號	76
圖 3.30 實驗溫度與光強度測點布置圖	76
圖 3.31 FDS 模型測點布置圖	77
圖 3.32 藉由取到的值進行線性迴歸得到校正方程式	82
圖 3.33 火源實驗質量損失測量圖	82
圖 3.34 N. Cai 和 W. K. Chow 研究 FDS 使用液態燃料預測和實際實驗的差異	83
圖 3.35 吸收係數 5 於各全尺度之熱釋放率	83
圖 3.36 吸收係數 0.1 於各全尺度之熱釋放率	84
圖 3.37 整流過後之氣簾模型	85
圖 3.38 實驗模型風速之校正示意圖	85
圖 3.39 風速計	86
圖 3.40 風扇加裝整流風罩示意圖	87
圖 3.41 線型風速計示意圖	87
圖 3.42 長走道模型正面圖	88
圖 3.43 測點設置示意圖	89
圖 3.44 本案例探討之高樓外觀示意圖	90
圖 3.45 本研究之大模型之內部配置圖	91

圖 3.46 七樓火源設置位置示意圖	93
圖 3.47 液態煤油表面設定	93
圖 3.48 七樓測點布置圖	95
圖 3.49 兩旁樓梯氣簾示意圖	97
圖 4.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	102
圖 4.2 Case1 梯間溫度曲線圖	106
圖 4.3 Case1 走道溫度曲線圖	107
圖 4.4 Case1 能見度與光強度對照圖	108
圖 4.5 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	111
圖 4.6 Case2 梯間溫度曲線圖	115
圖 4.7 Case2 走道溫度曲線圖	116
圖 4.8 Case2 能見度與光強度對照圖	117
圖 4.9 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	120
圖 4.10 Case3 梯間溫度曲線圖	124
圖 4.11 Case3 走道溫度曲線圖	125
圖 4.12 Case3 能見度與光強度對照圖	126
圖 4.13 Case4 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	129
圖 4.14 Case4 梯間溫度曲線圖	133
圖 4.15 Case4 走道溫度曲線圖	134
圖 4.16 Case4 能見度與光強度對照圖	135
圖 4.17 Case5 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	138
圖 4.18 Case5 梯間溫度曲線圖	142
圖 4.19 Case5 走道溫度曲線圖	143
圖 4.20 Case5 能見度與光強度對照圖	144
圖 4.21 Case6 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	147

圖 4.22 Case6 梯間溫度曲線圖	151
圖 4.23 Case6 走道溫度曲線圖	152
圖 4.24 Case6 能見度與光強度對照圖	153
圖 4.25 Case7 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	155
圖 4.26 Case7 梯間溫度曲線圖	159
圖 4.27 Case7 走道溫度曲線圖	160
圖 4.28 Case7 能見度與光強度對照圖	161
圖 4.29 Case8 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	164
圖 4.30 Case8 梯間溫度曲線圖	168
圖 4.31 Case8 走道溫度曲線圖	169
圖 4.32 Case8 能見度與光強度對照圖	170
圖 4.33 Case9 氣簾及火源局部切細圖	172
圖 4.34 Case8 及 Case9 熱釋放率比較圖	172
圖 4.35 Case9 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	173
圖 4.36 Case9 梯間溫度曲線圖	177
圖 4.37 Case9 走道溫度曲線圖	178
圖 4.38 Case9 能見度與光強度對照圖	179
圖 4.39 各案例 40 秒時之煙流圖	181
圖 4.40 各案例 120 秒時之煙流圖	182
圖 4.41 各案例 200 秒時之煙流圖	183
圖 4.42 各案例 600 秒時之煙流圖	184
圖 4.43 燃燒 100 秒溫度切面 (Y=0.8m)	186
圖 4.44 燃燒 600 秒溫度切面 (Y=0.8m)	187
圖 4.45 各案例測點最大溫度曲線圖 (T_{ent})	188
圖 4.46 燃燒 100 秒之溫度圖	190

圖 4.47 燃燒 600 秒之溫度圖	191
圖 4.48 各案例能見度曲線圖	192
圖 4.49 氣簾風速調整後煙流比較圖(左側為 3 m/s 右側為 4 m/s).....	194
圖 4.50 氣簾速度 3 m/s 下梯間能見度切面圖	195
圖 4.51 Case1 七樓起火層燃燒情況	198
圖 4.52 Case1 模擬至 600 秒之模型前視圖	198
圖 4.53 兩側樓梯煙流側視圖	199
圖 4.54 七樓起火房間之兩側門口之溫度曲線圖	200
圖 4.55 各樓層走道處之溫度測點曲線圖	201
圖 4.56 起火層七樓能見度之切面圖 (Z=26 m).....	203
圖 4.57 八樓能見度之切面圖 (Z=30 m).....	204
圖 4.58 九樓能見度之切面圖 (Z=34 m).....	204
圖 4.59 十樓能見度之切面圖 (Z=38 m).....	205
圖 4.60 Case2 七樓起火層燃燒情況	207
圖 4.61 Case1 七樓起火層燃燒 600 秒情況	208
圖 4.62 兩側樓梯煙流側視圖	209
圖 4.63 七樓起火房間之兩側門口之溫度曲線圖	210
圖 4.64 個樓層走道處之溫度測點曲線圖	210
圖 4.65 起火層七樓能見度之切面圖 (Z=26 m).....	212
圖 4.66 Case3 七樓起火層燃燒情況	214
圖 4.67 Case3 模擬至 600 秒之模型前視圖	214
圖 4.68 兩側樓梯煙流側視圖	215
圖 4.69 七樓起火房間之兩側門口之溫度曲線圖	216
圖 4.70 個樓層走道處之溫度測點曲線圖	217
圖 4.71 起火層七樓能見度之切面圖 (Z=26 m).....	219

圖 4.72 八樓能見度之切面圖 (Z=30 m).....	220
圖 4.73 九樓能見度之切面圖 (Z=34 m).....	220
圖 4.74 十樓能見度之切面圖 (Z=38 m).....	221
附圖 5.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	230
附圖 5.2 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	234
附圖 5.3 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖	238



符號說明

英文字母

A_0	牆面總開口面積 (m^2)
A_g	受正值外風壓牆面總面積 (m^2)
A_{0i}	各牆面 (含屋頂, 不含 A_0) 之總開口面積 (m^2)
A_{gi}	各牆面 (含屋頂, 不含 A_g) 之總面積 (m^2)
A	中庭截面積 (m^2)
A	火源面積 (m^2)
C_p	空氣比熱 ($kJ/kg\cdot^{\circ}C$)
C	浮力常數
D	油盤直徑 (m)
D^*	火災特徵直徑
D	擴散係數 (m^2/s)
f	外力項 (N)
g	重力加速度 (m/s^2)
H	火源上方天花板淨高 (m)
h	焓 (J/kg)
I	光經過一段路徑後之剩餘強度 (Cd)
I_0	光之初始強度 (Cd)
K	中心軸關係式係數
K	光衰減係數 (m^{-1})
k	熱傳導係數 (W/m-K)
L	距離 (m)
M	分子量 (kg/kgmol)

\dot{m}_p	火羽的質量流率 (kg/s)
\dot{m}''	單位面積質量損失率 (kg/m ² -s)
\dot{m}_i'''	第 <i>l</i> 種分子每單位體積產生率 (kg/m ³ -s)
p	壓力 (Pa)
P_0	環境壓力 (Pa)
P^*	特徵壓力缺陷
Q_D^*	熱釋放率無因次參數 (—)
Q	火源的熱釋放率 (kW)
\dot{Q}	熱釋放率 (kW)
q''	輻射熱強度 (W/m ²)
Q_i	進氣口體積流率 (m ³ /min)
Q_e	排氣口體積流率 (m ³ /min)
R^*	Resolution of Simulation
R	燃燒速率 (mm/min)
T_0	環境溫度 (°C)
T_0	中心溫度 (°C)
T	溫度 (K)
t	開始燃燒後之時間 (sec)
	煙沉積之 Z 處所需時間 (sec)
t_0	無排煙時之 t 值 (sec)
	潛伏期之時間 (sec)
t_g	有效燃燒後之時間 (sec)
	火源成長時間 (sec)
u_0	中心速度 (m/s)

u	流體氣流速度 (m/s)
V	排煙量 (m^3/sec)
V_0	發煙量 (m^3/sec)
V	氣流速度 (m/s)
	特徵速度 (m/s)
Y_i	第 i 種的質量分率 (—)
Z	火源上方高度 (m)
Z	煙層高度 (m)
Z_f	火焰高度 (m)

希臘字母

α	火源之成長速率 (kW/s^2)
	火源成長係數
l	幾何長度 (m)
ρ_0	空氣密度 (kg/m^3)
ρ_0	環境密度 (kg/m^3)
ρ_1	燃料密度 (kg/m^3)
ρ	流體密度 (kg/m^3)
τ	黏滯剪應力張量
	特徵時間 (s)
δ_i	i 方向上之格點大小 (m)
ΔT	環境溫差 ($^{\circ}\text{C}$)
ΔH_c	燃燒熱 (kJ/kg)



第一章、緒論

1.1 研究緣起

經濟蓬勃發展大量人口移入都市，促使都會地區的空間利用不足，只能向上發展因此高層建築快速地興起，來滿足經濟的發展，但是這一類型的高樓建築有著共通的特性就是較少的逃生出口、濃煙的迅速擴散、火焰向上燃燒、內部高溫及搶救上的困難^[1]，若發生火災將造成人員生命安全的危害和經濟財產的巨大損失，例如最近 2015 年 12 月 31 日跨年夜，杜拜火炬塔大樓發生火災，整個大樓被火焰覆蓋濃煙瀰漫，許多燃燒碎片的掉落，造成 1 人死亡、15 人受傷^[2]。2010 年 11 月 15 日中國上海膠州路公寓大樓火災，因大樓施工改造包圍大量易燃物品，火勢迅速燃燒，加上搶救上的困難，最終造成 58 人死亡，71 人受傷^[3]。

這一類型高樓火災層出不窮，而且一發生災難常伴隨著生命財產的損失，其中造成人員死亡的主要原因是「煙」，統計數據顯示，約 85% 的人死亡是吸入過多有毒氣體致死，且火災產生的濃煙竄進人員逃生的通道，使能見度下降讓逃生更處得不利，因此有必要來探討阻止煙流竄進逃生通道來增加人員逃生的機會，相較於防煙垂壁及防火門的剛性阻煙，氣簾少了建築物設計限制及逃生的不便，本研究希望能探討其阻煙效能及煙流擴散情形。

國內就一般意外災害損失分析中，除了天然災害外，火災是發生頻率最高亦最嚴重的情況之一^[4]，因為火災很可能在極短時間內，造成性命、財物之重大損失。火災的燃燒行為，會受到外在環境、建築物構造、燃燒成分，以及地形地物等各種因素之影響。一般發生火災時，煙層的流動較不易掌握，濃煙會因為高溫膨脹效應快速向低壓區域流竄，透過建築物內部通道自火災現場流至其他樓層，這不僅會造成嚴重的災害，也會使人員逃生的困難度提高或導致消防救災工作無法進行，因此防煙、排煙、煙控對策已成了高樓建築防火避難設計上最重要的一環。

另一方面，在科技一日千里的推進下，電腦可視為任何儀表的中樞，進行整

合操作、控制，以及彌補儀表本身的限制。虛擬儀表的發展正是如此，利用電腦標準化的開放性架構，提供資訊處理、儲存以及顯示等功能。當現成、低價的介面卡裝入開放性匯流排的時候，標準化匯流排介面可以為虛擬儀表提供相當大的發展空間。虛擬儀表的優點可提升性能和降低成本，並且協助使用者透過軟體模組的技術，達到模組化、階層化的環境，此為傳統儀器無可比擬之處。加上眾多產業界積極投入，個人電腦和工作站的技術變革，使得虛擬儀表的優勢加速並擴大發展。

本研究希望能利用先前實驗者所開發出的 FIRES 火災監控系統軟體^[5]，嘗試使用各種阻煙策略並添加氣簾來阻止煙霧進入樓梯間，另外利用 FDS 模擬軟體設計火源以及進行後續火災煙流擴散的數值模擬，並針對縮小尺寸實驗及數值模擬與全尺度模擬的後果進行比較並分析，最後針對高樓層建築裝設氣簾並模擬煙流阻煙情形。

1.2 研究動機與目的

高層建築為了保證較長的疏散時間及疏散通道的暢通，大多針對樓梯間及通道間來設計阻煙系統來防止煙氣的進入，然而現行的如自然排煙、防煙垂壁、機械排煙等，這些阻煙和排煙方法於實際應用中都不能令人十分滿意，例如自然進氣和機械排煙的情形下火災發生時，房間因為機械排煙產生負壓，導致走廊及室外的空氣不斷流入前室，容易造成煙氣隨空氣一起進入房間，而失去了阻煙的作用，同時對人員疏散和消防人員救火產生不利的影響。

又例如機械排煙和梯間進氣加壓策略，此方法優點在於梯間產生正壓，有較強的阻煙能力，但是實際狀況用人員逃生時，各樓層梯間門都開啟下，要維持梯間的正壓較為困難，除了需要較大的送、排風系統，還需占用較大的建築空間，增加額外成本，另外風機輸送大量空氣也會使得火場火勢更為強烈，助長火勢燃燒造成更大的損失。當梯間存在正壓，門也相對關閉的情況下，要打開門會因為內外存在的一定壓差，而需要較大的推力打開，對於老弱婦孺在逃生方面也有一

定影響。防煙垂壁則是在煙層厚度在一定高度下，防煙垂壁會失去原本阻煙的功能，使得煙流擴散至其它區域間^[6]。相較於氣簾就能解決這些問題，因為它為柔性阻隔物，利用它不僅能阻止火災煙氣的侵入疏散走道或避難區域，來確保這些區域人員的安全，又能允許受災人員和火災撲救人員自由地進出這些區域，做到暢通無阻，同時不影響視野，佔據空間小為一理想防排煙工具^[7]。

雖然氣簾阻煙研究在各國都有進行，但理論研究目前尚處於起步階段，而高層建築火災的氣簾阻煙研究目的和意義，在於驗證阻煙氣簾在高層建築火災時實際應用的可能性，考量實驗室成本及場地限制，本研究採藉由相似理論進行 1:10 的縮小尺度實驗同時改用 LabVIEW 軟體來建立虛擬化儀表系統介面，相較於一般標準化的實驗室儀器將更具彈性。不須仰賴儀器製造商，因此可以自訂儀器功能，以便更能符合需求與應用。只要使用一部電腦、多組隨插即用裝置與感測器，再加上軟體，即可構成一套完整且可設定參數以及執行控制的虛擬儀表。針對應用而言，當有任何需求時，可以快速準確地創造所需要的虛擬儀表，且所花費的金錢相較於傳統儀器更加低廉。當需要進行任何改變時亦可以在較短時間之內完成虛擬儀表的修改，系統維護效益也較傳統儀表高出許多，而本研究之目的可歸納成下列三點：

1. 藉由「模組化」的監控系統，我們可以整合進行一系列自動化控制及數據蒐集，驗證縮小尺度實驗與全尺度、小尺度模擬之吻合性。
2. 以 FDS 軟體模擬並與實際縮小模型實驗比較，探討火災發生時之溫度變化、煙流、能見度等，並探討裝設氣簾與否之差異性。
3. 藉由得出之氣簾參數設定參考值以及縮小實驗及模擬之吻合度，應用於大型高樓建築物中，並進一步探討實際效用及優缺點。

1.3 研究流程

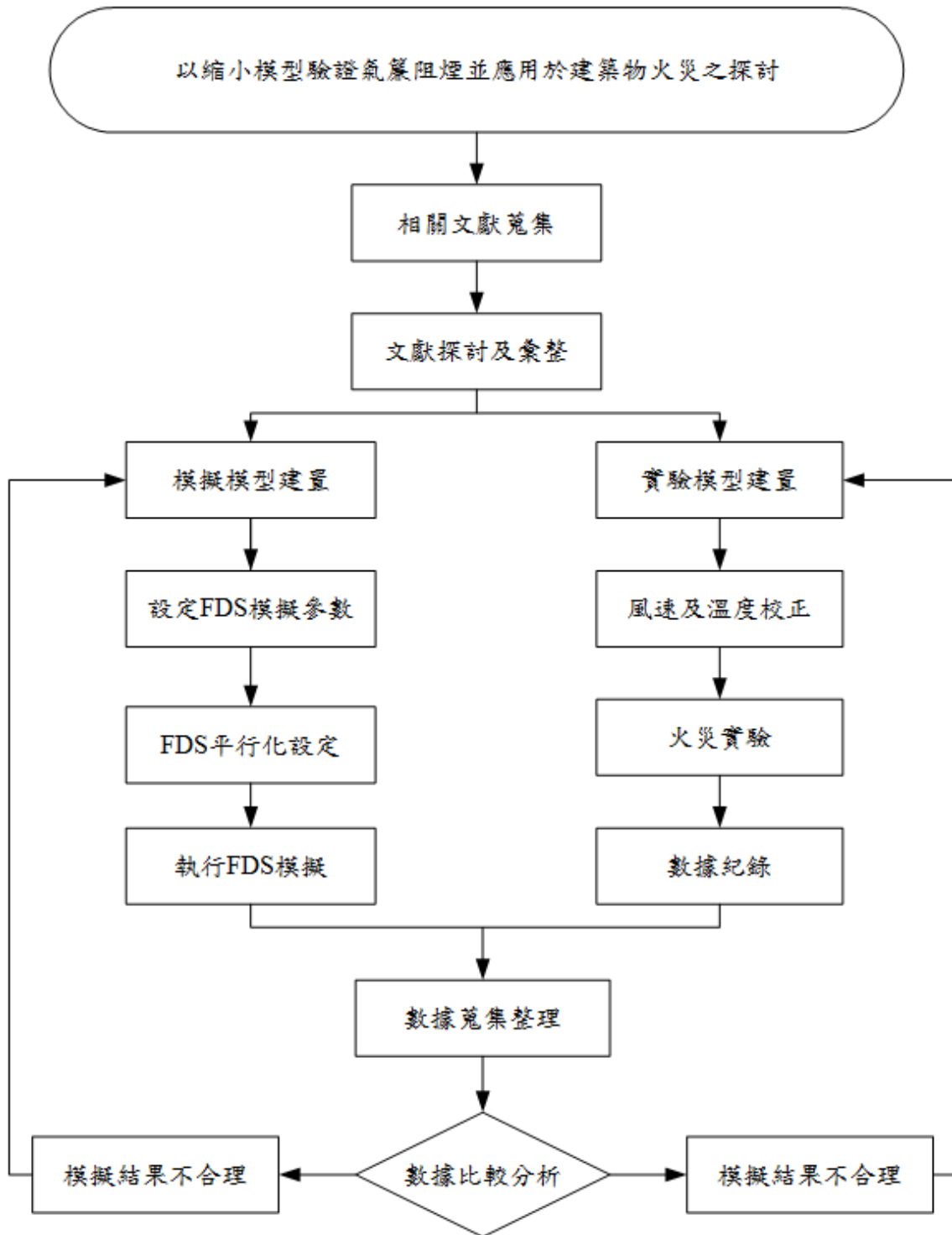


圖 1.1 研究流程圖

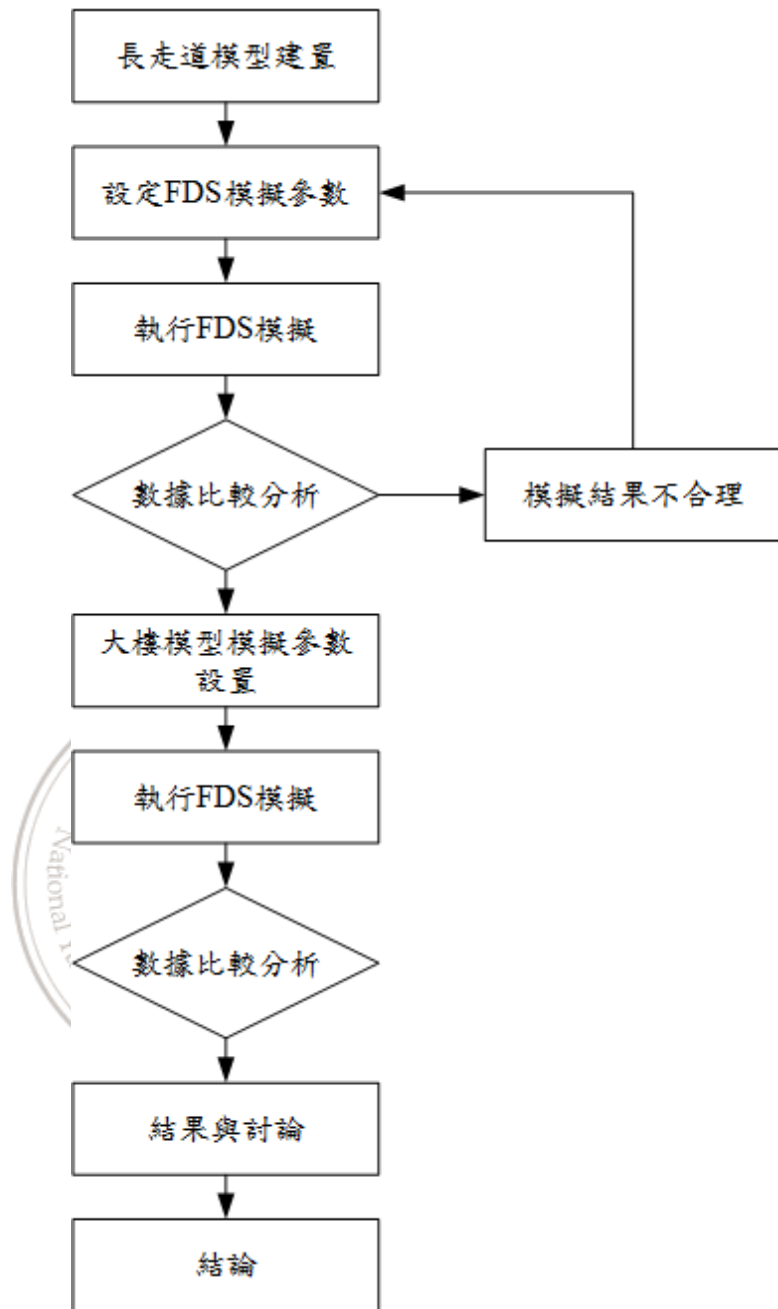


圖 1.1 研究流程圖(續)

第二章、文獻回顧

2.1 高層建築及火災之概述

2.1.1 高層建築之定義

一般來說，具有較多的樓層數且高度夠高的建築物，但具體的說明何種樓層數及高度屬於高層建築，不同國家各自有不同的規範。國外有關高層建築之界定如下^[8]：

1. 美國防火協會 (National Fire Protection Association, NFPA)：所謂高層建築，係指任何建築物，其上層樓地板高度已超過雲梯車所能達到之最大高度，而其火災必須經由建築物內部進行搶救者。
2. 歐洲防火協會 (European Fire Protection Association, EFPA)：對於高層建築的定義是由建築物外部消防器材無法達到的樓層，均謂之高層建築。
3. 國際高樓消防安全會議之定義：由美國一般行政事務署 (General Services Administration) 召開之會議 (International Conference on Fire Safety in Hight-Rise Buildings) 中，所謂高層建築物，係指無法緊急逃生，且須由建築物內部進行搶救者。此類建築物通常有下列特性：
 - (1) 高度超過消防隊雲梯車之最大高度。
 - (2) 具有明顯之煙囪效應。
 - (3) 逃生避難之時間較長。
4. 消防科學辭典 (Fire Sciences Dictionary)：其定義與 NFPA 相似，並特別強調，此類建築物無法迅速將民眾緊急疏散，其室內外有明顯之壓力差 (Pressure Difference)。
5. 日本：認為四樓以上之建築物，即可稱高層建築。

然而，我國目前是依據「建築技術規則」建築設計施工編修正實行之第十二章高層建築物專章內明定「高層建築物」係指高度在 50 公尺或樓層在 16 層以上

之建築物。

表 2.1 高層建築物、準高層建築物及超高層建築物之定義

類別	定義單位	定義內容
高層建築物	國內建築技術規則第 227 條	高度在 50 m 或樓層在 16 層以上之建築物
	美國 NFPA	任何建築物,其上層樓板高度已超越雲梯車所能到達且可有效操作之最大高度,而其火災必須經由建築物內部進行搶救者
	消防科學辭典	此類建築物無法迅速將民眾緊急疏散,其室外有明顯壓力差
	國際高樓消防安全會議	無法緊急逃生,且需由內部進行搶救之高層建築物
	建築規劃設計組	指 36 m 以上, 60 m 以下之建築物
	建築結構組	基面以上高度 50~75 m 之建築物為高層建築物
	建築防災組	樓層在 11 層以上或簷高 31 m 以上之建築物
準超高層建築物	建築規劃設計組	60 m 以上, 100 m 以下之建築物
超高層建築物	建築規劃設計組	100 m 以上之建築物
	建築防災組	樓層在 25 層以上或簷高 90m 以上之建築物

2.1.2 各國現有高層建築之概況

經由內政部統計處之「內政統計月報」中關於營建部份的統計報告（內政部營建署，2016）^[9]，可查出國內自西元 2006 年到 2015 年間全國建築物高度分布之情況。由於其範圍並無針對「建築技術規則設計施工編」中定義之高層建築物來

做統計，因此本研究以最接近的範圍（即超過三十公尺以上至四十五公尺）作為指標。經整理後進行比較，可發現此範圍其間有下降，但建築物的數量皆維持在1000棟上下（圖 2.1）。

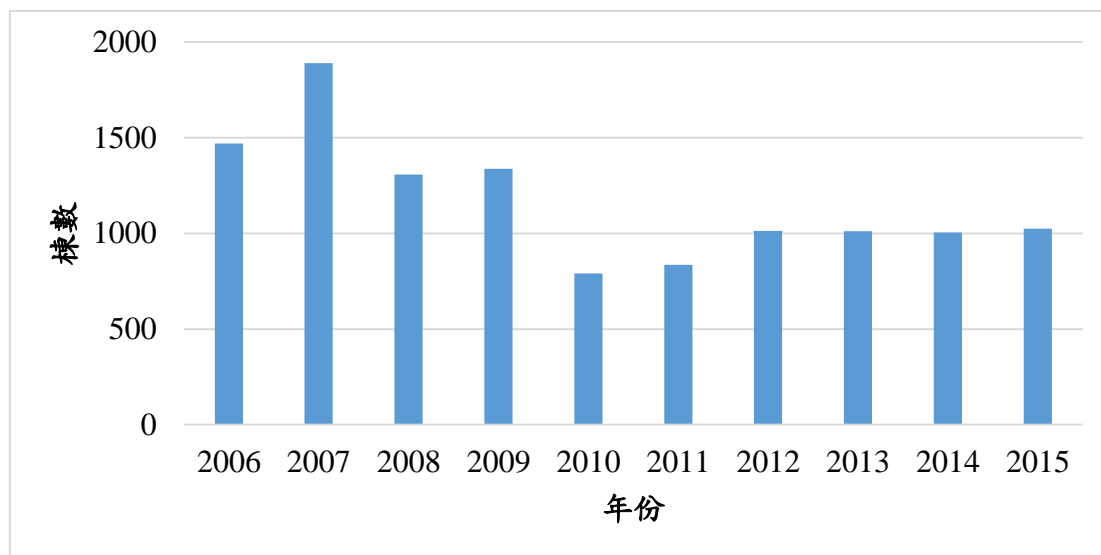


圖 2.1 近 10 年國內建築分布情況（30~45 公尺）

2.1.3 高層建築之特性

隨著工商業發達、都市人口快速增長，為了充分利用土地，促使大都會區建築趨向朝高空發展，因此構造隨之高層化。這些建築物不僅在結構上形成特色，且用途方面在火災現象上，亦具有共同的特徵。

1. 高層建築結構之特色

- (1) 結構堅固結實：高層建築之樑柱皆係由鋼骨或鋼筋混凝土所造，外觀雄偉壯大。為防強風吹襲及地震動搖，除有廣大深固之地基外，其支柱及外牆均極堅厚結實。因此，縱使起火焚燒，短時間內其結構亦無倒塌之虞，消防人員仍可經由其它尚未被波及之處，進入內部搶救。
- (2) 樓層面積廣闊：高層建築為維持其穩固性，通常建築基地須達一定標準，樓層越高，相對所要求之基地亦越大。由於高層建築物大都採多用途，其單一層面積已較普通建築物更為廣大，而各樓累積之樓地板面積更大，火災時無異形成廣大之延燒範圍。

- (3) 裝潢材料複雜：高層建築外觀雖然堅固耐火，但內部裝潢、擺設及附設物品之材料，則五花八門。一般業主多只考量美觀、新穎、易於施工，故合板、塑膠、纖維等易燃性物品紛紛出籠。火災時，不但燃燒迅速，產生高熱，並極易釋出大量煙霧及有毒氣體，造成人命之危害。近年來更由於建築技術之進步，許多建築師設計時，只講求美觀、新潮、時髦、採光及節省空間，外牆或大樓周壁，大量採用玻璃建材。此種強化玻璃，搶救時不易擊破，易形成阻礙，但一旦破裂時，碎片由高處紛紛落下，又易造成地面圍觀民眾與消防或警察人員之傷亡。
- (4) 開口通道眾多：高層建築面積廣闊樓層又多，因此內部必須隔成許多獨立之空間，而這些空間需透過走廊、通道、樓梯、出口等貫穿銜接。此等處所因均屬開放性，火災時立即成為煙及火流之通道，不但使煙霧及火勢擴展迅速，更阻礙了人們的避難與逃生。
- (5) 各種管道密佈：高層建築內部設有各種管路系統，包括空調系統、電線系統、電梯系統、排煙系統及供水、排水等水管，這些管路不但平面分佈於各角落，且上下連貫形成網路。火災時，這些管線網路乃成為火煙向上延伸的最佳孔道。尤其下層發生火災時，整棟大樓將立即陷入煙霧之中。
- (6) 挑高中庭設計：高層建築為了向世人展現建築物之宏偉印象，在主要入口或者中央位置，大多會採用挑高中庭的空間設計，給予人視線開闊、行動無拘的開放感受，在火災情景中，挑高中庭有如超高大的垂直空間，完全沒有任何阻隔障礙，極易成為煙氣集中、傳播的通道。

2. 用途特性^[10]

- (1) 用途複雜：高層建築除少部分（整棟大樓純粹供一種用途者，如辦公大樓、飯店）外，大多數高層建築為達充分有效之使用，其各層均有不同之用途。其間不少夾雜供公眾出入或聚集之用者，其內部之裝潢材料、

使用器具與貯存物品複雜而多樣，形成消防上之安全死角。例如：樓層中設有餐廳、夜總會、舞廳者，內部之裝潢必有大量之易燃物品，燃燒時自然增加了火載量。以複合用途大樓為例，此種型態大樓通常低層樓為商業用途、中層樓為辦公室、高層區則為住宅。

- (2) 人口密集：高層建築之樓層高，樓地板面積廣闊，因此收容之人數多。尤其是複合使用之建築物，設有戲院、百貨公司、旅館、餐廳等場所者，人口密集，財物集中，一旦發生火災，常造成重大之人命傷亡與財物損失。

2.1.4 高層建築火災之危險性

高層建築物發生火災時，消防人員搶救時，不僅需確認起火點位置、火災的擴展情況、瞭解需要救助者的情況等，在情報收集上需要較長時間，且災害的搶救過程也較困難，因此了解高層建築物火災危險特性是十分重要的，其主要原因有以下四點：^[11]

1. 火勢蔓延快：高層建築物內部有眾多的樓梯間、電梯管道、電纜管道、風道、排煙道等等垂直管道，如果防火區劃或防火處理不完善，火災發生時，就好像一座高聳的煙囪，成為火勢快速蔓延的途徑。
2. 疏散困難：高層建築具有下列特點：
 - (1) 樓層數多，垂直距離長，疏散避難到地面層或其他安全的場所所需的時間也較長。
 - (2) 使用人員密集。火害發生時，由於各種垂直管道氣壓牽引力大，火焰以及濃煙向上蔓延快速，增加了疏散避難的困難度。多數超高層建築物的垂直逃生主要倚靠樓梯，但由於樓梯逃生至避難層所需時間極多，一旦煙氣竄入，就會嚴重影響避難。
3. 撲救困難性高：高層建築物樓層數多、高度高，甚至到 200 公尺以上，

火災發生時，戶外進行救助相當困難，一般均以自救為主要考量，即主要靠室內防火設施並配合消防安全設備，但防火安全設施及設備若設置不完善則有信賴度的問題，因此，高層建築物撲救往往較為困難。

4. 火災隱患多：一般超高層建築物因空間較多，功能複雜，大多為複合用途建築物，可燃物多使建築公共安全及消防安全管理不易；例如：設有商業營業的空間、人員密集的表演場、餐廳等，又分租給若干單位使用，使用狀況及安全管理不統一，潛在火災隱患多，一旦起火，容易造成大面積火災，從國內火害發生實例可知，這類火災發生，火災蔓延、撲救、疏散更為困難，容易造成更大損失。

2.1.5 高層煙層流動與蔓延性

當建築物發生火災，在火災區域形成一高溫煙氣火場，若氧氣供給不充分，物質燃燒不完全，必產生大量的固體微粒，而熱空氣之比重較周圍冷空氣低，所以形成一明顯的上升氣流，尤其在建築物之垂直通道內，隨著氣流移動，使高溫高熱之煙流快速擴散到建築物每一角落。然而建築物火災中產生的煙和高溫氣體流動有兩個主要因素^[12]：

1. 煙層本身的流動性：這是因為所包含的高溫氣體比周圍空氣的密度低。
2. 建築物內空氣流動：雖然與火完全無關，但因空氣的流動，會將煙送至建築物內各處。

由以上兩主要因素，可知建築物內造成煙層流動的驅動力，可分為以下六種：

- (1) 煙囪效應：因建築物內部空氣與室外空氣溫度不同產生壓力差所造成。

在建築物內部垂直通路之空氣產生上升或下降的流動，即正煙囪效應 (Normal stack effect)，或反煙囪效應 (Reverse stack effect)，如圖 2.2 所示。

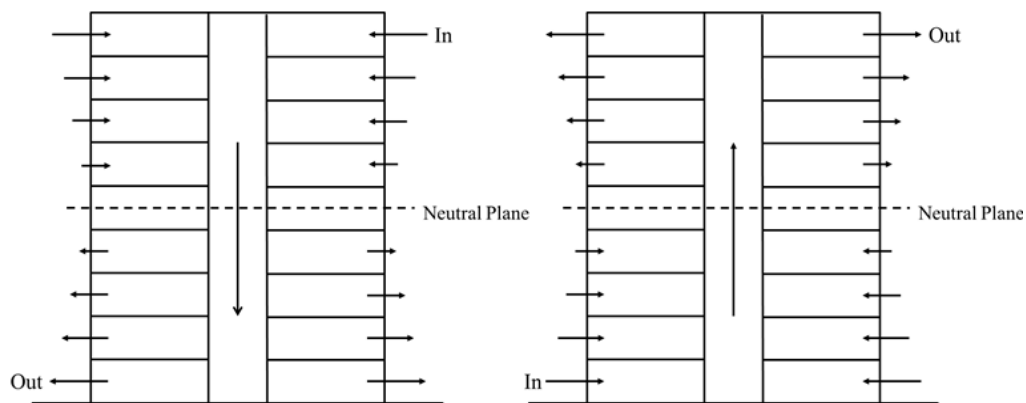


圖 2.2 室內外溫差影響氣流模式

在煙囪效應中，中性面理論相當重要，因氣體溫度差之變化，所產生氣體密度的不同，形成氣體流動的壓力差。如果壓力差為正，代表該處向外排氣；而壓力差為負，表示向該處進氣。在某一高度的壓力差為零時，表示不排氣也不進氣，那個高度的水平面即稱為中性層。在普通的建築物中，中性層的高度取決於建築物上、下開口的情況，若假設上、下開口相同，則中性層為樓高的一半。

另外不同季節時，煙囪效應所引起的壓力差，會因起火位置不同，在建築物內部有不同的流動方式，亦會有不同的煙流擴散情況。冬天時最差情況是建築物底層發生火災，因正煙囪效應影響，底層的煙氣隨著空氣流動，進入垂直通道，沿著垂直通道上升，而擴散至中性層以上各樓層，在高層建築物中更明顯；夏天時最差情況則是建築物頂層發生火災，因反煙囪效應影響，頂層的煙氣隨著空氣流動，煙氣進入垂直通道，沿著垂直通道向下流動，而擴散至中性層以下各樓層，如圖 2.3 所示。

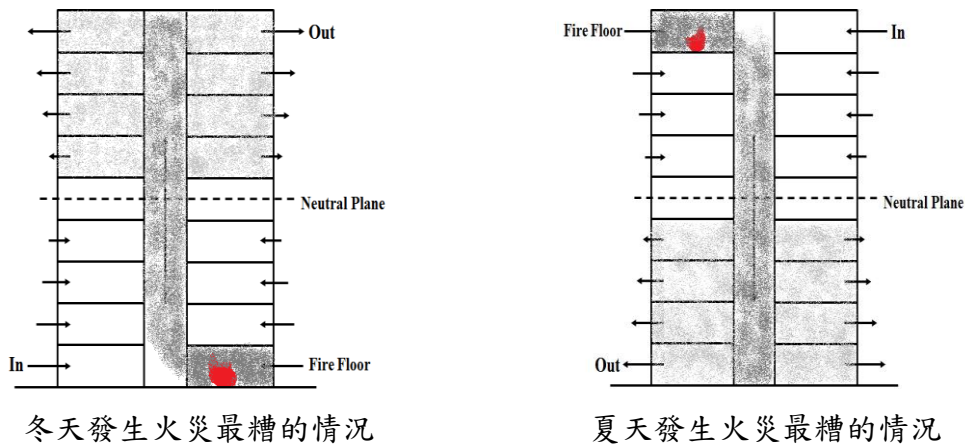


圖 2.3 煙囪效應對火災煙霧流動之影響示意圖

- (2) 熱浮力效應：因火焰上方的高溫氣體與周圍冷空氣間的密度不同，煙的密度較低，相對產生煙的浮力（如圖 2.4）。

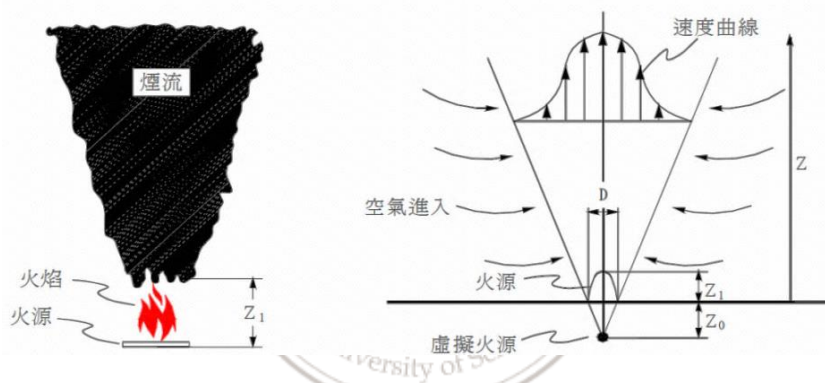


圖 2.4 煙流受熱浮力效應影響示意圖

- (3) 高溫氣體膨脹：由於燃燒所產生的高溫使氣體膨脹，若常溫 300 K 時體積為 1 倍，則在 600 K 時體積即變成 2 倍，以此類推（如圖 2.5）。

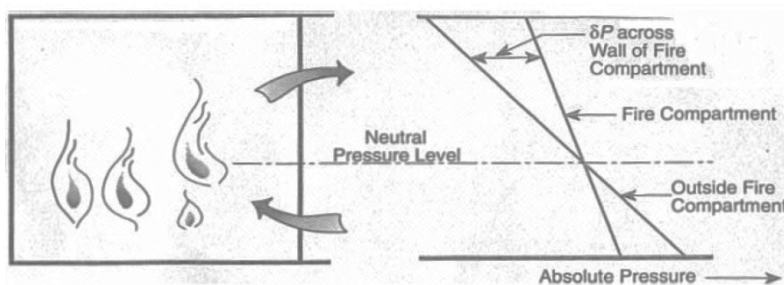


圖 2.5 氣體受熱膨脹效應示意圖

- (4) 外部風之效應：於許多情況下，外部風之效應對建築物內煙霧流動具有重大影響（如圖 2.6）。建築物於逆風面承受風之正壓力，當氣流流至建築物背面，紊流形成負壓力，故位於建築物不同方位開口，因受風向、風速不同而感受不同之壓力，進而影響中性帶之位置（如圖 2.7）。在所有門窗均關閉之建築物中，風對空氣流動之影響有限，但對於門窗開啟之建築物，風對其內部之空氣流動影響很大。

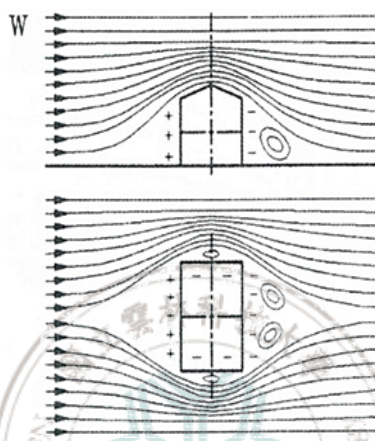


圖 2.6 建築物四周的氣流型態

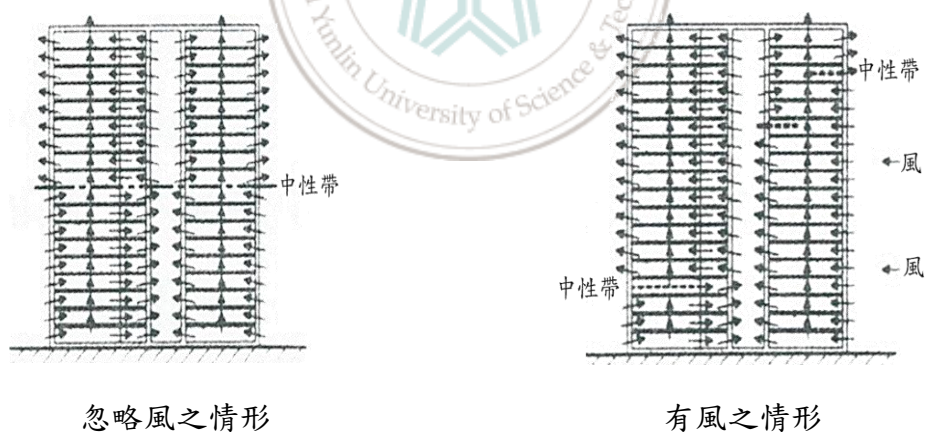


圖 2.7 建築物之中性帶受風壓影響之變化情形

- (5) 機械通風系統：由於現有建築物以密閉空間居多，大都採用空調通風系統，尤其是中央空調系統通達各樓層，一旦某一樓層發生火災，所產生之煙霧，便利用回風與送風風管，將煙傳送到很遠的地方。另一方面，空調系統也正被設計成為煙控的管道，利用防火、防煙擋板控制煙之流

動，或利用空調管進行排煙，使空調系統發揮更大的功用。

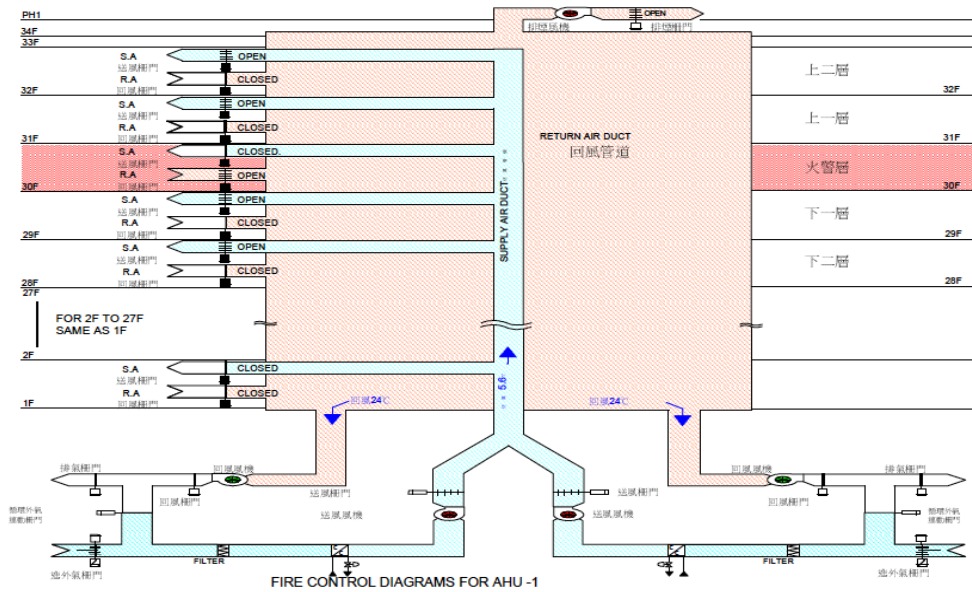


圖 2.8 空調防排煙系統示意圖

- (6) 電梯活塞效應：把電梯看成是一個活塞，在昇降機間移動，將空氣吸入與排出而產生氣流，當電梯上下移動時，所形成之壓力差，很容易將火層之煙流吸入昇降機間，而將煙排至非起火樓層。

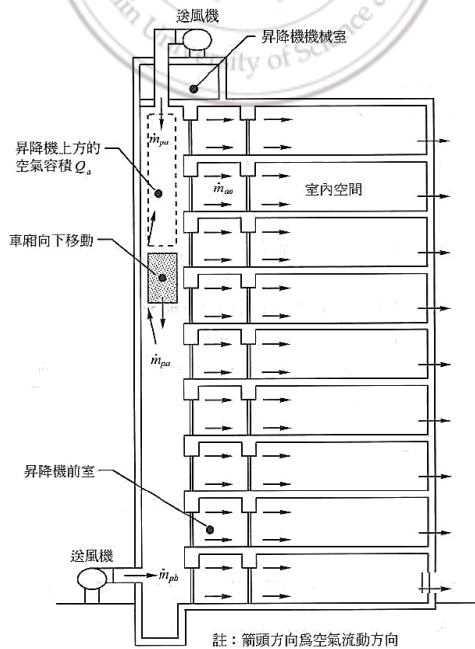


圖 2.9 活塞效應示意圖

2.1.6 火災的危害

火災現場潛藏許多危害因子而且不利人類生存之環境，一場火災從著火到結束，出現諸如火焰延燒，並且形成一高溫環境，高溫可能造成結構損毀，而燃燒不僅消耗掉氧氣、而且也產生不少毒性氣體，並伴隨著濃煙的發生。以下是本研究將探討火災之危害因子：火焰(Flame)、氧氣(Oxygen)、毒性氣體(Toxic gases)及煙霧(Smoke)等。

1. 火焰(Flame)與熱氣(Heat)

火焰之發生是透過光、熱而釋放能量。一般人體皮膚若暴露在高於溫度 66°C (150°F) 的環境下或受到輻射熱 3 W/cm^2 以上時，僅須 1 秒即可造成燒傷，故火焰溫度及其輻射熱可能導致立即或事後致命。而由火焰產生之熱空氣及氣體，亦能引致燒傷、熱虛脫、脫水及呼吸道閉塞(水腫)。生存極限之呼吸水平溫度(Breathing level temperature)約為 131°C (300°F)；但室內氣溫高達 140°C 時仍能存活短暫時間。人體呼吸的平均水平高度從地板向上算起一般約為 1.5 公尺(5 呎)以上之距離，有時居室人員中兒童佔有顯著比例時，安全設計上則採用 1.2 公尺(4 呎)水平高。對於呼吸而言，超過 66°C (150°F) 之溫度便難以忍受，此溫度範圍可能會使消防人員救援及室內人員逃生遲緩。

2. 氧氣(Oxygen)

火災現場之燃燒均會造成氧氣的消耗，而人體之呼吸又需要氧氣。一般大氣環境下約有 21% 的氧氣濃度，而當氧氣濃度持續下降時，人體就會出現不適的症狀(如所表 2.2 示)。一般而言，人類存活所容許之最低氧氣濃度為 10%。

表 2.2 氧氣濃度下降與人體可能出現不適症狀對照表

氧氣濃度	人體症狀
21%降至 17%時	妨礙運動肌肉之調節
14%降至 10%時	尚有意識、疲勞、判斷易錯誤
10%降至 6%	昏迷，數分內需供氧始可甦醒

3. 毒性氣體 (Toxic gases)

從有關火災死亡統計資料得知，一氧化碳是最常造成人員罹難的毒性氣體，(如表 2.3)所示。此外二氧化碳濃度增加，也有可能造成危害。雖然其本身並無毒性，但其濃度增加亦會妨礙人體吸收氧氣而致缺氧，如所(表 2.4)示。

表 2.3 一氧化碳濃度與人體可能出現不適症狀對照表

一氧化碳濃度	人體暴露時間及生理症狀
100 ppm	8 小時內尚無感覺
400~500 ppm	1 小時內尚無感覺
600~700 ppm	1 小時內感覺頭痛、噁心、呼吸不暢
1,000~2,000 ppm	2 小時內意識朦朧、呼吸困難、昏迷、痙攣， 逾 2 小時即死亡。
3,000~5,000 ppm	20-30 分內即死亡
10,000 ppm	1 分鐘內即死亡

表 2.4 二氧化碳濃度與人體可能出現不適症狀對照表

二氧化碳濃度	人體出現不適症狀
1~2%	數小時內安全
3%~4%	1 小時內安全
5%~7%	30 分鐘~1 小時即有危險
20% 以上	短時間內即可死亡

4. 煙霧 (Smoke)

由於煙成份中含有碳粒、焦油，這些產物均足以造成火災現場環境視線不良、能見度不佳，且高濃度煙霧會阻礙火場逃生者正確辨識逃生路徑之能力，直接影響人員的逃生避難、消防人員尋覓起火源及滅火工作。內政部建築研究所提出（如所表 2.5 示）在避難逃生路徑上，於煙層底部之高度承受極限為：避難人員站立之樓地板高度 1.8 m 以上，且能見度則須在 2 m 以上。

表 2.5 煙霧濃度與可視距離的關係

可視距離	狀況說明
20~30m	煙霧剛發生時之淡薄濃度，煙霧探測器開始有反應，此時對不熟悉建築物動線的人會有避難障礙
5m	對於熟悉建築物動線的人亦會有避難障礙
3m	感覺昏暗時的濃度，避難人員需摸黑前進
1~2m	幾乎看不見前方
<1m	火災旺盛期之濃度，幾乎完全看不見，誘導燈也看不見

2.1.7 火源設計

火源的設計對於建築物的煙控系統而言具有重大的影響。一般在火源的設計上可分為穩態火源 (Steady Fire) 和非穩態火源 (Unsteady Fire)，而燃燒的物質也會影響火源熱釋放率的成長，表 2.6 為不同物質的最大熱釋放率。

1. 穩態火源

穩態火源是將其熱釋放率設為固定值，一般在應用上，通常採用穩態火源作為明確且保守的設計。學者 Morgan 建議將商業、住宅區每單位樓層面積之熱釋放率視為 500 kW/m^2 ，而辦公室建築每單位面積之熱釋放率視為 225 kW/m^2 ，在特殊大空間建築中，則將擁有可燃物之大空間建築每單位面積之熱釋放率視為

500 kW/m²，而可燃物有限之大空間建築之每單位面積之熱釋放率則視為 225 kW/m²。

表 2.6 不同物質之最大熱釋放率

火源燃燒種類	最大熱釋放率 (kW)	資料來源
紙類	18	Karlsson 等人， 1999
棉織品	117	
電器類	290	
木材、甲醇類	650	
機車	1,000	張尚文等人，2006
汽車	5,000	PIARC，1999

2. 非穩態火源

一般自然情況下的火源都屬於非穩態火源，非穩態火源會隨著時間變化而改變熱釋放率，火災初期，火源可充分地使氣流流動，此時其熱釋放率由燃燒體之型式、數量及外型輪廓來決定。

火源在潛伏期內燃燒的熱釋放率非常低，當火源成長至一臨界點後，其熱釋放率會與時間的平方成正比，如圖 2.10 火源成長曲線所示，可將此狀況表示成理想化的拋物線方程式如公式 (2-1) 所示。

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_0)^2 \quad (2-1)$$

其中 \dot{Q} ：火源的熱釋放率 (kW)

α ：火源之成長速率 (kW/s²)

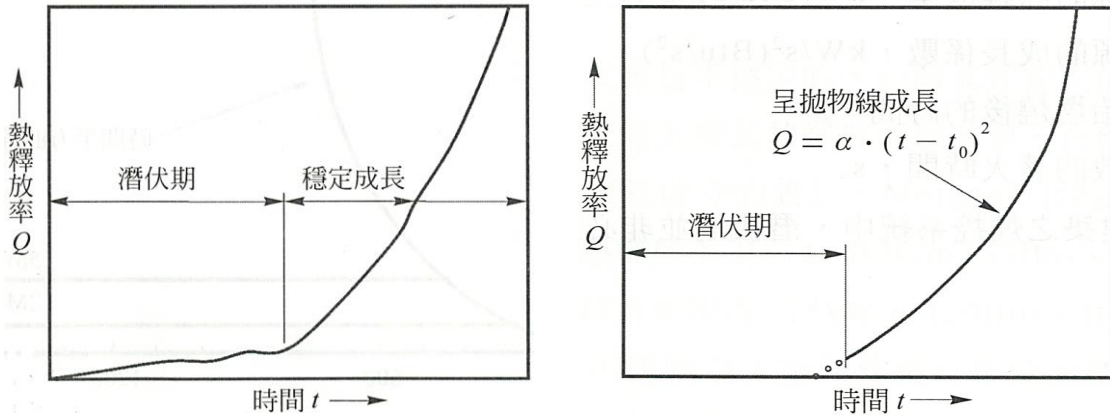
t：開始燃燒後之時間 (s)

t₀：潛伏期之時間 (s)

而在特殊大空間建築之煙控系統中，潛伏期並非必要考慮之因素，所以上式可簡化為公式 (2-2) 所示。

$$Q = \alpha t_g^2 \quad (2-2)$$

其中 t_g ：有效燃燒後之時間 (s)



(a) 典型火源成長曲線

(b) 理想二次火源成長曲線

圖 2.10 火源成長曲線

將此簡化式稱為「T-Squared Fires」。NFPA92B 廣泛的使用成長時間的觀念，成長時間 t_g 定義為有效燃燒之成長至 1,055 kW 以後之時間，T-squared 火源依其成長速率又可區分成 Ultra-fast、Fast、Medium、Slow 等四種成長曲線，如圖 2.11 所示，四種火源成長模式的係數與時間於表 2.7 所示。

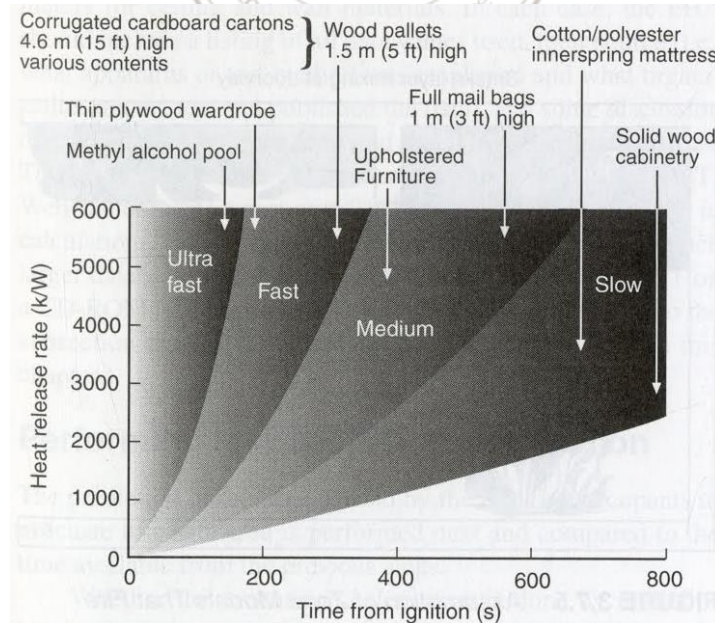


圖 2.11 T-squared fires 火源成長曲線圖

表 2.7 火源成長模式的係數

T-squared fires 的火源區	火源成長係數 α (kW/s ²)	火源成長時間 t_g (s)
極快速 (Ultra-Fast)	0.1878	75
快速 (Fast)	0.04689	150
中等 (Medium)	0.01172	300
緩慢 (Slow)	0.002931	600

3. 無因次參數

無因次參數有助於辨別不同大小格點配置對於 CFD 模擬結果的影響，目前應用於火災行為的無因次參數仍然未有相當完整的建立，以下將介紹幾項已廣泛應用的無因次參數。用來描述火源直徑大小的熱釋放率無因次參數 Q_D^* (Heat Release Rate Based on Burner Diameter) 可由式 2-3 表示：

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g D D^2}} \quad (2-3)$$

其中 \dot{Q} ：熱釋放率 (kW)； ρ_0 ：空氣密度 (kg/m³)； C_p ：空氣比熱 (kJ/kg-°C)； T_0 ：環境溫度 (°C)； g ：重力加速度 (m/s²)； D ：油盤直徑 (m)。

一般而言， Q_D^* 的值在 0.1~1.0 之間，但大多數的建築火災中火源直徑多為 0.1 m 到 2 m 之間，而相對應的 Q_D^* 都在 0.3~3.0 之間。任何 CFD 軟體在格點尺寸選擇上對於模擬結果而言是相當需要謹慎考慮規劃的，透過無因次參數分析格點配置後，可在模擬上可得到更準確的數值。

Baum *et al.* 在研究中提到火源位置附近至少需要 10 × 10 個以上的格點分割，能幫助了解火源位置附近格點尺寸大小的模擬解析度無因次參數 R^* (Resolution of Simulation) 如式 2-4 所示：

$$R^* = \frac{\max(\delta_x, \delta_y, \delta_z)}{D^*} \quad (2-4)$$

δ_i ：i 方向上之格點大小，其特徵長度無因次參數 D^* ，如式 2-5 所示：

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} = (\dot{Q}_D^*)^{2/5} \cdot D \quad (2-5)$$

其中 \dot{Q} ：熱釋放率 (kW)； ρ_0 ：空氣密度 (kg/m^3)； C_p ：空氣比熱 ($\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$)；

T_0 ：環境溫度 ($^\circ\text{C}$)； g ：重力加速度 (m/s^2)

若採用 D^* 為長度尺度， $\sqrt{gD^*}$ 為氣流速度尺度 (velocity scale)， $\sqrt{D^*/g}$ 為時間 (time scale)，將所有非黏滯項的物理常數消除後，僅雷諾數 (Reynolds number) 及卜蘭特數 (Prandtl number) 出現在黏滯應力項及熱傳導項。

學者 Baum 等人曾於長 45 公尺、寬 45 公尺、高 22 公尺的飛機棚內進行燃燒實驗，並在其中中心放置熱釋放率 15 MW，尺寸 3 m × 3 m 之 JP-5 燃料以便模擬火源燃燒情形。該研究之模擬網格配置為 180 × 180 × 90，網格總數共 2,916,000 格。作者將預測之火源中心軸流速及溫度與 McCaffrey 提出之火源中心軸氣流速及溫度關係式進行比較。McCaffrey 關係式如公式 (2-6)、(2-7) 所示：

$$\frac{2g\Delta T}{T_0} = \left(\frac{K}{C} \right)^2 \left(\frac{Z}{Q^{5/2}} \right)^{2\eta-1} \quad (2-6)$$

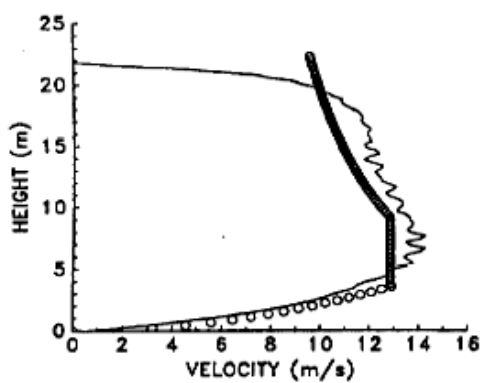
$$\frac{V}{Q^{5/2}} = K \left(\frac{Z}{Q^{5/2}} \right)^\eta \quad (2-7)$$

其中 C ：浮力常數； K ：表中心軸關係式係數； Z ：火源上方高度 (m)；

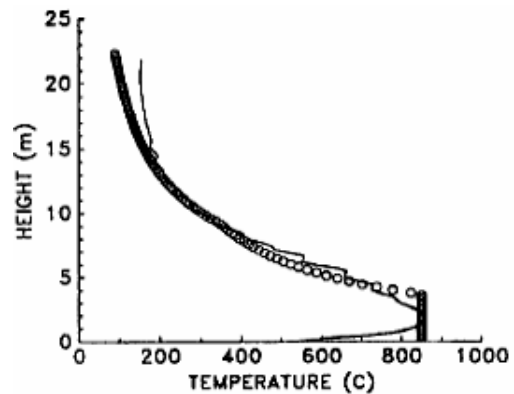
Q ：熱釋放率 (kW)； ΔT ：環境溫差 ($^\circ\text{C}$)； T_0 ：環境溫度 ($^\circ\text{C}$)；

V ：氣流速度 (m/s)；。

由比較結果顯示，FDS 可精確模擬單一火源溫度及氣流速度之變化。Baum 等人並提出若欲正確的模擬單一火災煙流燃燒的情形，格點尺寸以 $0.1D^*$ 之尺度最為合適，如圖 2.12 所示。



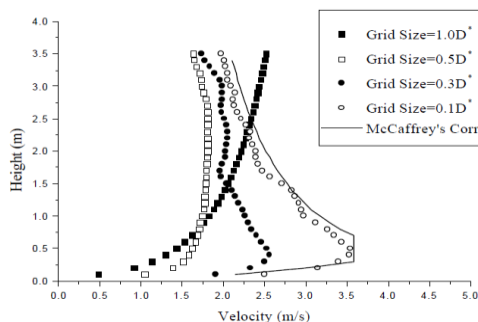
(a) 中心軸氣流速度之比較



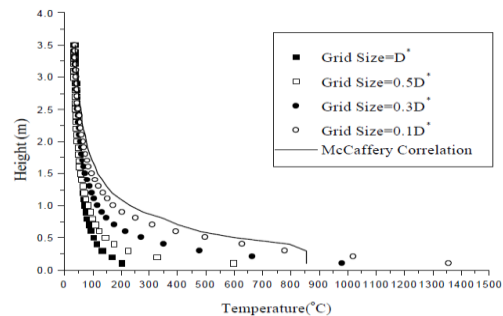
(b) 溫度之比較

圖 2.12 火源 15MW 之 JP-5 模擬 (實線) 與 McCaffrey 關係式 (圓圈) 比較

國內學者李訓谷運用 FDS v1.0 來預測特定建築物內之火災煙流及熱傳。作者認為 FDS 模擬之預測精準與否取決於格點的解析程度，格點的尺寸需小於一定尺度才可以使 FDS 內含之 SGS 次格點應力模式 (subgrid-scale stress model) 精確地計算出流場的黏滯應力 (viscous stress)。文中以火源特徵直徑 D^* 為基礎，以驗證 FDS 預測結果之準確度與 D^* 之關係。作者利用一個 $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 的燃燒油盤 (熱釋放率 = 24 kW) 來測試格點的解析度。由圖 2.13 之結果可知，唯有當格點尺寸為 $0.1 \times D^*$ 時，FDS 模擬之時間平均軸心速度與溫度才會與 McCaffery 的實驗回歸公式吻合。



(a) 時間平均軸心速度



(b) 時間平均軸心溫度

圖 2.13 不同格點之比較 (熱釋放率=24kW)

Mammoser 採用 Suzuki 等人的文獻利用七樓建築物之七分之一縮小尺寸實驗案例，以 FDS v1.0 來評估居室陽台構造對火災垂直延燒行為之影響。模擬前為評估格點配置對溫度模擬之影響，以三層樓為對象（計算區塊 $1.22\text{ m} \times 9.3\text{ m} \times 1.31\text{ m}$ ），於一樓放置 48 kW 之丙烷火源，分別進行四種格點配置之（ $40 \times 32 \times 48$ 、 $60 \times 48 \times 72$ 、 $81 \times 64 \times 96$ 、 $90 \times 72 \times 108$ ）模擬分析，再記錄二樓（FF+1）及三樓（FF+2）之溫度變化情形。在比較溫度穩定程度及模擬時間後，作者決定以 $81 \times 64 \times 96$ 作為最終之格點選用依據。

該研究之實驗與模擬比較結果如圖 2.14 與圖 2.15 所示。以圖中 (c) 與 (h) 為例，顯示在二、三樓中間處實驗值溫度為 $100\sim 200^\circ\text{C}$ ，模擬值則略有低估約為 $50\sim 135^\circ\text{C}$ ；在火源房間處，則低估為 $90\sim 150^\circ\text{C}$ 。該研究結論指出 FDS 輻射熱模式因只考慮火源本身熱源輻射回饋，並無考慮氣體與氣體間及牆與牆間之相互反應，所以造成氣體溫度之低估現象。

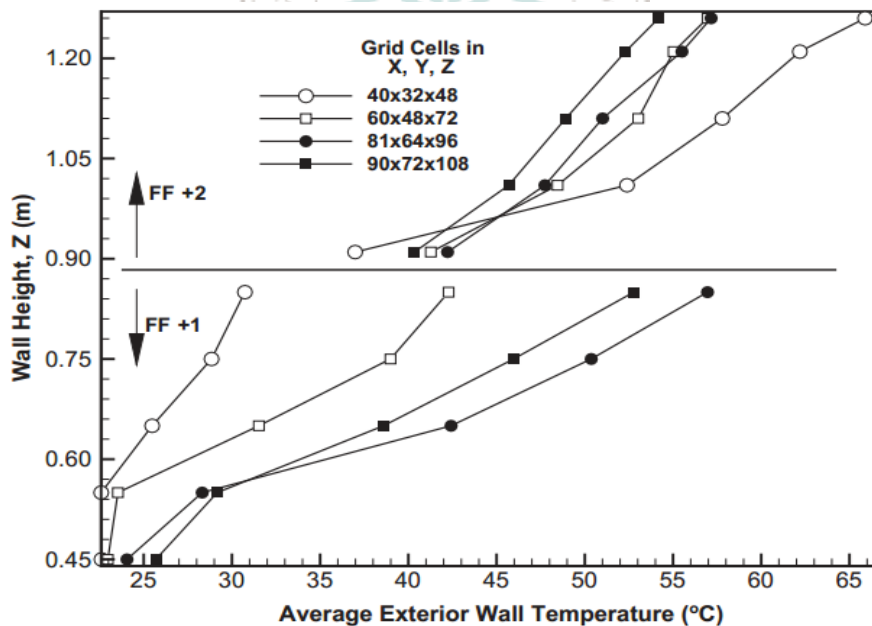


圖 2.14 熱釋放率 48 kW 居室陽台格點分析結果

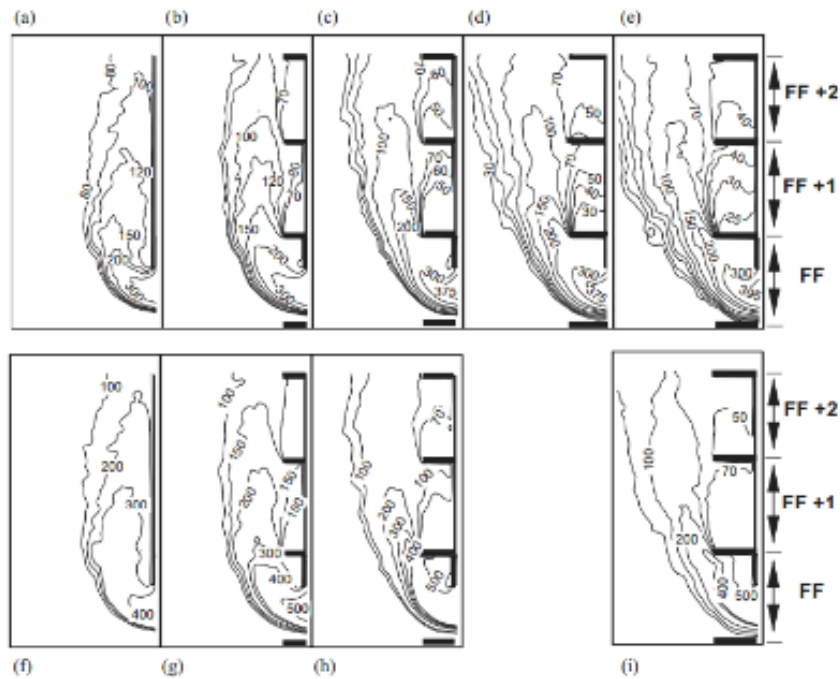


圖 2.15 熱釋放率 48 kW 居室陽台模擬(a)-(e)與實驗(f)-(i)之火場溫度結果

2.1.8 煙層控制與安全之判定原則

進行建築物性能式煙控系統設計時其設計之煙層控制與安全判定原則可參考內政部建築研究所之「大空間建築火災性能式煙控系統設計與應用手冊」為準，其主要的設計目標如下所示，重點為：

1. 保持煙層底部於預定之高度，一般為最高樓層人員站立後之呼吸線高度以上，再酌加安全裕度。
2. 提供充分之時間，維持無礙之避難路徑與情況 (Tenable Condition)，使人員到達出口或避難區域。此條件共分為五大要項：

(1) 溫度

火場溫度假設人員於短時間內通過火場，允許之溫度為不高於 60°C ，最初 6 分鐘允許暴露之平均溫度為 49°C ，該手冊以人員逃生避難空間不高於 60°C 為判定基準。

(2) CO 濃度

CO 濃度假設人員於短時間內通過火場，允許之最高濃度為 2,000

ppm，最初 6 分鐘暴露平均濃度不大於 1,500 ppm，最初 15 分鐘基準平均濃度不大於 800 ppm，其餘條件暴露平均濃度不大於 50 ppm。該手冊採用人員逃生避難空間濃度小於 1,500 ppm 為判定基準。

(3) 能見度

煙之能見度要求，在有照明（80 lux）的避難標誌，能辨識的距離為 30 m。門及牆壁能辨識的距離為 10 m。能見度為視力所能辨識之最遠距離。當光線通過火場，強度受到煙的阻擋而衰減，其計算方法為：

$$\frac{I}{I_0} = e^{-KL} \quad (2-8)$$

其中 I ：光經過一段路徑後之剩餘強度（Cd）

I_0 ：光之初始強度（Cd）

K ：光衰減係數（Light Extinction Coefficient， m^{-1} ）

L ：距離（m）

則能見度（S）的估算可依下列公式計算：

$$S = C/K \quad (2-9)$$

有照明的避難標誌，如避難方向指示燈，較易為眼睛所看到， C 值取為 8；而反光式的避難標誌或一般之地板壁面，則 C 值為 3。一般以 C 值取為 3 為判定基準。

(4) 輻射熱強度

輻射熱強度 q'' （Radiation Heat Flux）假設在人員於短時間內通過火場，允許暴露值最大為 $6,305 \text{ W/m}^2$ ，最初 6 分鐘允許暴露平均強度 $1,576 \text{ W/m}^2$ ，其餘條件之暴露平均強度為 946 W/m^2 。本部分以人員逃生避難空間小於 $6,305 \text{ W/m}^2$ （或 6.3 kW/m^2 ）為判定基準。

(5) 煙層底部高度

此項目一般設計規範，將煙層底部高度訂於不得低於 1.8 公尺，乃考慮人員呼吸線位置；亦有較嚴格之規定，為離地 2.1 公尺。在此煙層底部高度不得低於 1.8 公尺為判定基準。

以上性能判定基準乃依據澳洲建築法規委員會 (Australian Building Codes Board)，紐西蘭建築及住宅部 (Department of Building and Housing New Zealand) 加拿大國家研究評議會暨國際法規評議會 (International Code Council and the National Research Council of Canada) 所共同頒布之國際火災工程指引 (International Fire Engineering Guidelines)。

因此依據以上所述，建研所將性能式煙控系統設計中有關人員逃生避難空間之性能式判定基準，整理如表 2.8 所示。

表 2.8 性能式煙控系統設計之模擬結果判定標準

項目	內 容	判定基準
1	人員逃生避難空間之溫度	$< 60^{\circ}\text{C}$
2	人員逃生避難空間之 CO 濃度	$< 1,500 \text{ ppm}$
3	人員逃生避難空間之能見度	$> 10 \text{ m}$
4	人員逃生避難空間之輻射熱強度	$< 6.3 \text{ kW/m}^2$
5	人員逃生避難空間之煙層淨高	離地 1.8m 以上

以上 5 項之性能判定準則已經於國內數十個大空間建築煙控系統設計案例實證過：包括國際機場航站大廈、巨蛋球場、購物中心、台鐵地下車站、高鐵車站、台北都會區捷運系統車站、高雄都會區捷運系統車站，以及高科技產業之大型無塵室等，並獲得良好成果。尤其高雄都會區捷運系統等為數約數十個地下車站進行煙控與避難系統電腦模擬時亦皆以此為判定基準，與國外先進國家之工程技術亦不惶多讓。

2.1.9 煙控系統設計

排煙系統屬於建築物設備之一，於國外亦有歸類於溫控通風空調（HVAC）設備之一種。因此，美國冷凍空調學會 ASHRAE 之學者 John H. Klotz 指出，美國官方有系統的研究火災煙控項目，開始於 1939 年之火災保險商全國委員會（National Board of Fire Underwriters, NBFU）。美國國家防火協會（National Fire Protection Association）中制定了將近兩百多種適用於各種建築物採用的法規，其中包含：NFPA 92A—採用防煙壁及壓差作為煙控系統之標準，2006 年版（Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences, 2006 Edition）為一般典型建築物所適用，其主要涵括範圍即為「專用」與「非專用」煙控系統的設計、安裝、測試等準則，為國際間知名之煙控系統法規。對於排煙之型式應以何種為佳，需依據現場狀況，並經由計算後方能選出最佳方式。

2.1.9.1 自然排煙

自然排煙方式係利用高溫煙氣的浮力作用，由各房間開口或門窗，自然向外界排放濃煙。對於煙的排除狀況，必須為室內溫度高於室外，或是室內壓力高於室外，煙氣即自然排出，在此同時，補充的空氣將由火場下方流入，形成局部對流情形。自然排煙方式的優點在於因藉由濃煙與一般空氣的溫度差與壓力差，產生之浮力將使濃煙自然向外流出，設備極為單純，無須機械設備，費用低、維修容易。同時因無需動力，此設計對於建築物發生火災且電力中斷之情形下，具有極佳優勢。另排煙口在平時亦可做為通風口，在平時亦具有相當之經濟效益。

2.1.9.2 機械式排煙

機械排煙方式係利用排煙機、排煙口、排煙風管所組成，在高層建築物尚包含排煙豎井、送氣豎井等設施，其相對安裝費用與後續維護成本均較自然排煙方式高昂。火災時對房間內之煙濃度以大量外氣做稀釋，於工程上並不容易，同樣的也不是單純的自房間排氣”把煙排掉”，就能達到煙流控制的效果；要達到建築物之煙控制，必須以一整體系統來考慮，系統中必須包括送、排風機、防煙垂壁、壓力差、氣流等，唯有將其良好配合，建築物的煙控制系統才算完成，也才能發

揮效果。缺少任一項，有效的煙流控制都無法形成。目前應用於高層建築之強制式煙控系統，大致上可分為下列三種：

1. 機械式排煙煙控系統 (Mechanical Venting)
2. 梯間增壓化煙控系統 (Stairwell Pressurization)
3. 正負壓區劃煙控系統 (Zoned Smoke Control)

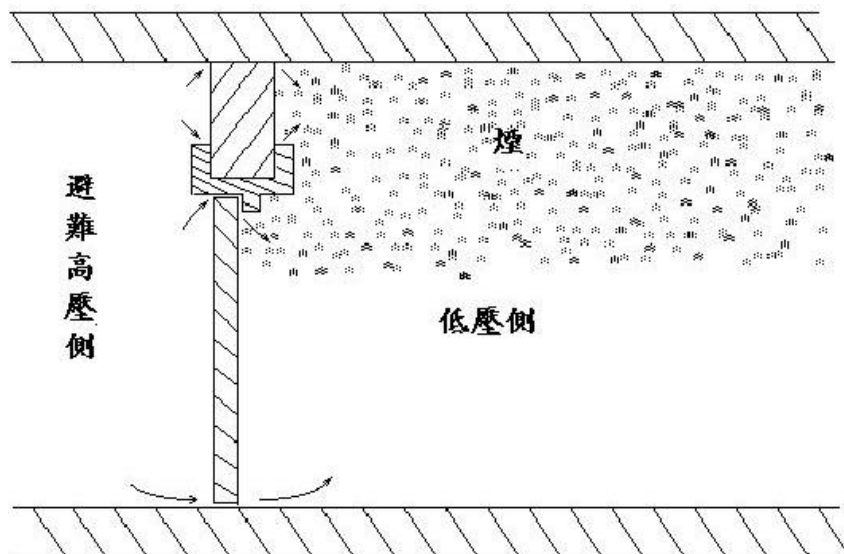


圖 2.16 增壓化以阻止煙自門縫洩漏示意圖

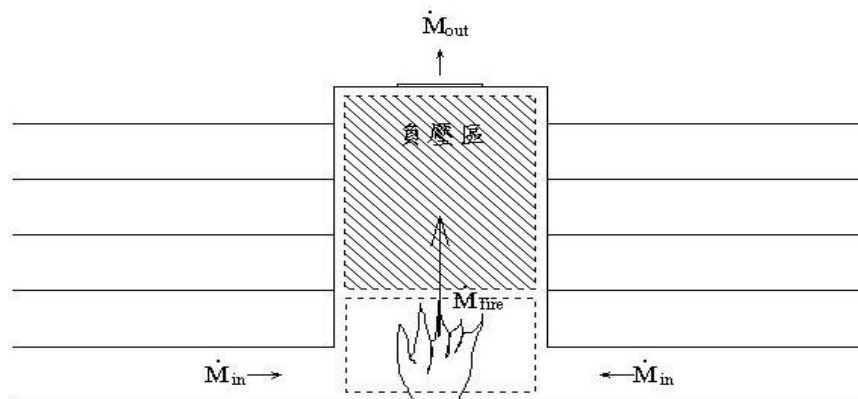


圖 2.17 減壓化使煙排出建築物外示意圖

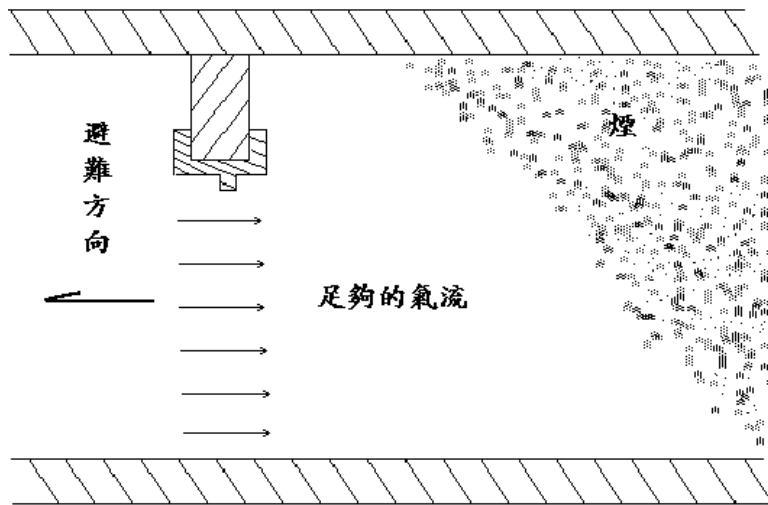


圖 2.18 以足夠速度的氣流阻擋煙之蔓延示意圖

火場燃燒時產生濃分布區域如圖 2.19 所示，可利用三種控制方法，即（一）加壓化、（二）減壓化、（三）產生適當氣流組織，前兩者主要概念即在於—為了利用壓力差，可以將建築物內部區域分成數個「煙控區」（Smoke Control Zones），當中可以使用單一樓層或數個樓層為單一區域，也可以將某一樓層區分為數個區域，不同區域間的劃分，主要是利用排煙風門（Smoke Damper）、氣密門窗（Airtight Doors and Windows）及防煙壁（Smoke-Proof Barrier）進行區隔。

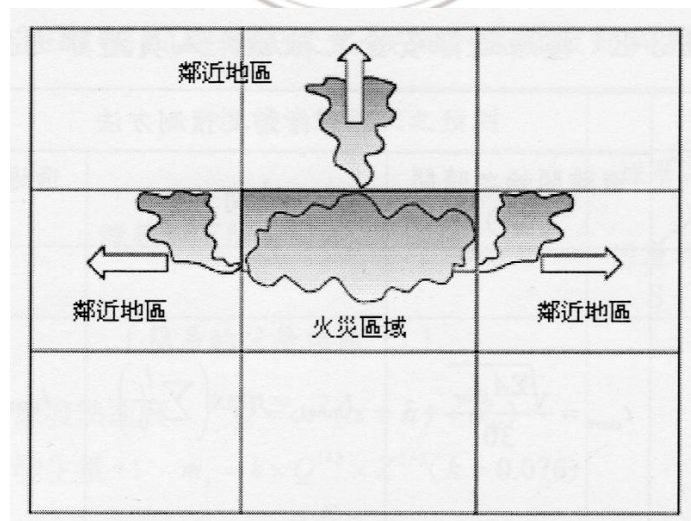


圖 2.19 濃煙分布區域分析圖（立體截面圖）

1. 濃煙局部排洩方式 (Smoke Purge)

火災發生後，採用局部排洩方式將濃煙排除，目前常見法規所規定之排煙設備，即為此種原理，如圖 2.20。當中除專用排煙系統外，另涉及通風空調系統之回風設備兼用之排煙技術，雖然因此需增加設備耐熱、耐火等級，然而對高層建築而言，如可減少設備裝置空間，進而降低整體興建成本，在國外是如此規劃設計的。

此方式對於避難時間上之爭取，主要為在火災發生初期將形成火柱 (Fire Plume)，煙將因浮力現象往上竄流，藉由向上之排煙方式，可將產生的濃煙排除外，同時可以在上方空間形成負壓區，減緩濃煙之擴散，身處火場者將可順利逃生。

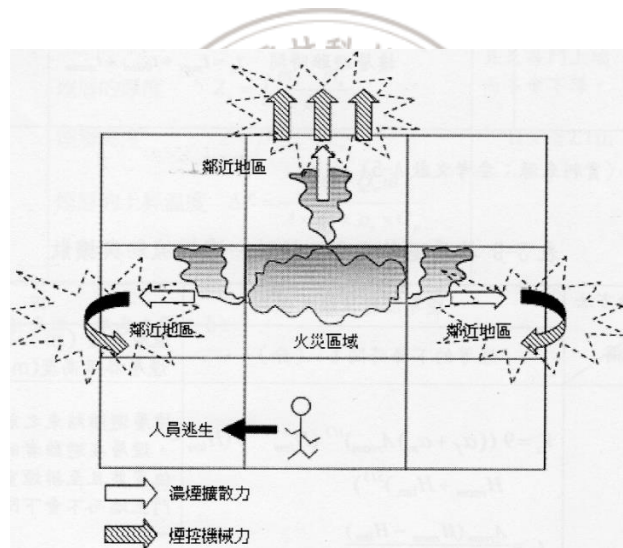


圖 2.20 濃煙局部排放方式示意圖

2. 核心式加壓 (Core Pressurization)

當火災發生一段時間後 (數分鐘後)，若火勢尚未能即時撲滅，為將逐漸增多之濃煙控制於某區域，避免擴散至同樓層其他位置，因此採用「核心式加壓」方式進行煙控策略，如圖 2.21，此時將起火樓層區分為數個不同壓力分布區域，藉由彼此壓力不同，將濃煙區劃擴散情形加以控制。所利用之設備包含排煙風門、氣密門窗及防煙壁，把濃煙控制於單一區域。

此種排煙方式對於避難時間上之爭取，為已把濃煙局部控制於某一區域 (smoke zone)，無法擴散至同一樓層其他位置，如此濃煙將不會妨礙人員逃生行為，身處離起火點較遠、但仍位於火災樓層者，將可順利逃生。

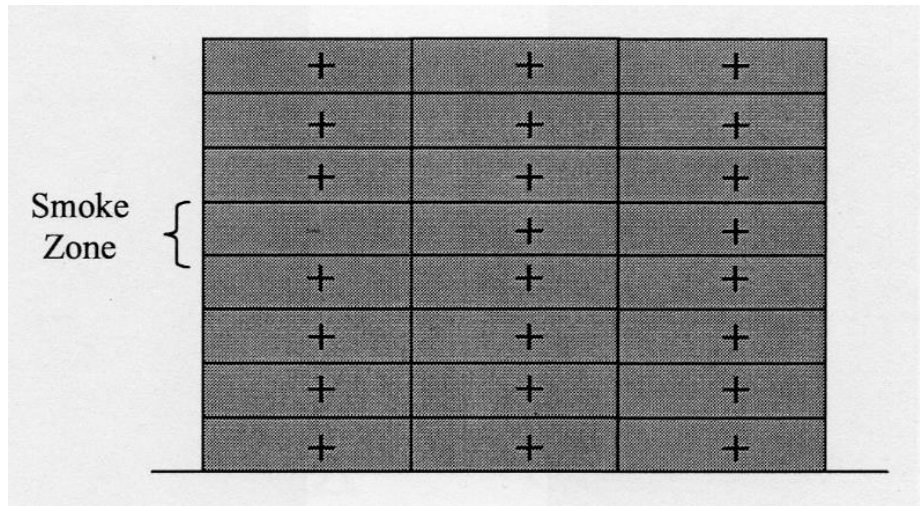


圖 2.21 建築物樓層區劃煙控系統圖 (核心式加壓系統)

3. 三明治式加壓 (Sandwich Pressurization)

當火災發生較長之時間後(數十分鐘後)，或是濃煙確定已經擴散至其他樓層，此時將採「三明治式加壓」之排煙方式。主因於高層建築物內部通常構造較為複雜，同時人員亦極為眾多，若未規劃適當之煙控策略，將造成避難時整棟大樓嚴重的恐慌。

此時將以樓層為單位，劃分濃煙控制區域 (如圖 2.22 所示)，將整棟樓層化分成數個不同壓力分佈的區域，其中將以起火樓層為負壓區，上下樓層為正壓區，藉此彼此壓力不同，將濃煙擴散至各樓層情形加以控制，以避免其他樓層人員避難逃生時受到阻礙。

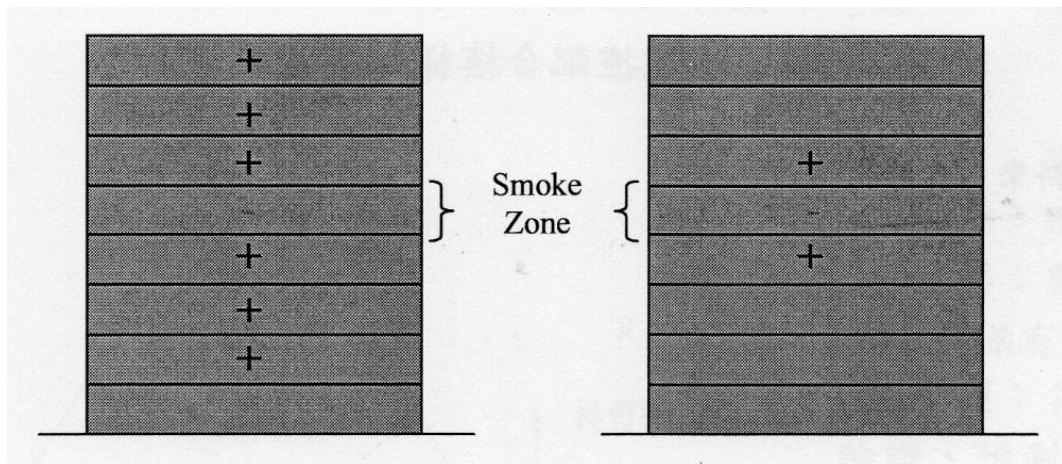


圖 2.22 樓層區劃正負壓煙控系統圖

本排煙方式使用時機主要為起火樓層已無人員停留，均已離開火場，因此將可以進行其他樓層之避難行為，不致引起恐慌，同時將可提供消防搶救人員良好的搶救指揮中心。

2.2 氣簾介紹及應用

氣簾（或稱空氣幕、風幕機、風閘、風門）是一種機械裝置，一般裝在門上，可將室內與室外的空氣做隔絕，達到防止灰塵，節省冷氣的效果。在超市、百貨公司等地方有時可看到此裝置存在。

一般商家為了方便與吸引顧客上門消費，通常大門口都設置成敞開式，此舉不僅造成室內空調外洩與室外熱氣進入，增加額外空調負荷外，更增加可觀之能源耗費。一般分為如下三大類型：

1. 防止冷氣外流需求為主
2. 隔絕蒼蠅蚊蟲進入
3. 阻擋灰塵廢氣流入



圖 2.23 氣簾安裝示意圖

2.2.1 氣簾的基本原理

氣簾在門產生一沿門方向的向下氣流，從白努利定理得知由於流線不可穿過彼此，當一氣流打到垂直平面後會產生停滯點，而氣流會從停滯點分開。此原理應用在空氣門上，空氣門產生的氣流打到地板，在地板形成一停滯點連線，使得室內氣流的流線不與室外氣流流線交會，因此使室內與室外的空氣不產生交換 [13]。

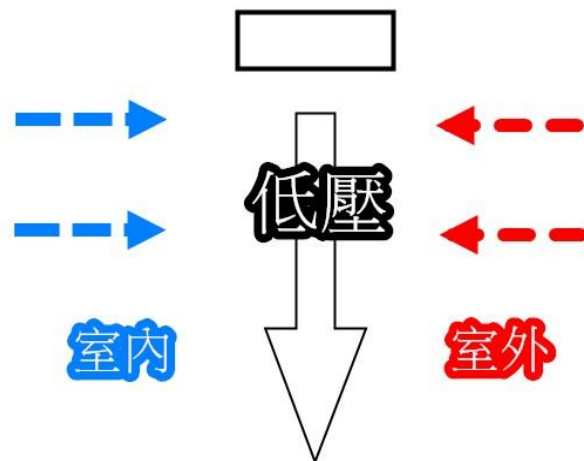


圖 2.24 室內與室外空氣達平衡示意圖

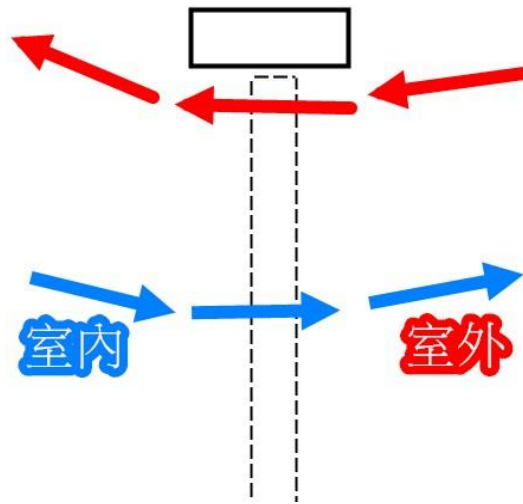


圖 2.25 無空氣門噴射氣流時產生之對流示意圖

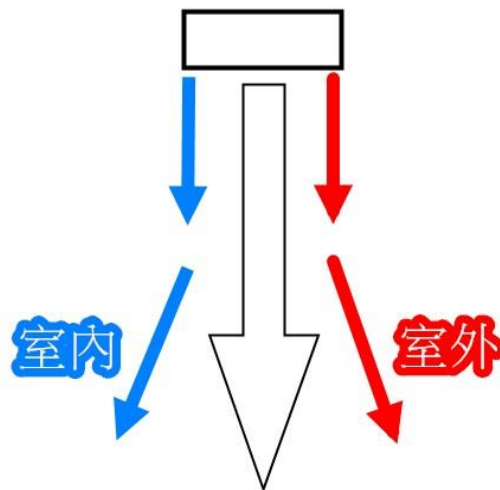






圖 2.26 使用空氣噴射氣流室外空氣將獨立流動示意圖

2.2.2 氣簾種類

氣簾種類我們可依照裝配的方式不同分成天花板機、極簡離心機、雙氣流機、工業型高風壓機如表 2.9 所示

表 2.9 依照裝配方式將空氣門進行分類^[14]

裝配方式	特徵	圖片
天花板機	機體嵌入天花板內，回封面板可調整和天花板平行、百貨公司、西餐廳等要求裝潢的整體性場所。	
極簡離心機	適用於診所、辦公室、精品店等要求噪音值 55dB 場所	
雙氣流機	適用於診所、醫院、辦公室、西餐廳等要求低噪音場所。	
工業型高風壓機	適用於焚化爐、汙水處理廠、冷凍廠、紡織廠等場所。	

2.2.3 氣簾速度之影響

影響空氣門效率的因素有場所出入口高度及遮斷高度、氣簾速度...等，如表 2.10 所示，說明氣流量的大小會影響阻隔外界氣流的效率，另一方面也依據氣象局風力等級表(自然界的影響)，了解各風力等級下所造成的影響。

表 2.10 氣簾不同速度之影響示意圖^[14]

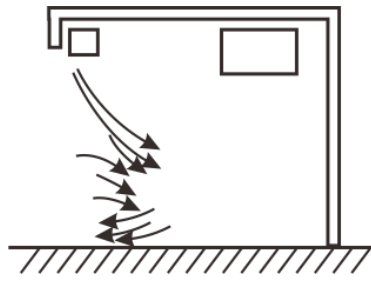
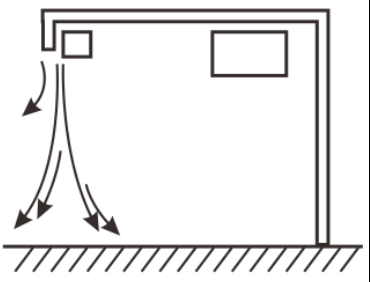
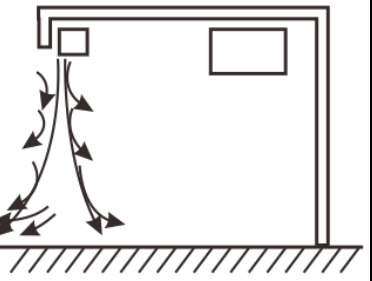
太弱	適度	太強
		
氣流太弱，形成自然對流，破壞氣簾，外氣會侵入	適度之氣流量，依適用場所及門之高度，有適當之參考數值依據	氣流太強會形成亂流，冷熱氣會混雜

表 2.11 蒲福風級表(台灣颱風資訊中心)^[15]

級數	國際標準 (由 WMO 公佈)		陸地情形； 海面情形
	名稱	風速(m/s)	
0	無風 Calm	0 - 0.2	靜，煙直上； 海面如鏡。
1	軟風 Light air	0.3 - 1.5	炊煙可表示風向，風標不動； 海面有鱗狀波紋，波峰無泡沫。
2	輕風 Light breeze	1.6 - 3.3	風拂面，樹葉有聲，普通風標轉動； 微波明顯，波峰光滑未破裂。
3	微風 Gentle breeze	3.4 - 5.4	樹葉及小枝搖動，旌旗招展； 小波，波峰開始破裂，泡沫如珠，波峰偶泛 白沫。
4	和風 Moderate breeze	5.5 - 7.9	塵沙飛揚，紙片飛舞，小樹幹搖動； 小波漸高，波峰白沫漸多。
5	清風 Fresh breeze	8.0 - 10.7	有葉之小樹搖擺，內陸水面有小波； 中浪漸高，波峰泛白沫，偶起浪花。
6	強風 Strong breeze	10.8 - 13.8	大樹枝搖動，電線呼呼有聲，舉傘困難； 大浪形成，白沫範圍增大，漸起浪花。
7	疾風 Near gale	13.9 - 17.1	全樹搖動，迎風步行有阻力； 海面湧突，浪花白沫沿風成條吹起。
8	大風 Gale	17.2 - 20.7	小枝吹折，逆風前進困難； 巨浪漸升，波峰破裂，浪花明顯成條沿風吹 起。
9	烈風 Strong gale	20.8 - 24.4	煙突屋瓦等將被吹損； 猛浪驚濤，海面漸呈洶湧，浪花白沫增濃， 減低能見度。
10	暴風 Storm	24.5 - 28.4	陸上不常見，見則拔樹倒屋或有其他損毀； 猛浪翻騰波峰高聳，浪花白沫堆集， 海面一片白浪，能見度減低。
11	狂風 Violent storm	28.5 - 32.6	陸上絕少，有則必有重大災害； 狂濤高可掩蔽中小海輪，能見度大減。
12	颶風 Hurricane	32.7 - 36.9	空中充滿浪花白沫，能見度惡劣。

2.2.4 氣簾規格之介紹

氣簾類型有很多種包括了天花板、極簡離心機、雙氣流機、工業型高風壓機和工業型防爆機...等，我們簡單介紹幾個常用的規格如表 2.12 所示，尺寸長度通常在 0.9 至 1.5 公尺，因為機型不同，風量、風速及風量射程也各不同，通常是按安裝場所以及實際應用而有所不同，如表 2.9 有詳細列出各機型適用之場所。

表 2.12 各氣簾機型規格介紹表^[14]

機型	長度(公尺)	輸入功率(W)	風速(m/s)	風量(m ³ /hr)	風量射程(m)
天花板機	0.9~1.5	250~445	13~16.5	1000~2150	2.5~3.5
極簡離心機	0.9~1.5	230~400	12.5~16	900~1900	2.5~3.5
雙氣流機	0.9~1.5	150~250	7~9	1050~2240	2.5~3
工業型高風壓機	0.9~1.2	781~1094	25	6400~8900	7

2.2.5 氣簾之應用

前述我們綜合提及氣簾在生活日常上的應用，若將其細分，可大致分為四類應用：

1. 隔熱功能：可使餐廳、商店等顧客經常出入之地方不再需要常開關門，能以 60~80%效率來保持室內冷暖空氣溫度。
2. 防蟲功能：發現有大量煩人有害的昆蟲，因氣流阻擋無法飛進氣簾。
3. 防塵功能：如果在精密的機械工廠或面對公共汽車道的商家會裝置氣簾，可有效屏蔽外面的灰塵。
4. 負離子功能：能製造活性氧、改善肺功能、促進新陳代謝、殺菌等。

除了以上幾種功能應用，高層建築內一般設有樓梯間、電梯井、管道井、電

纜井、排風道等諸多豎井，這些豎井貫穿於若干或所有樓層，如果防火分隔或防火處理不好，火災時煙氣一旦進入其中，在煙囪效應、浮力、膨脹力、室內空調系統、外界風力的共同影響下，將使火勢迅速擴大，煙氣迅速蔓延。因此，在高層建築中採取恰當、有效的擋煙與排煙措施，對控制煙氣蔓延、延長人員可用疏散時間、保證疏散通道暢通有重要意義。

目前高層建築採用的防火隔斷物一般為防火門、防煙垂壁等剛性隔斷物，這些隔斷物雖然防煙效果好，但不利於人員疏散和撲救人員的進入，故國內外不少學者提出採用氣簾作為防煙設施。氣簾最早用於通風工程中，用於防排煙則開始於 20 世紀 80 年代。日本消防協會對防煙氣簾的研究已走在世界前列，80 年代初開始的防煙氣簾實驗研究已取得了較為滿意的效果。美國在 90 年代初開始研究防煙氣簾，歐洲國家在這方面的研究當時也處於起步狀態。我國在防煙空氣幕的研究方面起步較晚，尚處於探討階段，並未將其推廣到工程實踐，相關研究主要集中在防煙空氣幕的理論模型的推導方面，而對防煙空氣幕對防煙的主要作用研究較少。

第三章、研究方法

3.1 縮小模型尺度理論

一般實驗室考慮到成本與空間因素，關於流體力學之研究在實驗室內無法進行 1:1 尺寸實驗，所以根據相似理論 (Similarity law) 利用模型測試來模擬實際流體的流動狀態，藉由適當縮小尺度模型實驗，用以獲得最接近真實的模擬流場以預測全尺度原型之部分流場現象。

謝蕙如指出^[16]：模型的縮小尺度比例 ($l_m:l_f$) 相當重要 (其中 l_m 表示小尺度長度, l_f 表示全尺度長度)，將實際煙流動狀態轉換成縮小尺度模型之尺度法則 (Scaling law) 包含福勞德模型 (Froude modeling)、壓力模型 (Pressure modeling) 和類比模型 (Analog modeling)。其中 Froude modeling 是指縮小尺度和全尺度之福勞得數 (Froude number; Fr) 保持一定；Pressure modeling 則是福勞得數 (Fr) 和雷諾數 (Reynolds number; Re) 保持一定；Analog modeling 是使用不同的流體模擬煙氣之熱浮力現象，例如鹽水或淡水。以 Pressure modeling 和 Analog modeling 為基礎之縮小尺度，模型實驗在實際建造與量測上需要相當的成本與技術，因此一般大都是利用 Froude modeling 為基礎之縮小模型應用於模擬煙流動現象。縮小尺度模型採用 Froude modeling，除了滿足幾何相似及運動相似，在動力相似條件因為火災煙柱之主要因次參數為福勞得數 (Fr)，故假設模型與原型間之福勞得數 (Fr) 相同，其餘動力條件則為忽略之失真模型。

3.1.1 無因次群之組合

火災煙柱的一維方向統御方程式可表示如下：

質量守恆方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (3-1)$$

垂直方向的動量守恆方程式：

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p'}{\partial x} + g(\rho_0 - \rho) + \frac{4}{3}\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3-2)$$

能量守恆方程式：

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - 4\kappa\sigma T^4 + \int_0^{4\pi} \kappa I d\omega + \dot{Q}''' + \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3-3)$$

理想氣體方程式：

$$p = \rho RT \quad (3-4)$$

定義各物理量之無因次變數如下：



$$\hat{x} = \frac{x}{l}$$

$$\hat{u} = \frac{u}{V}$$

$$\hat{p} = \frac{p}{p_*}$$

$$\hat{p}' = \frac{p'}{p_*}$$

$$\hat{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3-5)$$

$$\hat{T} = \frac{T}{T_0}$$

$$\hat{t} = \frac{t}{\tau}$$

$$\hat{Q} = \frac{Q''' l}{\rho_0 V C_p T_0}$$

$$\hat{I} = \frac{I}{\sigma T_0^4}$$

其中 l : 幾何長度 (m); V : 特徵速度 (m/s); τ : 特徵時間 (s); T_0 : 環境溫度 (°C);
 P_0 : 環境壓力 (N/m²); P^* : 特徵壓力缺陷 (N/m²) ($p^* = \rho V^2$)

將上述無因次參數分別替代統御方程式並重新排列，則無因次統御方程式可推導如下：

質量守恆方程式：

$$\begin{aligned} \frac{l}{V\tau} \cdot \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial(\hat{\rho} \cdot \hat{u})}{\partial \hat{x}} &= 0 \\ \pi_1 \cdot \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial(\hat{\rho} \cdot \hat{u})}{\partial \hat{x}} &= 0 \end{aligned} \quad (3-6)$$

能量守恆方程式：

$$\begin{aligned} &\hat{\rho} \left(\frac{l}{V\tau} \cdot \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{x}} \right) \\ &= \frac{\mu}{\rho_0 V l} \cdot \frac{k}{\mu C_p} \cdot \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\mu}{\rho_0 V l} \cdot \frac{k}{\mu C_p} \cdot (\kappa l) \\ &\quad \cdot \frac{\sigma T_0^3 l}{k} \left(\int_0^{4\pi} \hat{I} d\omega - 4T^4 \right) + \hat{Q} + \frac{l p^*}{\rho_0 C_p V T_0 \tau} \cdot \frac{l p^*}{\rho_0 V^2} \cdot \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{t}} \\ &\hat{\rho} \left(\pi_1 \cdot \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{x}} \right) \\ &= \pi_4 \cdot \pi_5 \cdot \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{x}^2} + \pi_4 \cdot \pi_5 \cdot \pi_6 \cdot \pi_7 \cdot \left(\int_0^{4\pi} \hat{I} d\omega - 4T^4 \right) + \hat{Q} \\ &\quad + \pi_8 \cdot \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{t}} \end{aligned} \quad (3-7)$$

理想氣體方程式：

$$\begin{aligned}\frac{p}{p_*} &= \frac{\rho_0 T_0}{p_*} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{RT}{T_0} \\ \hat{p} &= \frac{\rho_0 T_0}{p_*} \cdot R \cdot \hat{\rho} \cdot \hat{T} \\ \hat{p} &= \frac{\rho_0 T_0}{p_*} \cdot (C_p - C_v) \cdot \frac{C_p l V \tau}{C_p l V \tau} \cdot \hat{\rho} \cdot \hat{T} \\ \hat{p} &= \frac{\rho_0 C_p T_0 V \tau}{l p_*} \cdot \frac{(C_p - C_v)}{C_p} \cdot \frac{l}{V \tau} \cdot (\hat{\rho} \cdot \hat{T}) \\ \hat{p} &= \frac{1}{\pi_8} \cdot (1 - \pi_9) \cdot \pi_1 \cdot (\hat{\rho} \cdot \hat{T}) \\ \hat{p} &= \left(\frac{1 - \pi_9}{\pi_8} \right) \hat{\rho} \hat{T}\end{aligned}\quad (3-8)$$

由上述無因次統御方程式之無因次群定義如下：

$$\pi_1 = \frac{l}{V \tau} = 1, \quad \tau = \frac{l}{V}$$

$$\pi_2 = \frac{p_*}{\rho_0 V^2} = 1, \quad p_* = \rho_0 V^2$$

$$\pi_3 = \frac{gl}{V^2} = \frac{1}{Fr}, \quad Fr \text{ 為福勞德數 (Froude number; Fr)}$$

$$\pi_4 = \frac{\mu}{\rho_0 V l} = \frac{1}{Re}, \quad Re \text{ 為雷諾數 (Reynolds number; Re)}$$

$$\pi_5 = \frac{k}{\mu C_p} = \frac{1}{Pr}, \quad Pr \text{ 為卜蘭特數 (Prandtl number; Pr)}$$

$$\pi_6 = \kappa l$$

$$\pi_7 = \frac{\sigma T_0^3 l}{k}$$

$$\pi_8 = \frac{l p_*}{\rho_0 C_p V T_0 \tau} = \frac{V^2}{C_p T_0} \quad (\text{由 } \pi_1 \text{ 和 } \pi_2 \text{ 替代換算 } \because \frac{l}{V \tau} \cdot \frac{p_*}{\rho_0 V^2} = 1, \therefore \frac{l p_*}{\rho_0 V \tau} = V^2)$$

$$\pi_9 = \frac{C_v}{C_p}$$

火災煙柱的一維方向無因次統御方程式變為如下：

(1) 質量守恆方程式：

$$\pi_1 \cdot \frac{\partial \hat{\rho}}{\partial \hat{t}} + \frac{\partial (\hat{\rho} \cdot \hat{u})}{\partial \hat{x}} = 0 \quad (3-9)$$

(2) 動量守恆方程式：

$$\hat{\rho} \left(\pi_1 \cdot \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} \right) = -\pi_2 \cdot \frac{\partial \hat{p}'}{\partial \hat{x}} + \pi_3 (1 - \hat{\rho}) + \frac{4}{3} \cdot \pi_4 \cdot \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2} \quad (3-10)$$

(3) 能量守恆方程式：

$$\begin{aligned} & \hat{\rho} \left(\pi_1 \cdot \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{t}} + \hat{u} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \hat{x}} \right) \\ & = \pi_4 \pi_5 \cdot \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial \hat{x}^2} + \pi_4 \cdot \pi_5 \cdot \pi_6 \cdot \pi_7 \left(\int_0^{4\pi} \hat{I} d\omega - 4\hat{T}^4 \right) + \hat{Q} \\ & + \pi_8 \cdot \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{t}} \end{aligned} \quad (3-11)$$

(4) 理想氣體方程式：

$$\hat{p} = \left(\frac{1 - \pi_9}{\pi_8} \right) \hat{\rho} \cdot \hat{T} \quad (3-12)$$

3.1.2 福勞德模型 (Froude modeling)

Froude modeling 是考慮煙流的慣性力和重力之比例。因為煙流之熱浮力為一重力，並且可控制由火源產生之煙流，所以 Froude modeling 之福勞得數 (Fr) 保持固定。因為實驗是於空氣中進行，則無因次參數 π_5 及 π_9 亦也保持固定。並

且不考慮表面的黏性效應，所以將雷諾數 (Re) 予以忽略。但所有熱傳無因次參數 (π_6 、 π_7 、 π_8) 則不可能完全保持固定。將 Froude modeling 運用於縮小尺度之建築模型中，使模型中之各項參數可以透過轉換成全尺度數值，在模型參數與全尺度之縮小尺度法則如表 3.1

表 3.1 縮小尺度法則 (Scaling Law)

全尺度及縮小尺度之比例關係 $l_m:l_f$	
參數	Scaling Expressions
幾何尺寸	$x_m = x_f (l_m / l_f)$
溫度	$T_m = T_f$
密度	$\rho_m = \rho_f$
壓力	$P_m = P_f (l_m / l_f)$
速度	$v_m = v_f (l_m / l_f)^{\frac{1}{2}}$
時間	$t_m = t_f (l_m / l_f)^{\frac{1}{2}}$
對流熱釋放率	$Q_m = Q_f (l_m / l_f)^{\frac{5}{2}}$
體積流率	$\dot{V}_m = \dot{V}_f (l_m / l_f)^{\frac{5}{2}}$
質量流率	$\dot{m}_m = \dot{m}_f (l_m / l_f)^{\frac{5}{2}}$
牆壁、天花板等建材之熱力特性	$(k_{\rho c})_{w,m} = (k_{\rho c})_{w,f} (l_m / l_f)^{\frac{9}{10}}$
$m = \text{small - scale model} ; f = \text{full - scale model} ; l = \text{length}$	

3.1.3 熱釋放率

Blinov 及 Khudiakov 曾針對燃料為碳氫化合物之油池火災 (pool fire)，研究不同油盤直徑之燃燒速率。其研究結果提出燃料之單位面積質量損失率可由量測油盤之燃燒速率並作換算而得到：

$$\dot{m}'' = \rho_1 \cdot R \cdot 10^{-3} / 60 \quad (3-13)$$

其中 \dot{m}'' : 單位面積質量損失率 ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$); ρ_1 : 燃料密度 (kg/m^3) ; R: 燃燒速率 (mm/min)

Babrauskas 研究中指出油盤火焰之熱釋放率與油盤表面積有關，而熱釋放率之大小可以利用燃料質量損失率直接表示，並由許多實驗中歸納出油盤火焰之單位面積質量損失率與油盤直徑之關係式：

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D}) \quad (3-14)$$

\dot{m}'' 、 \dot{m}''_{∞} 分別表示實際油盤及無限大之油盤燃燒單位面積質量損失率，對於不同燃料而言有不同之質量損失率，而此值乃經由實驗計算經過曲線之回歸分析所得，D 為油盤直徑，若油盤為方形或不規則形狀，則以其燃燒表面面積換算出對應此面積之直徑方式求得，計算式中之熄滅吸收係數 k (extinction-absorption coefficient) k 與平均徑長修正因子 (mean-beam-length corrector) β 則與燃料燃燒特性有關，因其燃燒產物及火焰型態結構不同而有所差異，取決於火焰煙氣粒子 (soot) 熱吸收及火焰焰色形成之輻射熱傳行為，一般而言在液態有機燃料中此兩參數之乘積為一固定值，並不得將兩參數分開單獨納入計算式中，將求得之 \dot{m}'' 乘上油盤表面積 A 及每單位質量燃料燃燒熱 Δh_c 後，可得到熱釋放率

$$\dot{Q}_{M,Th} = \dot{m}'' \times A \times \Delta h_c \quad (3-15)$$

油盤火焰之特色為其穩定燃燒過程，當油盆火焰點燃後即迅速反應並成長，

到達完全發展時期(即全盛期)之燃燒模式，維持固定的速率燃燒，並持續一段穩定之長時間至衰退，故可利用測重裝置(load cell)量測此時期質量變化資料繪成質量與時間關係圖，在油盤燃燒實驗中由燃燒中期部分與時間呈現之線性關係求得其質量損失率 \dot{M}_L'' (kg/s)，再乘上汽油的燃燒熱，得到實際之熱釋放率，此為利用實際燃燒質量損失所得到之熱釋放率。

$$\dot{Q}_{M,Th} = \dot{M}_L'' \times \Delta h_c \quad (3-16)$$

表 3.2 Babrauskas 實驗得到的各項燃料參數值

Liquid	Density (kg/m^3)	Δh_c (MJ/kg)	\dot{m}_∞'' ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)	K_β (m^{-1})	k (m^{-1})
Cryogenics					
LNG	145	50.00	0.078	1.1	0.5
LPG	585	46.0	0.099	1.4	0.4
Alcohols					
Methanol	796	19.83	0.017	--	-
Ethanol	794	26.78	0.015	--	0.4
Simple organic fuels					
Butane	573	45.7	0.078	2.7	--
Benzene	874	40.1	0.085	2.7	4
Petroleum products					
Gasoline	740	43.7	0.055	2.1	2
Kerosene	820	43.2	0.039	3.5	2.6
Crude oil	830-880	42.5-42.7	0.022-0.045	2.8	--

3.1.4 FDS 液態燃料熱釋放率的問題

Cai 和 Chow 學者針對居室火災使用液態燃料並建構不同通風因素之熱釋放率進行研究，指出設計火災熱釋放速率 (HRR) 是評估建築火災危害之中最重要的參數。另外，建構不同的模擬區域、邊界條件以及網格尺寸預測 HRR 並和實際實驗的結果做比較。得知 FDS 在預測燃燒速率時，有數個強烈影響的因子，包括燃料的熱性質和燃料表面的熱回饋。結果顯示 FDS 的池火模型在使用液態燃料模擬

時，燃料會依照其本身的性質進行燃燒和實際實驗產生的結果不一樣其原因是實際實驗的燃燒速度會遭受到較強的輻射熱回饋影響，在 FDS 當中可能無法很適當的模擬。

陳聖澤與汪宣宏學者等人在對於輻射熱會饋造成之影響^{[5][24]}，對在 FDS 使用者手冊中指出，吸收係數對於液態燃料而言，即為熱輻射吸收的深度。液態不只是在表面而是在薄層附近的表面進行吸收，故對燃燒速率的影響很明顯，參數設定上會受到表面厚度最小單位的影響，當變動網格大小後，若吸收係數維持相同值，會造成模擬結果有所差距，若要避免網格修正後之差異，需調整「吸收係數」的參數設定值來做修正。

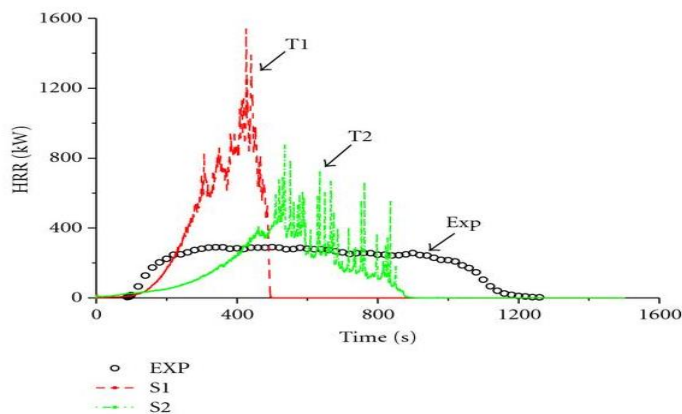


圖 3.1 Cai 和 Chow 學者研究 FDS 使用液態燃料預測和實際實驗的差異

3.1.5 FDS 液態燃料吸收係數

在 FDS 使用者手冊中指出，吸收係數對於液態燃料而言，即為熱輻射吸收的深度。液態不只是在表面而是在薄層附近的表面進行吸收，故對熱釋放率的影響很明顯，參數設定上會受到表面厚度最小單位的影響，當變動網格大小後，若吸收係數維持相同值，會造成模擬結果有所差距，若要避免網格修正後之差異，需調整「吸收係數」的參數設定值。

3.1.6 火燄高度

設計消防安全時，池火火災火焰高度是一個需要被考慮的重要因素。火燄高度可以影響到建築物結構受熱、火災消防系統、消防通風系統、逃生的可能性。火焰高度一般而言取決於質量燃燒速率和通風條件。有不同的方法來確定火焰高度，例如即使用溫度條件或可見光條件。

Naeem Iqbal 將火焰高度定義為位於 50% 燃燒時間附近所產生的高度。

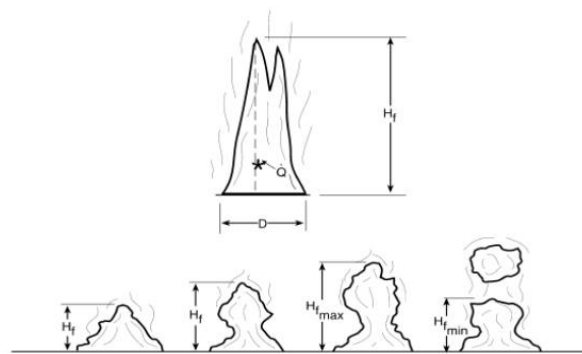


圖 3.2 池火火焰週期變化圖

如圖 3.2 所示，池火的火焰高度在位於外圍且靠近其頂部之處，具有間歇性脈衝結構。此種間歇性主要是由空氣紊流混合隨後燃燒所驅動。

NFPA 記載兩個可以用來計算池火在無側向風吹拂時的火焰高度，分別由 Heskestad 和 Thomas 定義：

Heskestad 針對油池火災之火焰高度可由下列方程式計算得到：

$$H_f = 0.235\dot{Q}_c^{\frac{2}{5}} - 1.02D \quad (3-17)$$

其中 H_f ：火焰高度 (m)； \dot{Q}_c ：火源熱釋放率 (kw/s)； D ：油盤直徑 (m)

Thomas 針對油池火災之火焰高度可由下列方程式計算得到：

$$H_f = 42D \left(\frac{m''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (3-18)$$

其中 H_f ：火焰高度 (m) ； D ：油盤直徑 (m)；

ρ_a ：環境空氣密度 (kg/m^3) ； \dot{m}'' ：質量燃燒速率($\text{g/m}^2\text{s}$)

Kristopher Overholt 使用 Heskestad 公式計算 1.5m、500kW 油盆的火燄高度和 FDS 的模擬結果進行驗證得到相當一致的結果，證明 FDS 可以成功的描述火災動態及計算燃燒、熱傳遞、流場等問題。

本研究火源熱釋放率係 1.2312 kW/s 經由荷重計量測所得，代入 Heskestad 方程式 (3-9) 得到 50% 機率出現之火焰高度 H_f 值為 17 公分，代入 Thomas 方程式 (3-10) 得到火焰高度 38 公分，由圖 3.3 實驗測定火焰高度發現和 Heskestad 的方程式相符^[42]。



圖 3.3 實驗測定火焰高度

3.2 軟體介紹

3.2.1 FDS 軟體

FDS 是由美國 NIST 之建築暨火災實驗室 (Building and Fire Research Laboratory, BFRL) 於西元 2000 年 2 月所公開發表的一套模擬火場用 CFD 軟體，

專門用來模擬受火災浮力驅動之氣流的三維數值計算，軟體的核心是以低馬赫數（Low Mach Number）之大渦流模擬（Large Eddy Simulation, LES）統御方程式，來描述火災浮力驅動氣體流動現象的模擬軟體。該軟體目前已發展至 6.22 RC3 版，可在 Windows 及 Linux 作業系統環境下使用，FDS 除了有針對火場模型設計的前處理模組之外，尚有其他軟體所沒有的撒水頭模式，而其後處理工具 Smokeview 可針對溫度場、濃度場等模擬結果進行動畫展示。FDS 可用於模擬三維的火災情境，將建築物空間分割為多個細小格點，利用數值方法求解四種守恆之統御方程式，經由重複疊代計算模擬空間中細小格點之各種物理量，可預估火災發生時火場的氣流速度、溫度與煙流流動等數據（如圖 3.4 所示）。

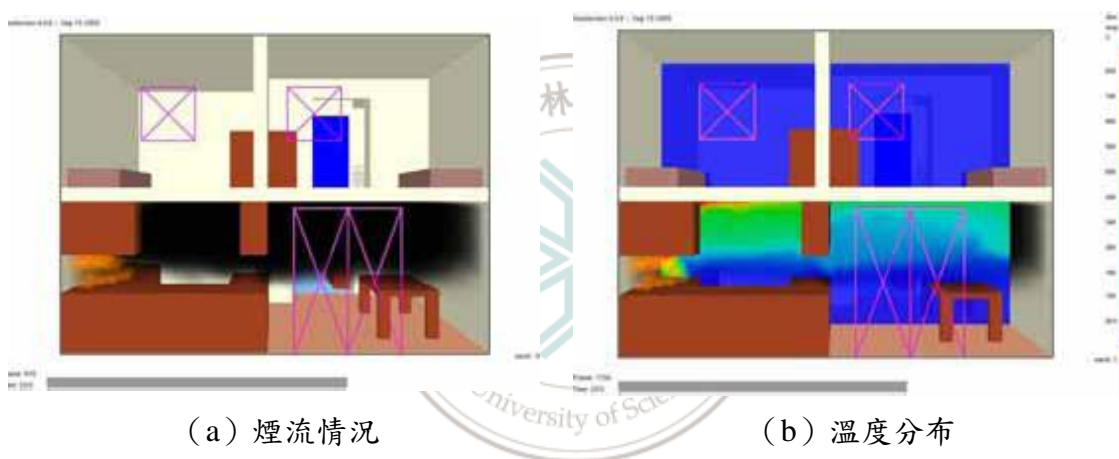


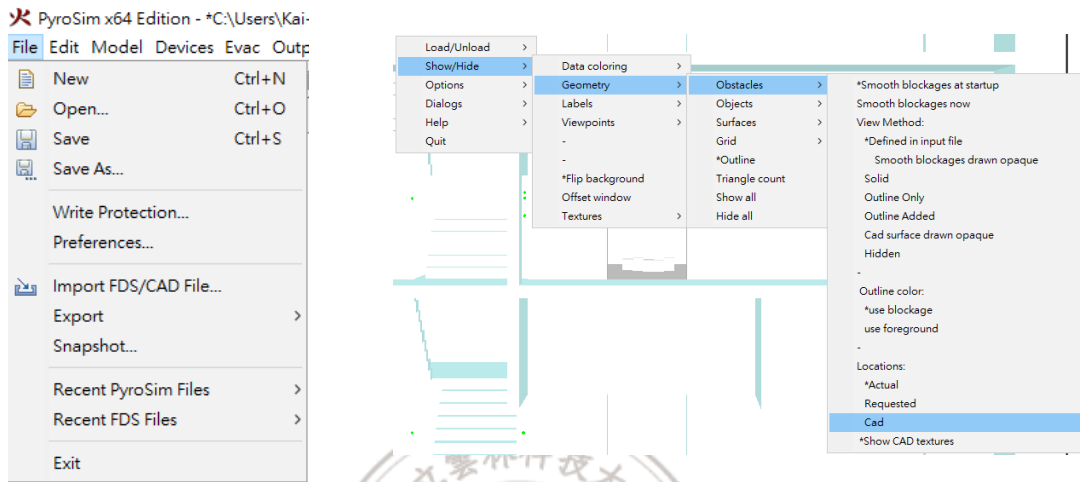
圖 3.4 FDS 應用於建築物火災模擬

3.2.2 繪製 3D CAD/GE1 模型

在 FDS 用戶指南〈2011〉之中，可以使用現實的幾何數據 CAD/ GE1 文件，此文件採用的是 ASCII 文本格式及利用 FORTRAN 程式讀取和定義。然而要建立一份 GE1 文件是相當不容易的，因為必須將所有的幾何坐標格式重新進行編寫，在 Smokeview 第六版用戶指南中有提到在 x、y、z 的物件坐標，必須要位於一個單一平面，且逆時針方向進行排序，操作如圖 3.5 所示。

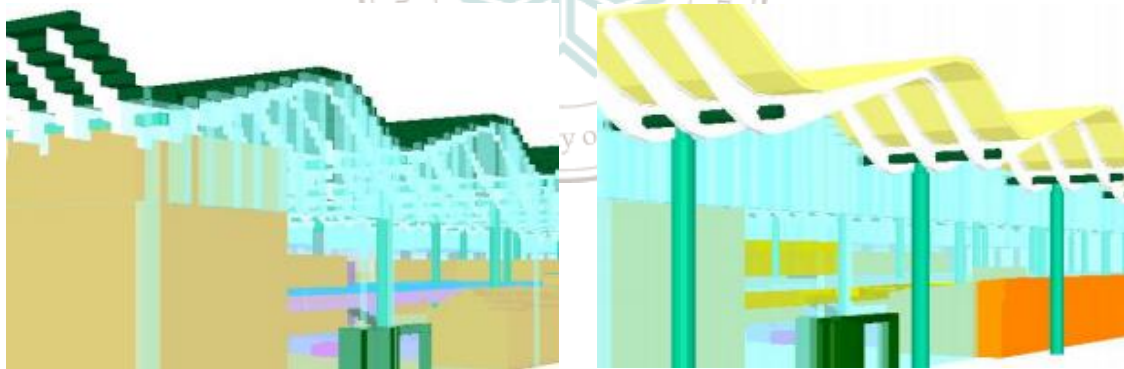
“dxf2fds”這支程式是由美國菸酒槍炮及爆裂物管理局（ATF）之 David Sheppard 撰寫，當轉換“DXF”格式的 CAD 文件到 FDS 輸入文件，將會產生一個

Smokeview 幾何文件 (.GE1)，此文件具備和 CAD 文件相同的幾何細節並且獨立於 FDS 網格。為一“虛擬”的幾何文件。可以藉由 ”Show” → ”Geometry” → ”Obstacle”→ ”Locations: CAD” 顯示於 Smokeview，分別為 FDS 和 CAD/GE1 模型。



(a) DXF 匯進 Pyrosim 介面 (b) SmokeVIEW 重現 CAD 模型

圖 3.5 DXF 檔匯入與 CAD 模型重現示意圖



(a) FDS 模型 (b) CAD/GE1 模型

圖 3.6 FDS 模型與 CAD/GE1 匯入 FDS 比較圖

3.2.3 FDS 與 Smokeview 之運算架構與流程

圖 3.7 是 FDS 與 Smokeview 之軟體架構與運作流程圖。首先需輸入火場情境資料，包含計算範圍、物件尺寸及其熱屬性、火源位置、火災情境、牆壁開口、計算格點數、灑水頭與其它邊界條件等，軟體可求得火場中各種的災害參數變化（如溫度、CO 濃度等）。計算所得結果可經後處理模組 Smokeview 輸出二維或是三維動畫來呈現火場場景，將模擬結果圖面化、色彩化、立體化、動畫化，可快速建立火場的圖像並掌握火場資訊。軟體的主要架構分為以下三個部分：

- (1) 前處理：在前處理中，必須以純文字格式輸入模擬所需之模型尺寸、物件規格、格點分配及邊界條件等，並儲存於文字檔中以提供模擬計算所需之相關數據。
- (2) 數值解：即是 FDS 的運算核心部分，將前處理所製作好的物件幾何尺寸等參數讀入，以數值方法求解，並將所需的計算結果輸出。
- (3) 後處理：FDS 的後處理部分與 Open GL 的繪圖軟體 Smokeview 結合，可將 FDS 計算出來的結果，以圖形或 2D 與 3D 的動畫效果來呈現。

FDS 火災模擬軟體運用廣泛，其較常被使用之原因及項目如下：

- (1) 為火災動力學及燃燒科學之基礎研究工具。
- (2) 技術手冊中詳列有關方程式及數值演算之方法。
- (3) 有公開之程式碼 (source code) 可於網站下載。
- (4) 為 NIST 所發展用於低馬赫數的 CFD 火災模式，具有公信力。
- (5) 可進行火場中煙霧流動熱傳輸現象之模擬解析。
- (6) 可進行煙控系統設計與撒水頭作動之研究。
- (7) 可進行住宅及工業用火災重建研究。

(8) 可進行等價替代及防火工程設計之驗證。

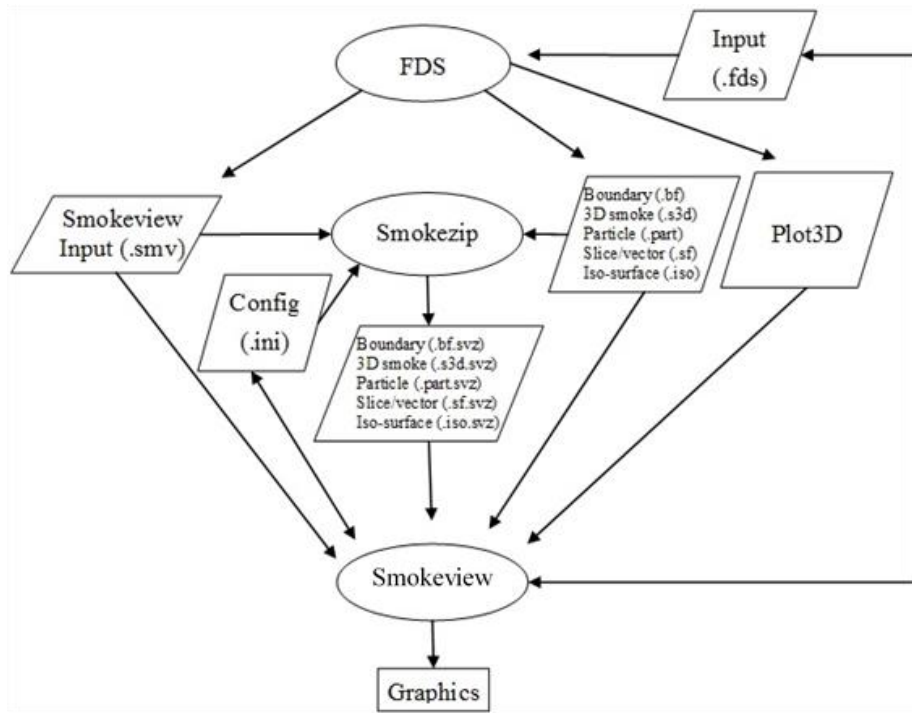


圖 3.7 FDS 與 Smokeview 組織架構流程圖



3.2.4 FDS 模擬理論基礎

NIST/BFRL 所發展之場模式模擬軟體，採用大渦流模擬 (Large Eddy Simulation, LES) 以及直接數值模擬 (Direct Numerical Simulation, DNS) 的方式來求解統御方程式，這些方程式基本上是由 Navier-Stokes 方程式推導並簡化而來，是符合質量、動量、能量及物種守恆之流體力學方程組，適用於低馬赫數的流場分析，專門用來模擬受火災浮力驅動氣流流動的三維數值計算並著重在煙流及熱傳遞的現象。各方程式簡介如下：

(1) 質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (3-19)$$

其中， ρ ：流體密度 (kg/m^3)， u ：流體氣流速度 (m/s)

(2) 動量守恆方程式

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3-20)$$

其中， p ：壓力 (Pa)， f ：外力項，包含由撒水頭噴出的水滴所造成的摩擦力 (N)， g ：重力加氣體流速 (m/s^2)， τ ：黏滯剪應力張量 (Viscous Stress Tensor)

(3) 能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot k \nabla T + \sum_i \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i \quad (3-21)$$

其中， h ：焓 (J/kg)， k ：熱傳導係數 (W/mK)， T ：溫度 (K)， D ：擴散係數 (m^2/s)， Y_i ：第 i 種的質量分率

(4) 物種守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_l) + \nabla \cdot \rho Y_l u = \nabla \cdot (\rho D)_l \nabla Y_l + \dot{m}_l''' \quad (3-22)$$

其中， \dot{m}_l''' ：第 l 種分子每單位體積產生率， Y_l ：第 l 種的質量分率

(5) 理想氣體方程式

$$pM = \rho RT \quad (3-23)$$

其中， M ：分子量 (kg/kg-mol)

另外使用 FDS 在模擬特性空間結構之火災動態行為時，其模擬程序與原則包括資料定義、資料執行與資料分析等三個主要部分。以下就此三部分個別描述：

(1) 資料定義

資料定義的目的，在使電腦能夠正確的辨認量化的數據，並對於指令賦予正確的意義。本研究所採用的 FDS 工作指令主要包括專案名稱、網格定義、模擬區域定義、網格調整、模擬時間定義、表面及邊界條件設定、輻射熱定義、雜項定義、內容物定義、可穿透面定義、偵測點位置設定、邊界繪圖設定、切面圖設定、PLOT3D 輸出設定等。資料定義後，需將每段描述之定義內容以「&」、「/」符號標註，方能使後續資料能夠正確有效的被執行。

(2) 資料執行

FDS 之資料執行的目的在使程式進入運算核心部分，操作者可經由命令提示字元→檔案路徑→檔名→執行確認 Input Data 正確無誤後，即開始執行程式，以數值方法求解，並輸出所需的計算結果。此時若資料定義有錯誤，程式則會自動偵測錯誤指令，以利使用者修改。一旦資料偵錯完成後，此一資料已經可稱為潔淨的 (Clean and Clear) 資料，就可進行資料執行及後續分析工作。一般程式運算只能在一台電腦上被執行，而單一電腦的基本運算能力有限，為了節省運算並

擴大計算之網格數，本研究乃利用 FDS 軟體支援平行化之能力，採用叢集式電腦 (Cluster Computer) 進行 FDS 平行化運算工作。

(3) 資料分析

經由上述資料定義與資料執行工作之後，接下來就是要將 FDS 執行過後的資料，利用 Grapher 軟體來製作圖表，進行資料分析的工作。此外，FDS 之後處理模組 Smokeview 軟體設置較為簡潔明瞭，修改容易且快速，可顯示全區域各角度的透視圖，可呈現對煙層流動之立體動畫，在灑水系統之 Sprinkler 作動後可見火源大小之變化情況，可說是真實情況的顯現。基於 FDS 強大的功能及優點，因此本研究選用此軟體作為火災動態模擬之工具。

3.2.5 FIRES 火災監控系統軟體介紹

本研究所採用之火災監控系統 FIRES 為本實驗室開發利用「實驗室虛擬儀器工程平台 (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, LabVIEW)」與「艾追諾微控制器 (Arduino Micro-controller)」、溫度感測模組 MAX6675、光敏電阻等軟硬體，開發出的一套「火災整合式縮小模型實驗系統 (Fire's Integrated Reduce-model Experimental System, FIRES)」，實現建築物火災實驗之中央監控^[5]。

3.2.5.1 Arduino 微控制板硬體

Arduino 係 2005 年由義大利伊夫雷亞互動設計學院 (Interaction Design Institute Ivrea, IDII) 的 Massimo Banzi 教授和西班牙籍晶片工程師 David Cuartielles 所設計出來的一款小型微控制器系統^[17]，原本是用來提供給非專業人士進行數位專案設計時所需之一種簡單且低廉的開發工具平台。Arduino 為微控制板設計者在 Ivrea 當地經常光顧的一間酒館，其名字取自十一世紀初的義大利王 Arduin of Ivrea。Arduino 是一塊基於開放原始碼和 USB 埠的簡單 I/O 介面控制板，相當簡單易類似 Java、C 語言的整合開發環境。Arduino 可以作為獨立的控制核心，也可透過 USB

埠連接直接和電腦上的軟體互動。Arduino 電路板可以自己加工製作或者是直接購買成品，另外在官方網站亦提供開放原始碼的整合開發環境 (IDE)。使用者可以將 Arduino 電路板接上各種電子裝置，例如 LED 燈、喇叭、馬達、開關、溫濕度感測器、紅外線發射與接收器、LCD 顯示裝置，以及 Ethernet, WiFi, XBee, Bluetooth, RFID, GPS 等各種通訊模組。再配合撰寫一系列自動控制程式，就能利用 Arduino 做出各式各樣的自動控制應用，例如利用溫度感測器控制風扇的運轉、使用可變電阻控制燈光的明暗、控制馬達的轉速、利用紅外線遙控家電、利用伺服機(Servo) 控制機械手臂或機器人，以及製作自走車、飛行器等等。

3.2.5.2 LabVIEW 程式設計軟體

LabVIEW 是由美國國家儀器公司 (National Instruments, NI) 所開發的一套圖形化程式編譯平台，使用「G 圖形程式語言」，以方塊圖的圖畫形式進程式設計 [18]，可省去許多傳統程式語言開發時的語法細節，而將注意力集中在系統邏輯架構與資料流。使用此種方法並不會使程式能做的應用變少或效能變差，反而可大幅提高程式開發效率；使用術語、圖示以及與科學家和工程師類似的觀念來進程式邏輯的規劃，完全不使用文字語言，僅仰賴圖形符號來描述程式行為；在資料流的運作上，函數只有在接收到所需的資料後才會開始動作，可直接主導程式執行。

有鑑於先前研究中的人工點火、手持式溫度感測器及旋鈕風扇控速板在操作上較為繁複，此外亦無法進行整合控制並即時產生數據曲線。本研究改用 LabVIEW 軟體來建立 FIRES 系統的虛擬化儀表 GUI 介面，其結果相較於一般標準化的實驗室儀器更具彈性，使用一部電腦、多組隨插即用的裝置與感測器，再加上軟體，即可構成一套完整且可設定參數並執行控制的虛擬儀表。

3.2.5.3 FIRES 系統與圖形使用者介面(GUI)功能簡介

本研究利用 LabVIEW 與 Arduino 單晶片微控制器所自行設計出的 FIRES 實驗系統如圖 3.8 所示，系統中配置了各種火災物理感測器來進行訊號蒐集，可安裝

在各種預先搭建之實驗模型內^[19]，進行數據之傳輸與控制，以便觀察不同火源強度下，目標建築物火場空間內之熱輻射強度、環境溫度、能見度及煙層高度等隨時間之變化情況，另外亦可連結各種消防控制模組（如防火門、進氣與排煙風扇）來控制煙流之行為。

圖 3.9 為 FIRES 的 GUI 介面，需透過安裝於筆電或桌上型電腦中之 LabVIEW 軟體來開啟，並透過 USB 連接線與圖 3.8 中之 Arduino 數據擷取硬體進行連接，其餘實驗模型中之偵測器均透過訊號線與數據擷取硬體連接（如圖 3.10）。當所有的模組都確認連接妥當後，啟動 GUI 介面可執行火災實驗之監控，其中風扇調速功能位於左上角和右上角（見圖 3.9），使用者只要移動轉速桿即可控制風扇轉速，另因考量到風扇可能會有異物侵入或手指誤觸扇葉的情況，故特別設計有緊急停止按鈕，至於下方之手動開關係實驗前為測試風扇是否能正常運轉而設計。

GUI 介面左下角的兩個黑色背景視窗為即時監視窗口，可用來即時監視並儲存實驗數據，最右側中央部分為火焰感測器與點火器開關，提供使用者控制火焰感測器與點火器的使用與否。正中央部分主要為熱電偶和光度計顯示區域，依照實驗模型設置的測點進行配置，每個小方格對應實驗模型中的某個房間或區域，其中 S101、S102、S201、S202、S301 為梯間熱電偶測點的溫度值，C101、C201、C301 分別為一、二、三樓中央房間走廊熱電偶測點的溫度值，C202、C302 分別為二、三樓右側房間走廊熱電偶測點的溫度值，V101、V201、V202、V301、V302 分別為一、二、三樓走廊使用光敏電阻測點的光強度值。上述每支熱電偶皆有溫度校正功能，可利用其附屬小窗口進行微調，另外在中央火源房間處（二樓左側）特別增設火焰感測器訊號，以便在監視熱電偶與光度計的同時，觀察實驗模型內的火焰是否仍在燃燒。在 GUI 介面右下方有設有一個資料記錄器開關與緊急停俾開關，當資料記錄器開關啟動時系統將會開始連續記錄數據，系統內訂將數據儲存於 D 碟之 Data.xls 檔案中。當緊急停俾開關啟動時，系統會切斷所有裝置並離開程式。

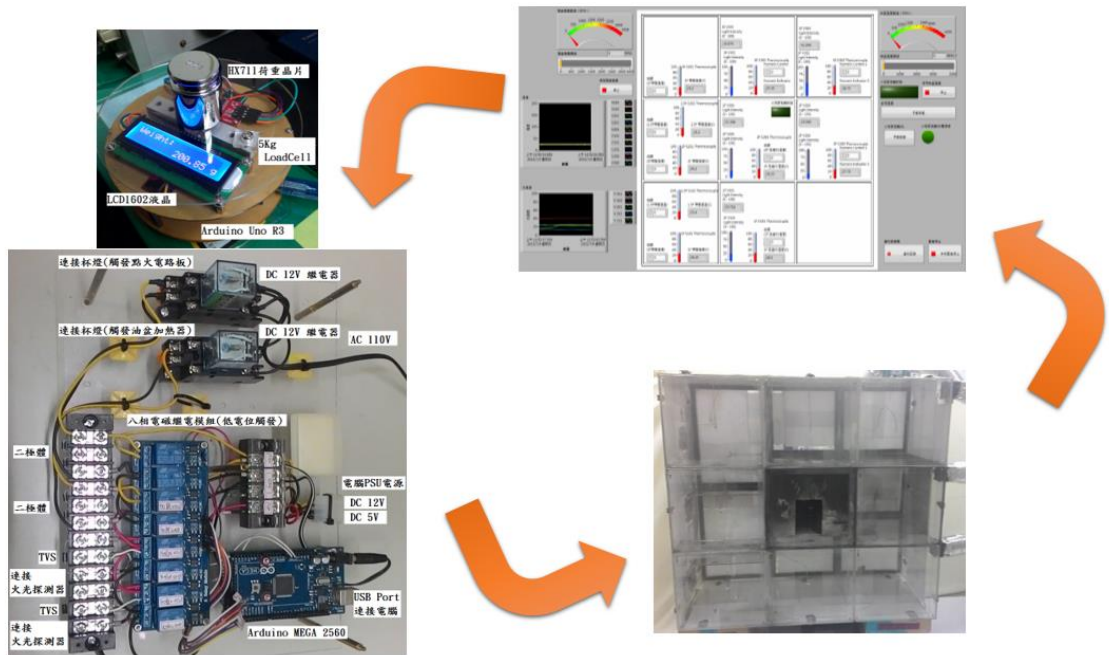


圖 3.8 FIRES 系統主要模組示意圖(左:以 Arduino 為主體之數據擷取硬體、右上:以 LabVIEW 開發之 GUI 監控介面、右下:裝設各類感測器之建物模型)



圖 3.9 FIRES 系統之 GUI 控制介面

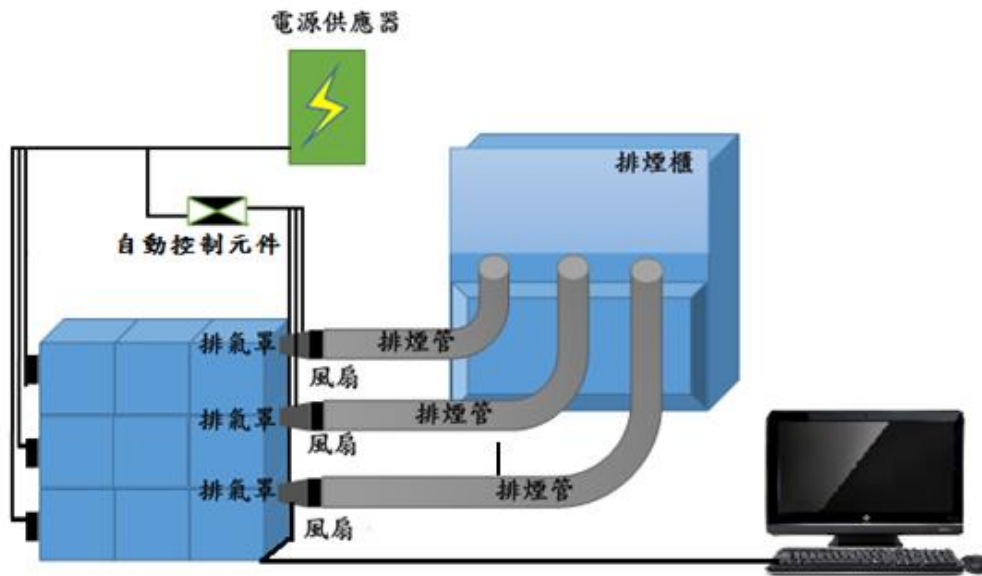


圖 3.10 以 FIRES 系統進行火災煙流實驗之配置圖

3.3 縮小尺度案例情境設定

本研究以縮小尺度實驗與 FDS 火災動態模擬軟體相互參照，FDS 部分將會探討全尺度模型與縮小尺度模型在尺度大小變更後，針對模型詳細說明關於網格特徵長度分析、火源的設定說明、氣簾的建置、相關模擬參數的介紹及實驗模型的建置。

3.3.1 FDS 小尺度模型設定

本案例模型所採用之區域，係考慮煙層流動過程中有縱向與橫向流動，故設計為九宮格形狀見圖 3.11，模擬一般建築物火災發生後煙流的基本流動，先建立長、寬、高各為 1.2 m × 0.6 m × 1.2 m 建築模型，模型共分為三層，每層高度為 0.4 m，模型左側為建築物內之樓梯，在 1、2、3 樓牆面分別有三部進氣風機，進氣風機設置於牆面中央至天花板二分之一高度下方（20 cm）處，開口設計參考內政部營建署建築技術規則中建築設計施工守則第 43、44 條縮小尺度，開口大小為 0.03 m × 0.03 m，但實際實驗無法找到可以符合此大小且達到法規值 0.759 m³/min 進氣風量之進氣風機，將開口大小修改為 0.12 m × 0.12 m，模型也一併修正以便

比較。模型每層於右側設置兩間房間，房間大小為長、寬、高 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ ，右側各層外牆皆設置排煙口，尺寸與原進氣口相同設為 $0.03\text{ m} \times 0.02\text{ m} \times 0.03\text{ m}$ ，開口設計亦參考內政部營建署建築技術規則中建築設計施工守則第 43、44 條。圖形油盆位置設置於模型二樓之房間中央，採用 CAD 模型繪製後匯入。模型牆面參數設定參照 FDS 內定之 PVC 材質，如圖 3.12 所示，而火源房間為符合實驗設置設定為 FDS 內定石膏材質，如圖 3.13 所示。模型邊界大小長、寬、高為 $1.28\text{ m} \times 0.6\text{ m} \times 1.28\text{ m}$ ，進風機、排煙機之進風量、排煙量則是參考消防法規之各類場所消防安全設備設置標準第 189 條，進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，藉由福勞德模型的縮小尺度法則（如表 3.1）計算風量得到小尺度模型的進風量應設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量應設置為每秒 0.006 立方公尺，經速度等於流量除以面積計算得到進氣風速 0.878 m/s （進氣開口大小為 $0.12\text{ m} \times 0.12\text{ m}$ ）、排氣風速為 3.953 m/s （排氣開口大小為 $0.04\text{ m} \times 0.04\text{ m}$ ）。

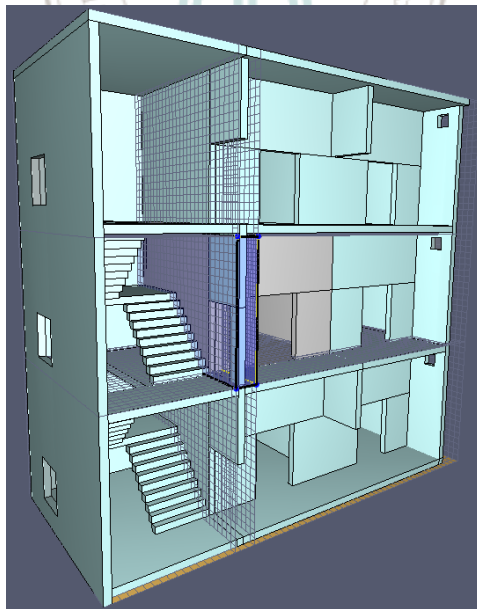


圖 3.11 案例模型側視圖

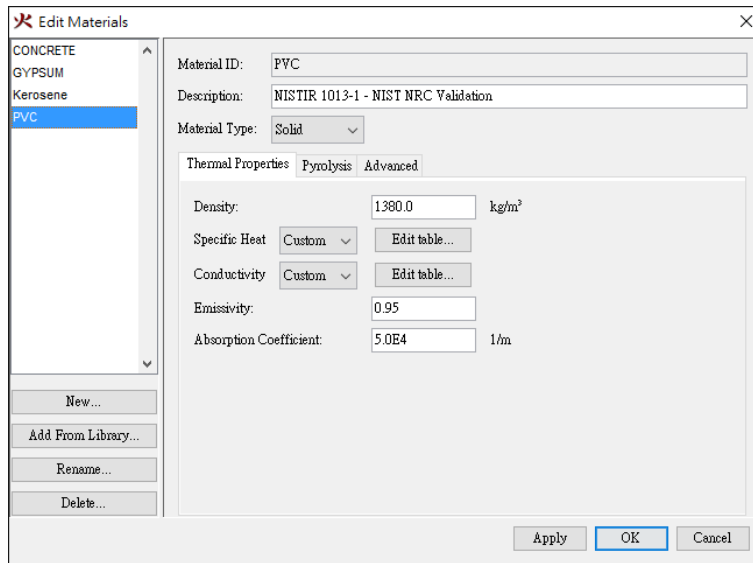


圖 3.12 PVC 材質設定

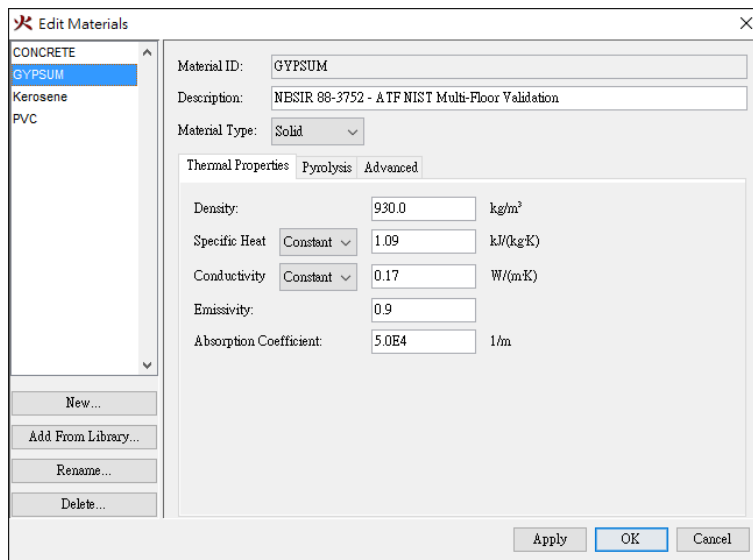


圖 3.13 石膏材質設定

3.3.2 FDS 全尺度模型設定

全尺度模型設置在幾何尺寸的部分，小模型和大模型的比例設置為 1:10，將先前建置的小模型進行放大，在全尺度模型長、寬、高各為 12 m × 6 m × 12 m，模型邊界大小長、寬、高為 12.8 m × 6 m × 12.8 m。進風機、排煙機之進風量、排煙量參考消防法規之各類場所消防安全設備設置標準第 189 條，進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，經速度等於流量除以面積計算得到進氣風速 2.78 m/s（進氣開口大小為 1.2 m × 1.2 m）、排氣風速為 12.5 m/s

(排氣開口大小為 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$)。

3.3.3 FDS 模型設置氣簾

本小節將介紹建置氣簾的設定與相關參數的介紹，如圖 3.14 所示氣簾設置於梯間門口上方，尺度大小長、寬、高為 $1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ ，於模型下方表面設置 Supply 如圖 3.15 所示速度，大小設定為 17 m/s 小尺寸模型速度則換算為 5.3 m/s ，依照前述表 2.11 及表 2.12，將氣簾速度設定到最大值且不影響人員逃生為主，並於模擬開始即開啟。因為縮小尺度模型及實驗是為了驗證高樓建築設置阻煙氣簾的可能性，而一般高樓建築都為長走道也沒有多個門故這裡我們將模型稍作修正，並於二樓走道上方移除了一道門及上方牆面如圖 3.16 移除門及上方牆面示意圖，設置於靠近梯間門一側。

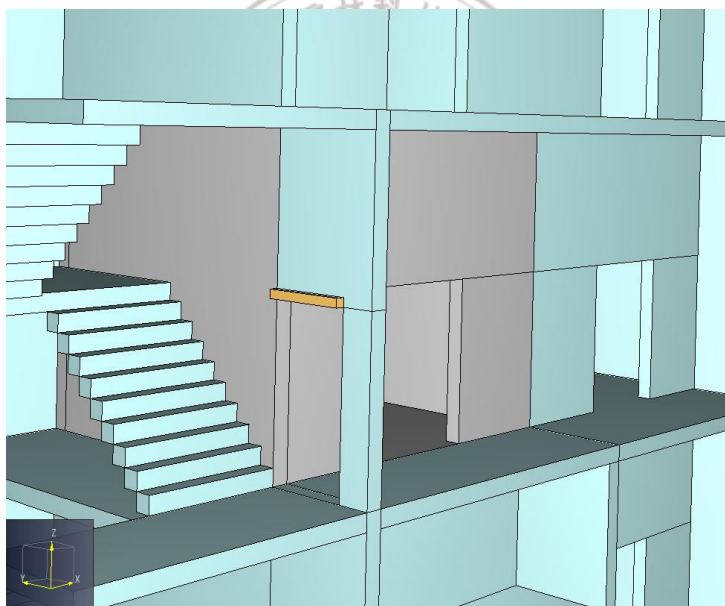


圖 3.14 氣簾於建築模型建置示意圖

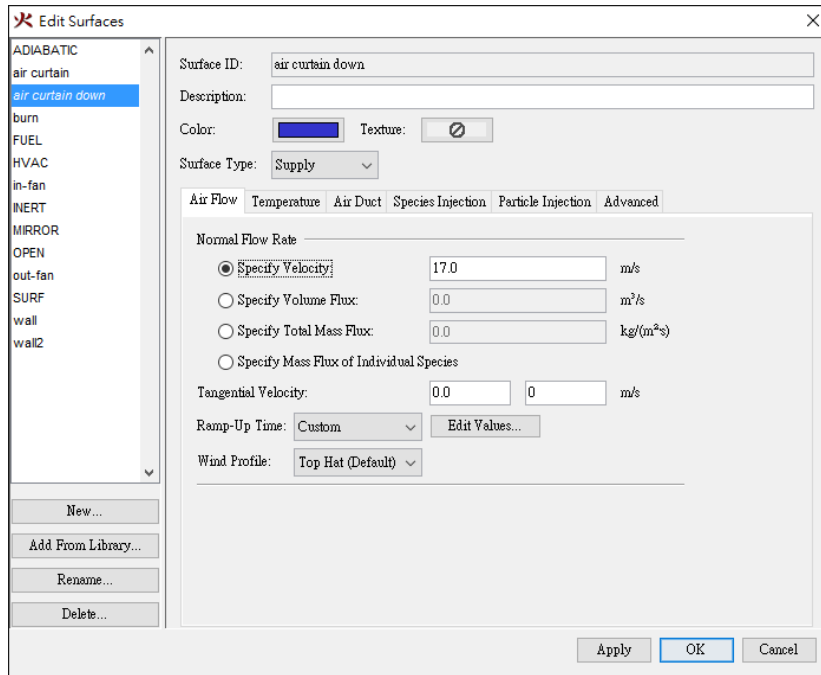


圖 3.15 氣簾速度設置圖

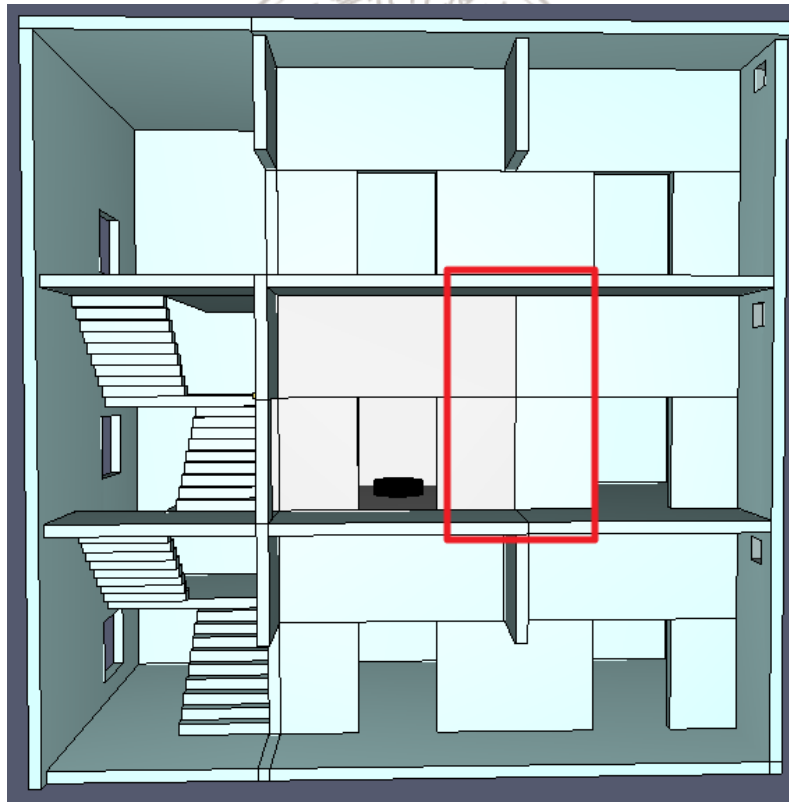


圖 3.16 移除門及上方牆面示意圖

3.3.4 實驗模型設置

本實驗模型依照 FDS 縮小模型進行 1:1 設置，長、寬、高尺寸為 1.2 m × 0.6 m × 1.2 m，模型主要以厚度為 5 mm 之透明壓克力 (PMMA) 材質建造而成 (模型如圖 3.17 所示)。本研究於模型二樓房間中央設置油盤做為火源，在小尺度(1:10)時油盤直徑為 0.08 m。考慮到模型為 PMMA 材質，實驗過程中可能因為高溫而毀損，故在火源房間內部鋪設石膏板以避免火焰直接接觸模型，模型左側開口為進氣風機之進氣入口，分別於 1、2、3 樓層各有一開口如圖 3.18 (a)，而在模型右側則為排氣風機出口，於各樓層皆有排氣口如圖 3.18 (b) 所示，由於實驗過程中是於室內進行，故排氣口另外裝設排煙管，排煙管另一端則接到抽氣櫃內將煙排出。



圖 3.17 小尺度 (1:10) 尺寸壓克力實驗模型外觀



(a) 模型左側外觀



(b) 模型右側外觀

圖 3.18 小尺度 (1:10) 尺寸壓克力實驗模型左右視圖

實驗所使用之氣簾出風口尺寸長、寬約為 $10\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ，尺寸放大至 10 倍與我們前述氣簾介紹 (表 2.12) 也在合理範圍內，而出氣方式主要依靠空氣壓縮機加壓，為了避免出氣的空氣中有過多水氣，有透過壓縮機出口冷擬器將水滴由排水閥排出，進氣相關設備如圖 3.21 所示，至於調整氣簾速度是由壓力調整閥來控制出氣速度 (所圖 3.22 示)，氣簾設置於二樓梯間門口處如圖 3.20 所示，並將風速計貼近出氣面量測速度，也由於氣簾長度無法剛好符合門的寬度，故將氣簾出氣不到的地方，故用壓克力板固定如圖 3.20。



圖 3.19 氣簾模型圖



圖 3.20 氣簾裝設於模型示意圖



圖 3.21 進氣系統設備



圖 3.22 氣簾速度調節閥

3.3.5 火源設定

本節探討 FDS 火源之設定形式，以 FDS 建立火源的第一步必須要先繪製或匯入一個物件作為油盆，如圖 3.23 所示，長、寬、高為 $0.08\text{ m} \times 0.08\text{ m} \times 0.03\text{ m}$ ，再由物件連結到物件表面 (SURF) 進行設定，並於物質 (MATERIALS) 設置煤油參數做為表面 (SURF) 之連結，此方法需收集大量的煤油參數文獻，由多篇文

獻整理數據如表 3.3 REAC 模擬設置參數。

表 3.3 REAC 模擬設置參數

參數	大小	單位	文獻
Density	820	kg/m ³	[42]
Specific Heat	2	kJ/kg·K	[42]
Conductivity	0.146	W/m·K	[43]
Emissivity	0.37	none	[44]
Absorption Coefficient	5.0E4	l/m	Default
Heat of Combustion	43,124	kJ/kg	[45]
Boiling Temperature	200-260	°C	[45]
Initial Vapor Flux	5.0E-4	m ³ /(sm ²)	Default
Heat of Vaporization	255.86	kJ/kg	[45]

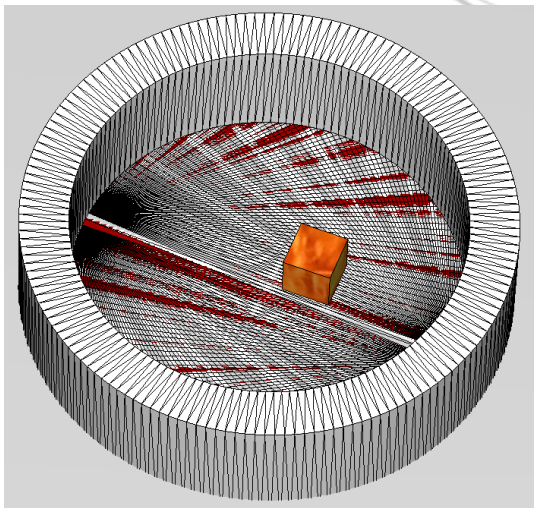


圖 3.23 FDS 油盆模型圖



圖 3.24 實驗油盆示意圖

後續的做法是將火源燃料連結上物質的反應 (REAC)，然後在燃料物燃上設置一個物件，於物件表面 (SURF) 內設定其性質為燃燒器 (BURNER)，並指定其單位面積熱釋放率 (HRRPUA) 與燃燒曲線，此方法可以模擬實際利用點火器點燃煤油之現象。

本實驗及模擬使用燃料液態煤油 25 ml 燃燒，煤油參數設定參考圖 3.25，FDS 軟體液態煤油小尺度油盤，因為採用之油盤半徑為 0.04 m，故依據體積等於面積乘高，將液態燃料表面 (Surface) 設定厚度為 0.005 m 如圖 3.26，而大尺寸模擬則因為放大 10 倍，油盤半徑為 0.4 m，故液態燃料厚度設定為 0.05 m，液態煤油為 25 L。

(1) Reaction 設定說明

反應 (REAC) 參數可用來指定使火源係採用氣相燃燒反應或化學計量反應的設定。對於設定混合物質燃料，FDS 內在同一個模擬只接受單獨一條 REAC 指令。如果在模擬時 REAC 並未設定，則 FDS 將預設使用丙烷作為燃料，而其他參數 FDS 將自動作相應調整。

對於其他燃料可通過基本的化學計量公式在 FDS 內進行設定，如果在已知燃料有關的碳、氫、氧主要成分時，可以透過使用 REAC 參數增加至模擬條件內。

FDS 內部使用混合分數模型，可以假定反應如 (3-24) 所示：

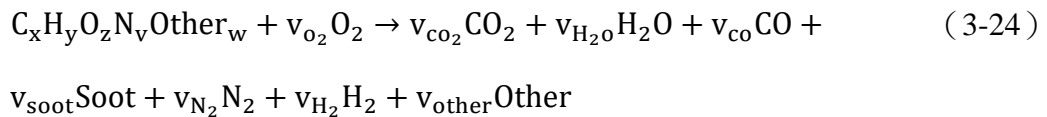


表 3.4 REAC 參數說明

指令名稱	說明
ID	標識字串
C, H, O, N, OTHER	燃料化學式
MW_OTHER	其他物質平均分子量
Y_O2_INFTY	環境氧氣的混合分率
Y_F_INLET	燃料流中燃料的混合分率
SOOT_YIELD	從燃料質量轉換成煙霧微粒分率
SOOT_H_FRACTION	煙灰是氫原子的混合分率
CO_YIELD	燃料質量轉化成一氧化碳的比率

Material ID: Kerosene
 Description:
 Material Type: Liquid Fuel

Thermal Properties | Pyrolysis | Advanced

Density: 820.0 kg/m³
 Specific Heat: Constant 2.0 kJ/(kg·K)
 Conductivity: Constant 0.146 W/(m·K)
 Emissivity: 0.37
 Absorption Coefficient: 5.0 1/m

圖 3.25 煤油參數設定

Material ID: kerosene
 Description:
 Material Type: Liquid Fuel

Thermal Properties | Pyrolysis | Advanced

Heat of Combustion: 4.3124E4 kJ/kg
 Boiling Temperature: 230.0 °C
 Initial Vapor Flux: 5.0E-4 m²/(s²)

Byproducts

Heat of Vaporization: 255.86 kJ/kg Endothermic Exothermic
 Fuel Vapor Yield: 0.0
 Water Vapor Yield: 0.0
 Residue Yield: 0.0 Residue: CONCRETE

圖 3.25 煤油參數設定(續)

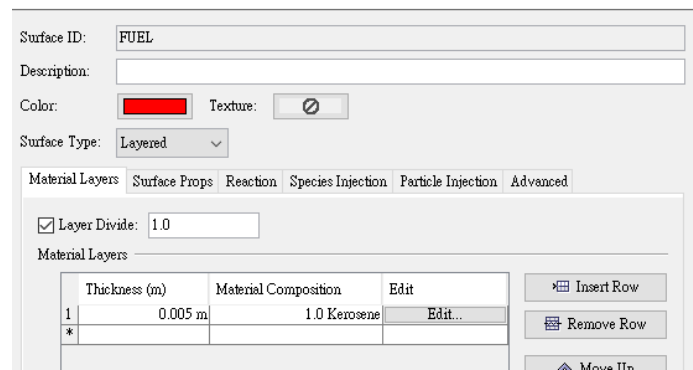


圖 3.26 液態煤油表面設定

3.3.6 模型網格分析

在計算流體力學的模擬軟體中，網格尺寸大小扮演著重要的角色，如果單一網格尺寸設置過大，則火災模擬的準確性可能不足；反之，若網格設置太小，進行模擬時需要開啟足夠之最大網格矩陣的記憶體容量，且運算時間較長，故本研究在網格靈敏度分析上使用公式 2-3 之方程式來計算 D^* ，計算出來的結果如式 3-25、3-26 所示，其中 \dot{Q} 為火源熱釋放率。本研究之熱釋放率在學者陳聖澤^[5]於 1:10 尺度下由荷重計量測求得為 1.23 kW、1:1 尺度下利用縮小尺度法則求得為 389.39 kW，至於空氣密度 (ρ_0) 為 1.2 kg/m^3 、比熱 (C_p) 為 1.0，而起始溫度 (T_0) 則為 295K。

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/5} = \left(\frac{1.2312}{1.2 \cdot 295 \cdot 1 \cdot \sqrt{9.81}} \right)^{2/5} = 0.065796 \quad (3-25)$$

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/5} = \left(\frac{389.3996}{1.2 \cdot 295 \cdot 1 \cdot \sqrt{9.81}} \right)^{2/5} = 0.657996 \quad (3-26)$$

在學者李訓谷的研究中曾指出，網格大小約略等於 $0.1 D^*$ 時，其火源中心軸流速及溫度與 McCaffrey 提出之火源中心軸氣流速度及溫度半經驗公式較為吻合，故本研究在尺度 1:1 下之 $0.1 D^* = 0.1 \times 0.657996 = 0.0657996 \approx 0.07 \text{ (m)}$ 、尺度 1:10 下之 $0.1 D^* = 0.1 \times 0.065796 = 0.0065796 \approx 0.007 \text{ (m)}$ 。此外，根據學者 Hill

[28] 的研究結果， D^* 除以網格大小的比例結果應該要介於 4 至 16 的範圍內，此方法在學者 Chi^[29]的研究中也有被採用。故本研究在 1:10 尺度先使用 0.007 m 作為網格尺寸的大小與 1:1 尺度下使用 0.07 m 做為網格尺度的大小， D^* 除以網格大小結果皆為 9.39，介於 4~16 之間，故本研究最初設計的網格大小為 0.07 與 0.007 (m) 是可以接受的，但受限於電腦運算速度限制必須要將網格放大為 0.2 與 0.02 (m) 模擬時間得以於 7 天內完成， D^* 除以網格大小結果，如式 3-27 與 3-28 所示。

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{0.065796}{0.02} = 3.2898 \quad (3-27)$$

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{0.657996}{0.2} = 3.2998 \quad (3-28)$$

另一方面因為網格受限於氣簾模型尺寸過小，使得在模擬結果 SmokeVIEW 速度流場未出來，故我們將原本單一網格分割成五個網格，其中氣簾部分將切細網格大小為 0.1 與 0.01 (m) 如圖 3.27 紅框處所示，同時模型網格底面除外皆是邊界網格打開與外界流通除。

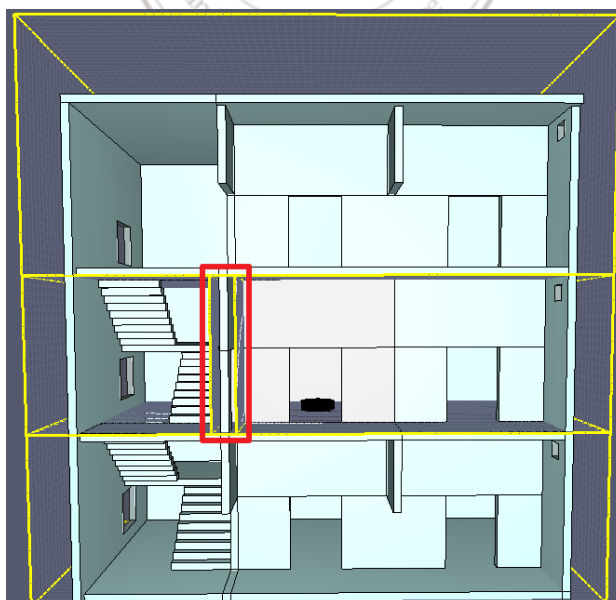


圖 3.27 模型網格示意圖

3.3.7 模型測點設置

3.3.7.1 實驗模型設置

本實驗依照 FDS 縮小模型進行 1:1 設置，長、寬、高尺寸為 1.2 m × 0.6 m × 1.2 m，以厚度為 5 mm 之透明壓克力材質建造而成，並以此為模型進行實驗。本研究於模型第二層左側房間中央設置油盤做為火源，在小尺度（1:10）時油盤直徑為 0.08 m。在溫度測點部分，利用一組 4 通道溫度記錄器連接專用 USB 轉 RS-232 傳輸線（圖 3.28）和 FIRES 火災監控系統之溫度模組擷取 6 通道溫度訊號，兩者皆透過 VISA 傳輸訊號至 LabVIEW（如圖 3.29），在模型上總共裝設 10 條 K-type 熱電偶絲進行溫度量測，其中 S301、S202、S201、S102 皆位於梯間處，其餘溫度測點均連接至自行開發之溫度模組。詳細溫度測點擺設如圖 3.30 所示，溫度測點高度均為於走道與對應門中間處，高度皆在 150 cm 處，其中二樓梯間門處因為原光強度測點於 15 cm 處，怕溫度門中間溫度測點故設置高度 16 cm（TI16）與高度 12 cm（TI12）兩個溫度測點，以探討裝設氣簾與未裝設之溫度變化。

在光強度部分利用 FIRES 火災監控系統之之光強度模組連接 5 組光敏電阻，透過 LIFA 直接於 LabVIEW 讀取光強度訊號，測點分別為 V101、V201、V202、V301、V302，測點高度皆在 15 cm 處。高度皆於 15 cm 換算之後為高度 150 cm 處位於人體平均身高 165 cm 減去 15 cm 處，約位於人體之眼部及頭部處。

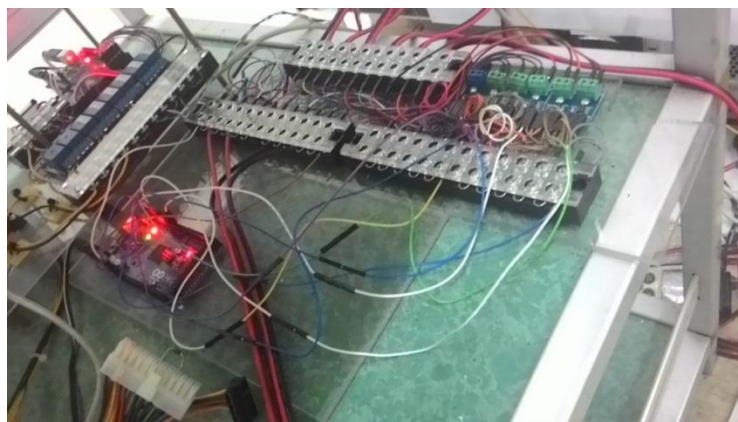


圖 3.28 通道溫度記錄器

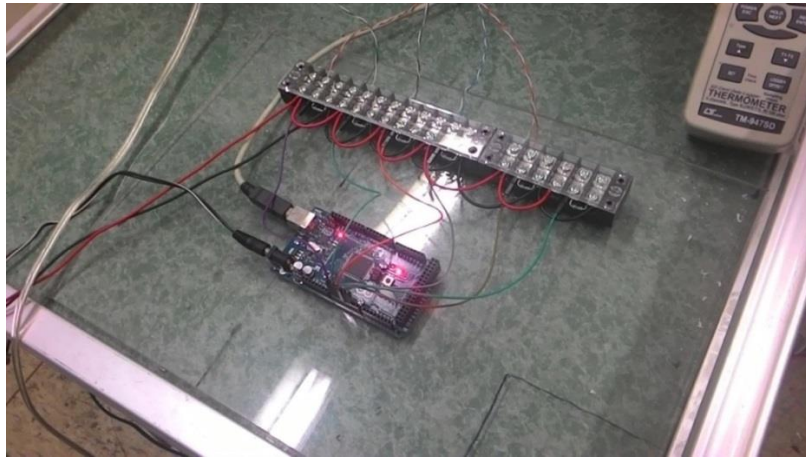


圖 3.29 溫度模組擷取 6 通道溫度訊號

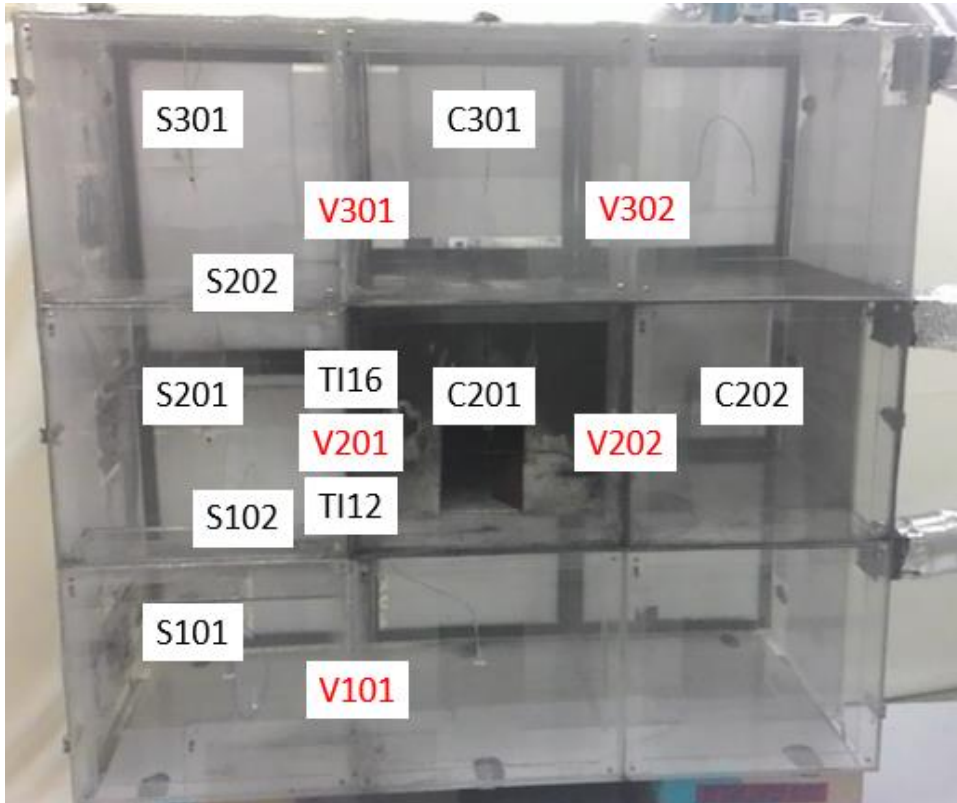


圖 3.30 實驗溫度與光強度測點布置圖

3.3.7.2 FDS 模型測點設置

此小節依照上述實驗實際測點及安裝位置做設計，樓梯梯間處設置溫度測點分別有測點代號由上至下為 S301、S202、S201、S102、S101，而房間溫度測點則是設置在走道與房門中間處，三樓處走道 C301、二樓走道 C201 及 C202、一樓走道 C101，另外二樓往梯間入口處之房門也有設置兩個溫度測點分別於高度 16 cm 處(大尺寸為 160 cm 處)及 12 cm 處(大尺寸為 120 cm 處)代號分別為 TI16 與 TI12。

另外能見度方面也新增能見度測點於模型走道與門的中間，由上至下分別為三樓的 V301 與 V302；二樓的 V201 與 V202；一樓的 V101，其詳細測點布置如圖 3.31 所示。

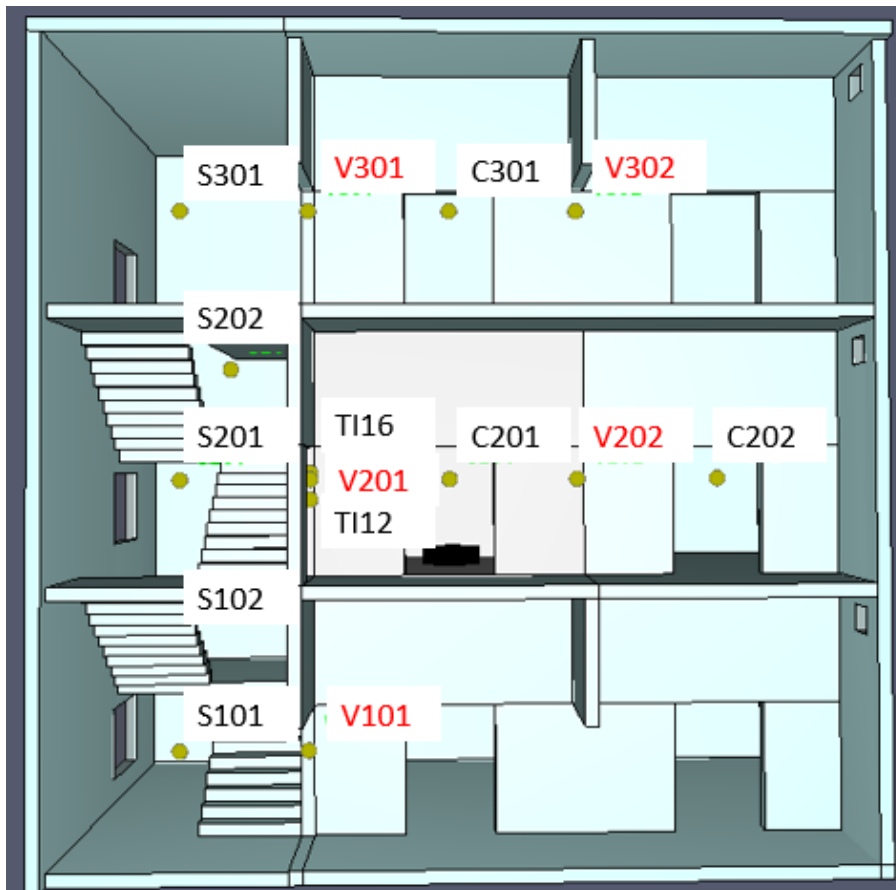


圖 3.31 FDS 模型測點布置圖

表 3.5 測點位置示意表

編號	測點名稱	X Y Z 方向測點位置 (m)
S101	1F 梯間走廊	0.19 , 0.09 , 0.17
S102	1F、2F 間之梯間平台	0.19 , 0.45 , 0.37
S201	2F 梯間走廊	0.19 , 0.09 , 0.57
S202	2F、3F 間之梯間平台	0.19 , 0.45 , 0.77
S301	3F 梯間走廊	0.19 , 0.09 , 0.97
TI12	2F 梯間門中間	0.38 , 0.11 , 0.54
C201	2F 中央房間走廊	0.59 , 0.09 , 0.57
C202	2F 右側房間走廊	0.99 , 0.09 , 0.57
C301	3F 中央房間走廊	0.59 , 0.09 , 0.97
TI16	2F 梯間門中間	0.38 , 0.11 , 0.58

3.3.8 案例情境設定

本節將介紹模擬及實驗情境之設定，主要探討為針對陳聖澤學者之阻煙策略結果，對於梯間還有煙氣進入之案例去做改善，並添加氣簾作相對應比較，其案例情境介紹如表 3.6：

表 3.6 案例情境設定

項目 案例	左側風扇 通風口	右側風扇 通風口	防煙策略	設置氣簾	
Case1	3F	啟動風扇	封閉	三明治系統	無
	2F	封閉	啟動風扇		
	1F	啟動風扇	封閉		
Case2	同上			有	
Case3	3F	封閉	封閉	正壓式排煙	無
	2F	啟動風扇	開啟通風口		
	1F	封閉	封閉		
Case4	同上			有	

Case5	3F	封閉	封閉	負壓式排煙	無
	2F	開啟通風口	啟動風扇		
	1F	封閉	封閉		
Case6	同上				有
Case7	3F	開啟通風口	開啟通風口	自然通風	無
	2F	開啟通風口	開啟通風口		
	1F	開啟通風口	開啟通風口		
Case8	同上				有
Case9	同上(火源與氣簾處網格切細)				設置雙氣簾(內外側)

註：各樓層梯間門及走道門皆為開啟狀態



3.3.9 實驗操作步驟

實驗進行前，為使實驗過程一致，故吾人先設定實驗操作步驟，往後每組實驗均依照此步驟進行。

- (1) 實驗開始前，利用三合一型溫度計預先記錄大氣溫度與濕度。
- (2) 依照各案例進行實驗模型設置，其中包含排氣口封閉，掛上遮光布、鋪上美術用紙以避免反光，設置氣簾開啟等。
- (3) 依據案例打開/關閉通風系統（使用膠帶將其風扇口密封住），並調整風扇實際轉速使其達實際風速。
- (4) 將添加煤油之油盆（25 ml）放入模型火源房間，鎖上前置壓克力板。
- (5) 打開 4 通道溫度記錄器及 FIRES 火災監控系統，並將其調至記錄模式。
- (6) 打開進、排氣設備，如為氣簾則預先啟動空壓機使其儲氣於儲槽。
- (7) 攝影機放置定點開始攝影。
- (8) 於模型後方進行點火（打開模型火源房間後方的火孔，將點火槍伸入點火，火源點燃後火孔塞住）。
- (9) 火源起火瞬間同時啟動計時器。
- (10) 計時器倒數 10 分鐘後關閉攝影設備、溫度量測設備、進排氣設備（攝影人員與溫度計錄人員於計時器倒數數秒時同時關閉設備）。
- (11) 等待模型內部溫度降至大氣溫度。
- (12) 清理實驗內部(打開模型前置壓克力板，將內部煙塵擦拭乾淨，前置壓克力板重新擦上除霧劑)，進行下一組實驗。

3.3.10 縮小尺度改善

此小節將敘述實驗及模擬過程中，遇到之問題以及如何改善解決的辦法，以下就為實驗和模擬分別說明：

3.3.10.1 模擬改善

吾人在模擬過程中，發現以舊模型來驗證氣簾並不合適，因模型走道多了右側門且上方還有類似防煙垂壁的構造，使得煙流於火源走道處迅速蓄積，並使煙流很能輕易穿越過氣簾。另一方面本模擬主要構想是應用在一般高樓上，通常其走廊均空曠且無隔間房門，故這裡縮小模型與實驗的驗證模型稍作修改，將二樓右側走道房門拿掉。

另外在一方面模擬氣簾設置，因為風扇 (Fan) 設置表面表面於氣簾模型方塊下方，但在初期模擬發現，在速度切面下氣簾速度並未完全出來，加上風扇 (Fan) 需要設置到一個分成兩個壓力區的障礙物上，故這裡我們改為表面供氣 (Supply) 的設置方式，代表其為向模型區域中注入空氣的通風口，以符合模型設置之條件。

而在熱釋放率藉由陳聖澤學者製作完成之荷重計，利用油盤火焰之特色為其穩定燃燒過程，當油盆火焰點燃後即迅速反應並成長，到達完全發展時期(即全盛期)之燃燒模式為維持固定的速率燃燒，並持續一段穩定之長時間至衰退，故可利用測重裝置(load cell)量測此時期質量變化資料繪成質量與時間關係圖，在油盤燃燒實驗中由燃燒中期部分與時間呈現之線性關係求得其質量損失率 $LM(kg/s)$ ，再乘上汽油的燃燒熱，得到實際之熱釋放率，此為利用實際燃燒質量損失所得到之熱釋放率。圖 3.33 的實驗值為使用 Load Cell 量測的重量與時間關係圖，但因 Load Cell 重量質量測時會抖動，於是使用線性迴歸擬合，求得方程式為 $y = -0.0285x + 18.576$ 亦即約每秒約有 0.0285 公克的煤油進行燃燒，將其乘上煤油的燃燒熱進行計算而得到 1.23 kW。圖 4.4 的實驗值為將計算後得到的 1.23 kW 使用縮小尺度法則中的對流熱釋放率轉換為全尺寸中的熱釋放率為 389.39 kW。

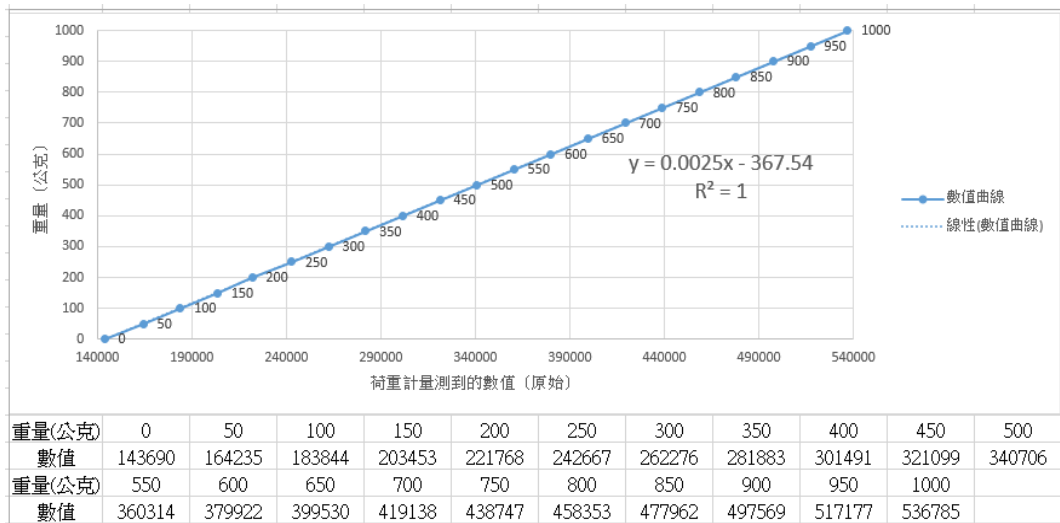


圖 3.32 藉由取到的值進行線性迴歸得到校正方程式

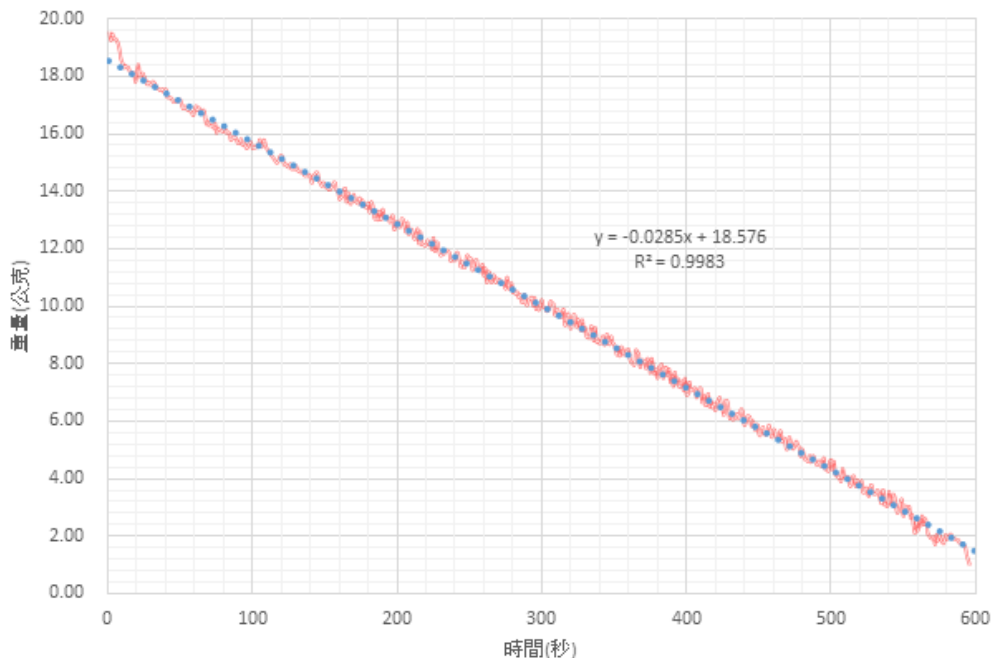


圖 3.33 火源實驗質量損失測量圖

Cai 和 Chow 學者針對居室火災使用液態燃料並建構不同通風因素之熱釋放率的曲線，如圖 3.34。然後由和 FDS 模擬出的熱釋放率得知，全尺度因為使用較大網格尺寸 0.2 m 模擬進而影響到熱釋放率曲線，將會導致熱釋放率急遽的上升呈現非穩態燃燒而且燃料提早被燒盡的現象，案例模擬均於約 1200 秒時，在氧氣供給量非常足夠的情況之下，將提早將燃料燒盡，原因是因為在使用相同的吸收係數下，因為網格大小不同會造成薄層吸收厚度差異性，所以將全尺度模型的吸收係

數下修為 0.1 m^{-1} 使熱釋放率曲線呈現穩態燃燒現象。

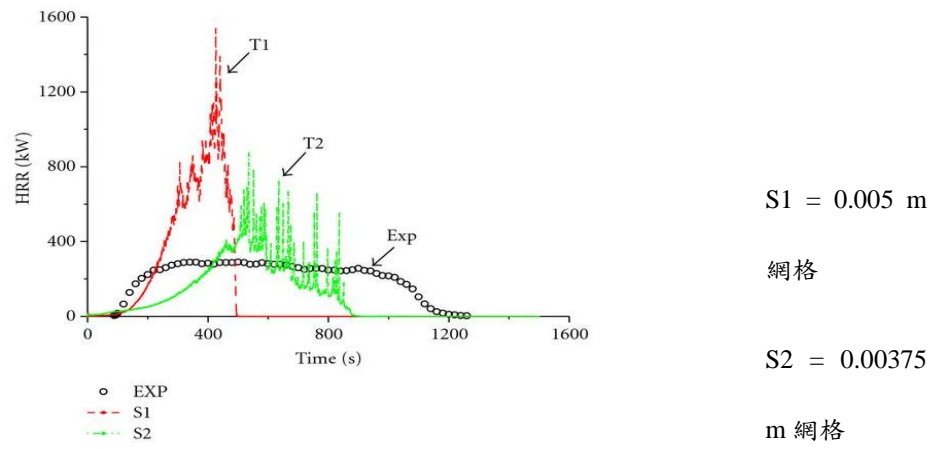


圖 3.34 N. Cai 和 W. K. Chow 研究 FDS 使用液態燃料預測和實際實驗的差異

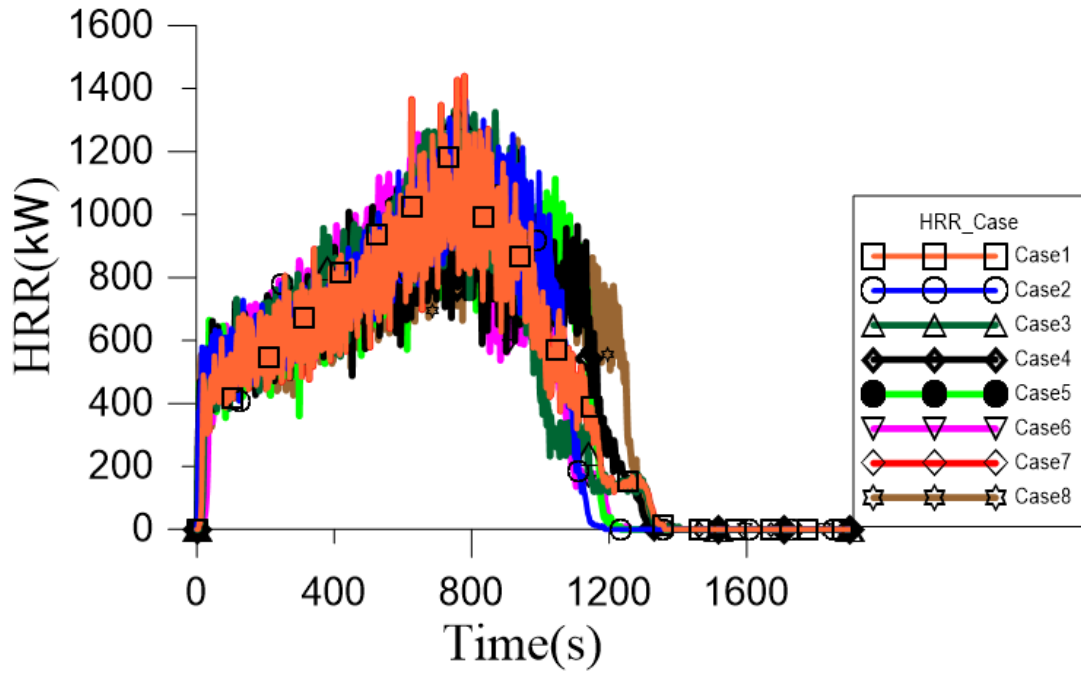


圖 3.35 吸收係數 5 於各全尺度之熱釋放率

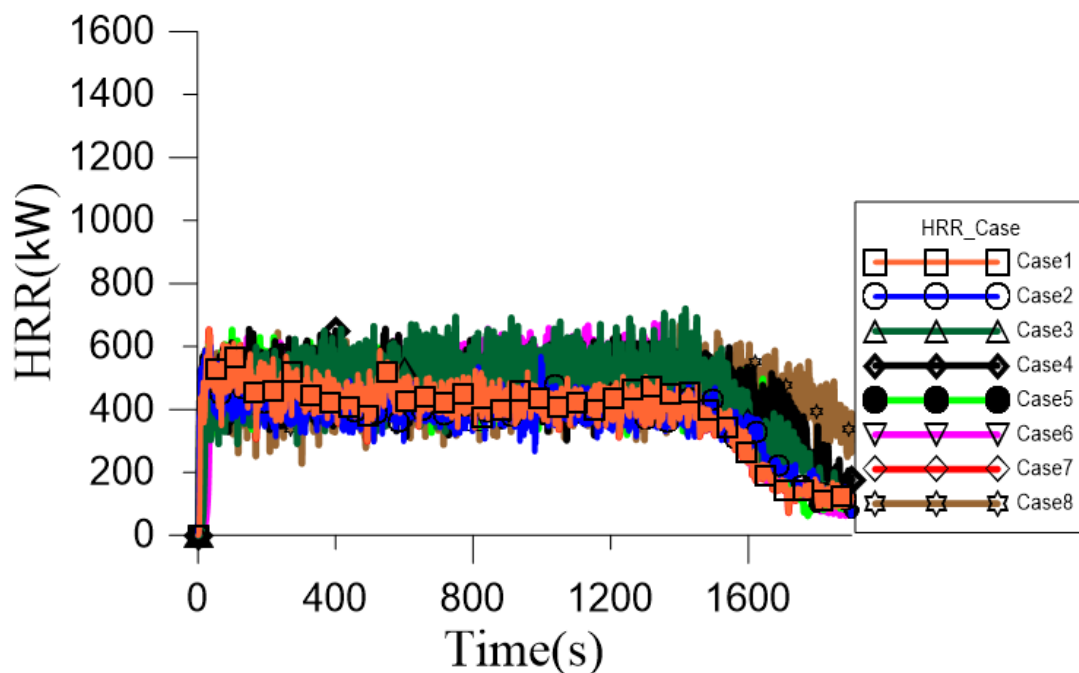


圖 3.36 吸收係數 0.1 於各全尺度之熱釋放率

3.3.10.2 實驗改善

在實驗中以吸塵器之扇形接頭做為設置氣簾，考量到該接頭狹縫並非完全平行而形成紊流，故在該接頭狹縫處，利用塑膠管填滿其出氣口處，使其達到整流之效果（如圖 3.37），但此改良同時也產生壓損，進而減少一定風速。再來即是風扇轉速問題，有鑑於先前實驗方法在量測風速時為前方壓克力板未鎖上即進行測量，如圖 3.38 中（a）圖所示於梯間門口中間處測量風速，此時並未於壓克力板密封後量測內部實際風扇速度，造成極大誤差，而在實際實驗將壓克力密封後，量測風扇速度礙於原本實驗測量風速計僅有圖 3.39（b）的型小型風速計，因此在量測面積較大的進氣風扇會有誤差，故使用（a）型較大風扇面的風速計來測量，也可以兩台風速計同時量測進、排氣實際於模型內風速的量測，相較於先前使用單一風速計量測單邊風扇速度，此方法為減少其相對應誤差，另外也發現模型外部壓克力鎖上後，壓力問題導致進排氣風扇需比原先調高更高轉速才能達到要求之風速值，氣簾量測亦同。

同時風扇要為了要精準符合 FDS 軟體實際模擬之氣流，將原本紊流修正為較

符合模擬之層流，使用加裝整流風罩之風扇^[5]（圖 3.40），其風場與模擬結果較為吻合。

本研究除使用了扇形風速計，也另外使用線性風速計如(圖 3.41 所示)並應用於 4.1 FDS 模擬及實驗中 4.1.9 Case9 案例中，一方面考量扇型風速計量測會因為量測位置而不同，故採用線型風速計測量，以不影響風扇風速直接量測出氣風速量大小。



圖 3.37 整流過後之氣簾模型



(a)固定點風速量測(原先
測量方法)



(b)進氣口風速量測



(c)排氣口風速量測

圖 3.38 實驗模型風速之校正示意圖



(a)量測進氣口風扇之風速計



(b)量測排氣口風扇之風速計

圖 3.39 風速計



(a)整流風罩為將另一風扇轉向並固定扇葉



(b) 風扇加裝整流風罩示意圖

(c) 風扇加裝整流風罩側視圖

圖 3.40 風扇加裝整流風罩示意圖



圖 3.41 線型風速計示意圖

3.4 長走道模型介紹

本節將利用全尺度模型，將房間及走道延伸為原先三倍長度如圖 3.42 所示，除了加長走廊長度以更符合高樓建築走道之設計之外，也間接彌補原先全尺度模型蓄煙空間的不足，而造成氣簾阻煙的優點無法發揮，故在此修改模型結構以更貼近高樓建築之火災煙流流動情形，同時將梯間樓梯之對外窗關閉，其餘相關設定參數則是依據原先縮小尺度模型之全尺度參數設定(參考 3.3.1 節及 3.3.2 節)，火源房間一樣在靠近梯間之房間內，模擬火災煙流最糟之擴散情形，氣簾設置於各樓層梯間門處。

介紹完模型後，此處將持續探討氣簾阻煙之實際效用，並於每個樓層往梯間門口處安裝阻煙氣簾，氣簾面積同樣為長寬為 $1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ ，此處將氣簾速度設定最大且又不影響人員逃生之速度 17 m/s ，並於此處分別設置四組模擬，分別為針對無設置氣簾、氣簾設置於梯間門口靠近梯間處、氣簾靠近走道梯間門口一處及梯間門口處雙邊均設置氣簾，模擬 600 秒，同時在梯間門口處設置熱電偶、一氧化碳和能見度探頭以及切面，測點設置如圖 3.43 所示，設置 3 個垂直熱電偶及 3 個一氧化碳探頭皆在同一位置，設置高度皆在高度 120 cm 至 180 cm 每間隔 20 cm 設置一測點，共設置 24 個測點，以探討是否會因為設置氣簾位置、數量的不同，而在對於能見度、溫度及一氧化碳...等有所差異，詳細案例如表 3.7 所示。

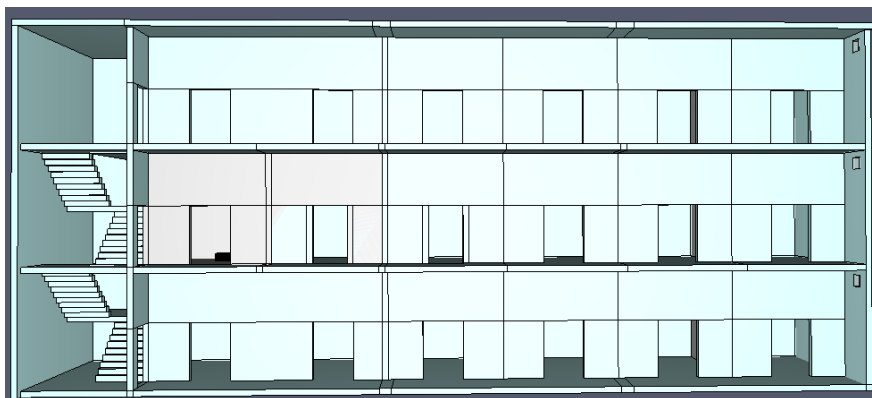


圖 3.42 長走道模型正面圖

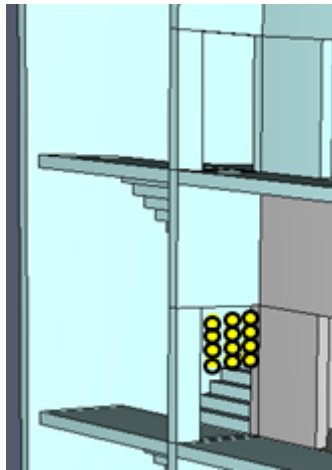


圖 3.43 測點設置示意圖

表 3.7 長走道氣簾設置案例

項目 案例	氣簾數目	設置位置
Case1	無	無
Case2	一	左側（梯間門內測）
Case3	一	右側（梯間門外測）
Case4	二	左右側（梯間門內外測）

註：左側進氣開口關閉、每層樓設置氣簾、梯間及走道門皆為開啟狀態

3.5 高樓建築案例模型介紹

本小節是根據上述經過實驗及模擬得出氣簾之效用以及相關設定參數值，並將其應用在高樓建築模型上，此處將會說明模型網格特徵長度分析、火源的設定、各式測點位置、氣簾的建置、相關模擬參數的介紹與模型的建置。

3.5.1 高樓建築模型介紹

模擬實際建築物是以某校之教學大樓為例，以該實際模組來模仿一般大樓，最後再假設情境來模擬火災發生後的情形。如所示。在進行目標建築物 3D 模型繪製時，模型尺寸大小是由該校提供的教學大樓工程圖所繪製而成，長、寬、高為 $72.8\text{ m} \times 21.6\text{ m} \times 44\text{ m}$ 。其中，地下一樓至三樓內部配置與隔間有所不同，而三樓以上配置與隔間皆相同，隔間及擺設為自行假設，圖 3.45 (a) 為地下室，該樓層本研究採淨空並未放置任何物品，(b) 至 (d) 分別是一樓、二樓、三樓至十樓之放置物品的配置圖，分別放置了沙發及木桌，以 WOOD 參數設定之，其他泡棉、隔間材質皆使用 FDS 內定值，如所表 3.8 示。

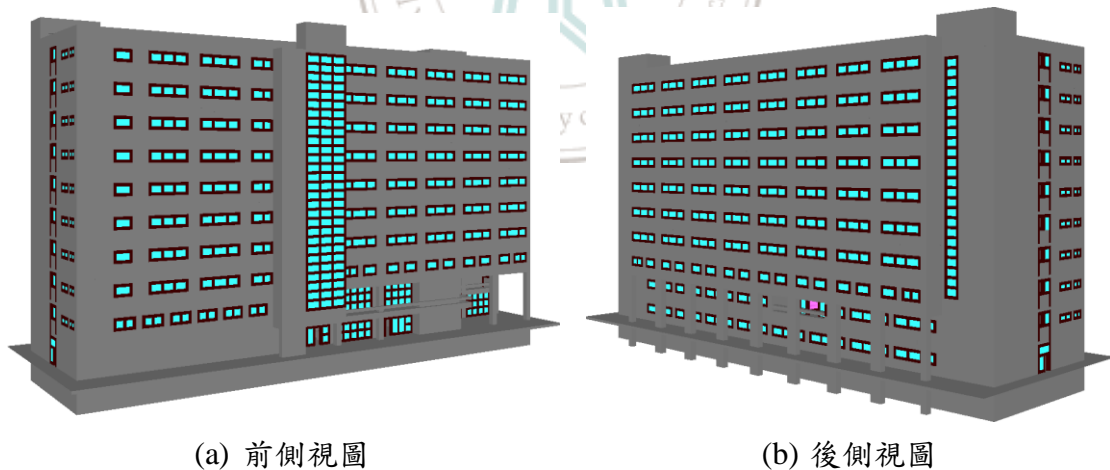
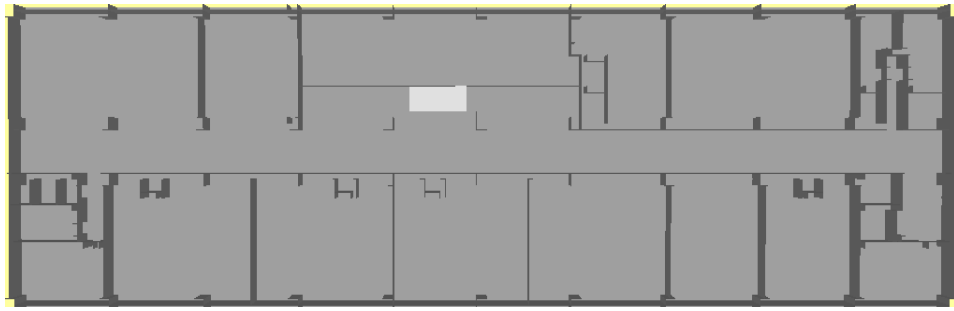
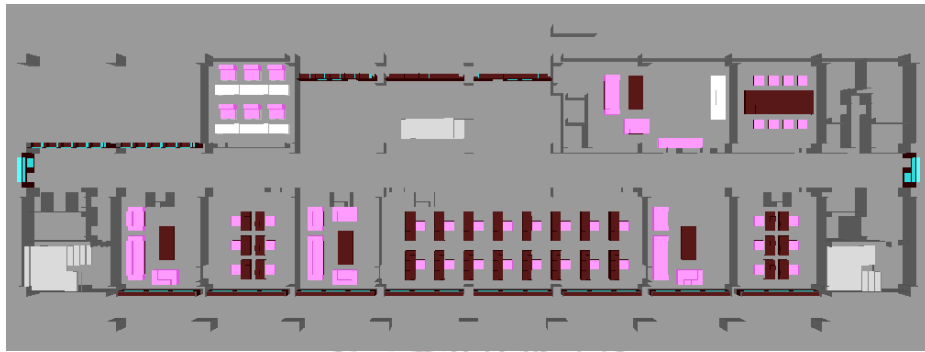


圖 3.44 本案例探討之高樓外觀示意圖



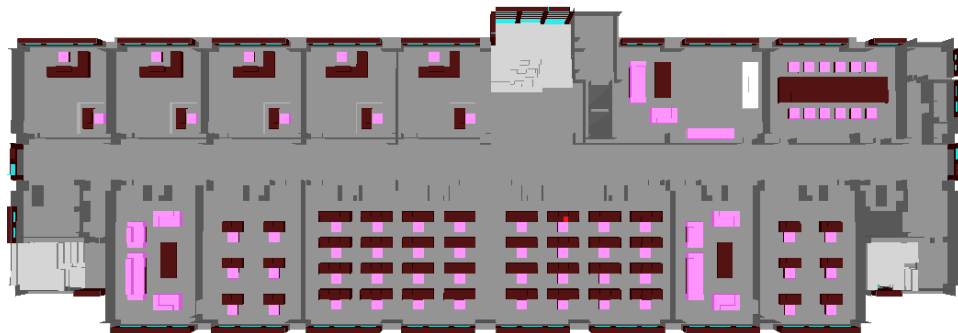
(a) 地下室



(b) 一樓



(c) 二樓



(d) 三樓至十樓

圖 3.45 本研究之大模型之內部配置圖

表 3.8 本案例模擬所使用之材質參數設定一覽表

隔間材質	Concrete	
	SPECIFIC_HEAT	1.04 kJ/kg K
	DENSITY	2280 kg/m ³
	CONDUCTIVITY	1.80 W/m K
易燃物材質	Wood	
	SPECIFIC_HEAT	1.215 kJ/kg K
	DENSITY	545 kg/m ³
	CONDUCTIVITY	0.12 W/m K
	HEAT_OF_COMBUSTION	19000 kJ/kg
	N_REACTIONS	1
	HEAT_OF_REACTION	500 kJ/kg
	NU_FUEL	1
	REFERENCE_TEMPERATURE	300°C
	PYROLYSIS_RANGE	145°C
	Foam	
	SPECIFIC_HEAT	1 kJ/kg K
	DENSITY	40 kg/m ³
	CONDUCTIVITY	0.05 W/m K
	HEAT_OF_COMBUSTION	30000 kJ/kg
	N_REACTIONS	1
	HEAT_OF_REACTION	1500 kJ/kg
	NU_FUEL	1
	REFERENCE_TEMPERATURE	300°C
	PYROLYSIS_RANGE	80°C

3.5.2 火源設定

本案例火源設定為油類火災，因為其燃燒快速、煙氣也產生的快，加上本次模擬主要為針對建築物起火後，煙於建築物流動之狀態，故設定煤油為主要燃燒的燃料，其相關燃燒反應式、燃料相關設定之參數（表 3.3）。

關於 FDS 火源表面及燃料體積詳細設定為一液態煤油燃料，火源面積為 $2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 液態燃料高度為 0.00625 m 共 10 升煤油（參考圖 3.47），上方紅方塊為點火源設定 2 秒後即消失。

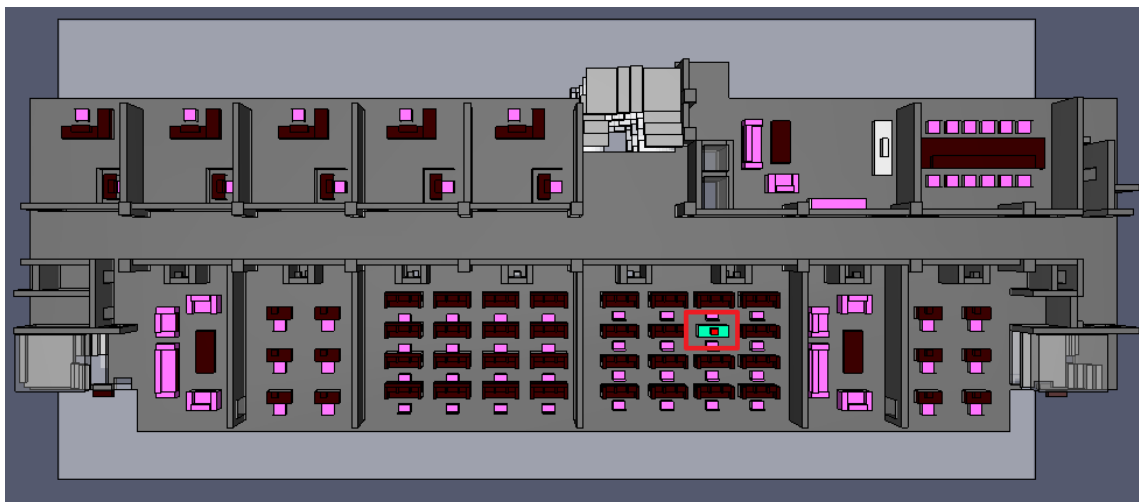


圖 3.46 七樓火源設置位置示意圖

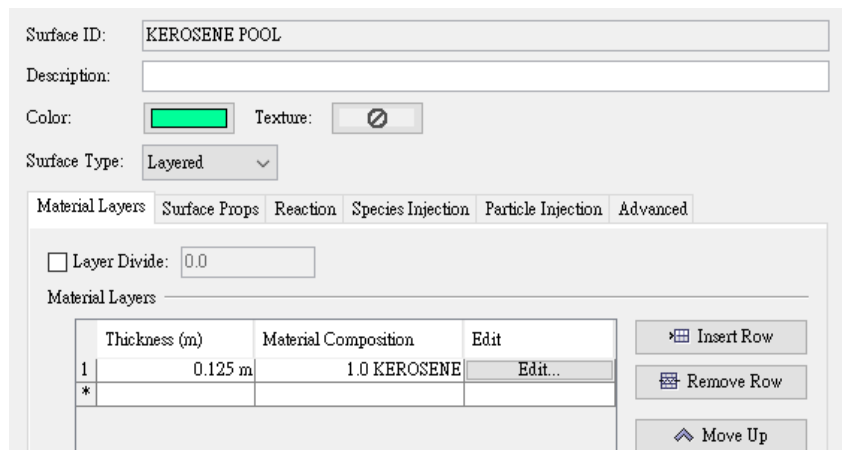


圖 3.47 液態煤油表面設定

3.5.3 模型網格分析

本案例將 10 公升煤油換算成相對應的體積等於 0.01 m^3 ，設定油池之燃料厚度 0.00625 m ，則火源面積為 $\frac{0.01 \text{ m}^3}{0.00625 \text{ m}} = 1.6 \text{ m}^2$ ，煤油燃燒效率為 96.5% ^[20] 熱釋放率計算如下：

$$\begin{aligned} \text{HRR} &= x \times \Delta H \times \dot{m}'' \times A \\ &= 0.965 \times 43,200(\text{kJ/kg}) \times 0.039(\text{kg/m}^2\text{s}) \times 1.6(\text{m}^2) = 2,601\text{kW} \end{aligned}$$

其中 \dot{m}'' (單位面積質量損失率)： $0.039 \text{ (kg/m}^2\text{-s)}$ ； ΔH (煤油燃燒熱)： $43,200 \text{ (kJ/kg)}$ ； x ：燃燒效率； A ：火源面積

故本研究在網格靈敏度分析上使用公式 2-3 之方程式來計算 D^* ，計算出來的結果如式 3-28 所示，其中 \dot{Q} 為火源熱釋放率。本案例之熱釋放率約為 $2,601 \text{ kW}$ ，至於空氣密度 (ρ_0) 為 1.2 kg/m^3 、比熱 (C_p) 為 1 ，而起始溫度 (T_0) 則為 299 K 。

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 \cdot T_0 \cdot C_p \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/5} = \left(\frac{2601}{1.2 \cdot 299 \cdot 1 \cdot \sqrt{9.81}} \right)^{2/5} = 1.39 \text{ m} \quad (3-28)$$

在學者李訓谷^[48]的研究中曾指出，網格大小約略等於 $0.1 D^*$ 時，其火源中心軸流速及溫度與 McCaffrey^[47]提出之火源中心軸氣流速度及溫度半經驗公式較為吻合，故本研究在尺度 1:1 下之 $0.1 D^* = 0.1 \times 1.39 = 0.139 \text{ (m)}$ 、尺。此外，根據學者 Hill 的研究結果， D^* 除以網格大小的比例結果應該要介於 4 至 16 的範圍內，此方法在學者 Chi 的研究中也有被採用。故本研究先使用 0.25 m 作為網格尺寸的大小， D^* 除以網格大小結果皆為 5.56 ，介於 4~16 之間，故本研究最初設計的網格大小為 0.25 (m) 是可以接受的，但受限於電腦運算速度限制所以僅針對局部區域做細部網格模擬，時間得以於 7 天內完成， D^* 除以網格大小結果，如式所示。

$$\frac{D^*}{\delta_x} = \frac{1.39}{0.25} = 5.56 \quad (3-29)$$

3.5.4 模型測點設置

建築火災的發生時我們除了觀察建築物煙霧的流動外，也需要探討火場的相關重要的因子，因此本模型透過 FDS 軟體設置有溫度、一氧化碳、壓力、能見度及氧氣等切面，同時也設置相關測點於模型中，詳細配置如圖 3.48 所示，所有測點高度均在高度 1.5 m 處，F7 fire 測點於火源上方 0.7 m 處，F7 DR 與 DL 兩個測點則設置於火源房間兩個逃生門處，至於走道部分則設置於兩旁逃生梯和中間樓梯豎井，圈選處為樓層逃生梯共三個測點，並於六樓至十樓每個樓層走道均有設置。



圖 3.48 七樓測點布置圖

表 3.9 七樓溫度測點位置圖

編號	測點名稱	X Y Z 方向測點位置 (m)
F7 fire	7F 火源上方	27.2 , 15.6 , 25.5
F7 DR	7F 火源房間右門	23.4 , 11.0 , 25.5
F7 DL	7F 火源房間左門	35.0 , 11.0 , 25.5
F7 D1	7F 走廊靠近左側樓梯	66.4 , 9.4 , 25.5
F7 D2	7F 走廊靠近中間樓梯	32.4 , 9.4 , 25.5
F7 D3	7F 走廊靠近右側樓梯	2.4 , 9.4 , 25.5

3.5.5 案例情境設定

案例情境主要為針對高樓火災，起火層於七樓火源類型為油類火災，燃料為 10 公升煤油，教學大樓房間窗戶均未對外開啟，同時假設人員逃生時過於緊迫故房門均為打開狀態，僅走道兩端窗戶開啟，詳細模擬條件如表 3.10 情境設定，因為電腦設備有限，故將網格分為 48 個網格區，並由 10 台電腦平行化運算模擬，其中於起火層 7 樓網格切細，網格分割大小為 0.25 m × 0.25 m × 0.25 m。

表 3.10 模型環境設定

基本模擬設定介紹 (Case1)	
模擬區域尺寸：85 m × 40 m × 44 m	環境溫度：26°C
模擬建築物尺寸：72.8 m × 21.6 m × 44 m	環境壓力：101,325 Pa
火源區域網格：0.25 m × 0.25 m × 0.25 m	環境濕度：73%
其餘網格大小：1 m × 1 m × 1 m	總模擬時間：600 秒

表 3.11 各案例情境設定

項目 案例	網格數目	氣簾數目	設置位置	氣簾速度	情境描述
Case 1	422,508	無	無	無	自然排煙
Case 2	803,532	一	樓梯側	17 m/s	偵煙器作動五秒後氣簾開啟
Case 3	803,532	二	雙邊	4 m/s	偵煙器作動五秒後氣簾開啟，同時打開頂樓排煙口

案例 Case2 情境主要為針對 Case1 情境修改僅加裝阻煙氣簾，氣簾裝設在兩邊樓梯梯間門口內側，因為主要針對起火層以上煙流的阻煙情形，故安裝氣簾於六樓以上均設置氣簾，設置如圖 3.49 所示，右側氣簾尺寸為 1.6 m × 0.2 m × 0.5 m，

左側氣簾尺寸為 $0.8\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ，因為是依照門的寬度去做設置所以大小不一，排氣速度皆設為 17 m/s ，網格與 Case1 一樣七樓切細另外也針對氣簾設置部分區域也有切細網格。

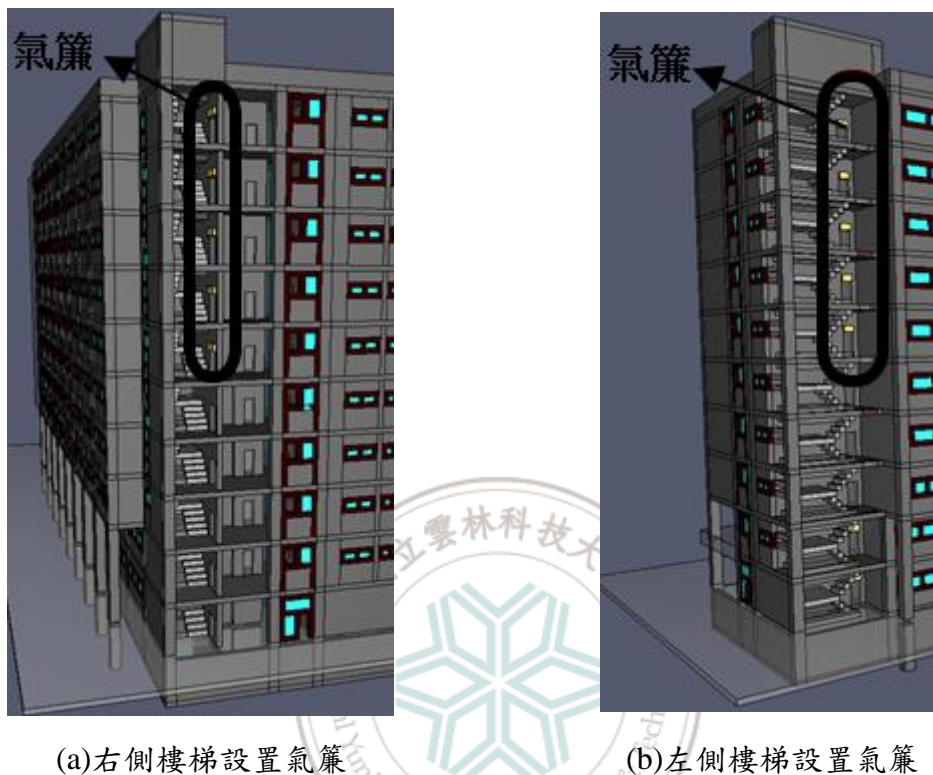


圖 3.49 兩旁樓梯氣簾示意圖

案例 Case3 情境主要為針對 Case2 情境修改單一氣簾變成雙氣簾阻煙，氣簾裝設在兩邊樓梯梯間門，並設置中間樓梯豎井排煙口，隨起火房間偵煙頭作動 5 秒後啟動，網格與 Case1 一樣七樓切細另外也針對氣簾設置部分區域也有切細網格。

第四章、結果與討論

4.1 FDS 模擬及實驗討論

本實驗模擬主要為八組實驗模擬，包含四種類型：(1)三明治加壓(2)正壓排煙(3)負壓排煙(4)自然排煙，並於四種類型下各添加阻煙氣簾以便比較；挑選前述(1)、(2)、(3)種實驗類型的主要因為此三種排煙策略在全尺度或實驗下，仍有煙流擴散至梯間，加上先前實驗風速尚未修正為正常排氣量，同時走廊結構未考慮大樓走道無多道門之設計，故本研究根據前人實驗模型，去掉二樓走道靠近右邊的門及上方構造物，來探討煙流擴散沉積的情形。

本實驗及模擬將以縮小尺度實驗驗證在調整實驗的實際風速轉速，如前述 3.3.10 縮小尺度改善章節裡所述，利用與先前實驗不同量測進排氣風速之方法，把原先在外部遮罩未鎖上前量測對梯間走道處通過之風速，改以對模型外部遮罩鎖上後，而內部兩個風速計固定在進排氣口表面，最後再以水性壓克力填縫膠塗於遮罩板四周，以降低漏氣現象來符合實際模擬模型的密封性，當然遮罩板在先前實驗未上鎖量測風速與上鎖後量測風速，因為壓力有極大差別，調整過後風速轉速如表 4.1，轉速以原先方法打開遮罩板測量風扇葉面實際風速，達到縮小尺度換算後並符合法規進排氣之風速之轉速，與上蓋封鎖遮罩板以及填縫膠，查看模型內風速計量測之風速，同樣在達到要求風速之實際轉速，將以調整修正過之風速，應用於接下來的實驗及模擬當中，驗證符合縮小尺度法則之吻和度，另一方面也會在此四種案例中額外設置單一阻煙氣簾（靠近梯間向），驗證阻煙氣簾在此模型下的實質阻煙效率及影響，並將氣簾風速設定為 17 m/s 作動下，分析相關火場因子之探討。

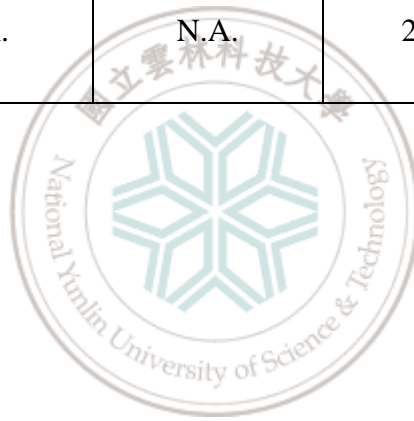
在實做三組測試實驗及模擬時，關於環境溫度則是在實驗過程前，將各模型中各測點溫度量測值統一加總平均做為環境溫度，Case1~8 溫度分別為 26.25、25.52、26.54、25.49、31.82、30.16、28.48 及 25.89 度，主要於實驗前置前將風扇於模型

中運行一段時間，並將模型中各溫度測點穩定後加總平均之。

表 4.1 風扇校正前後風速比較表

項目 案例	左側風扇風速 (m/s)		右側風扇風速 (m/s)	
	原風速	修正後	原風速	修正後
三明治系統	0.462	0.878	2.154	3.953
正壓排煙	0.534	0.878	N.A.	N.A.
負壓排煙	N.A.	N.A.	2.452	3.953

註：N.A. (Not Available)



4.1.1 Case1 案例分析

Case1 是以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬，並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為梯間進風設備一、三樓作動與排煙設備二樓作動，進氣通風口二樓封閉僅一、三樓開啟，排氣口一、三封閉僅二樓開啟，且在內部風速調整後並拿掉中間走道右邊門口與上方構造物的情況下，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺^[5]，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，探討煙流擴散沉積的情形。

模擬全尺度模型模擬時間利用縮小尺度法則公式 $t_m = t_f (l_m / l_f)^{1/2}$ 將 1,900 秒模擬時間換算壓縮成 600 秒後，進行小尺度與實驗於火源燃燒 600 秒之間的變化比較，在圖 4.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖中，發現在阻煙策略三明治加壓，在拿掉中間走道右邊門口與上方構造物的情況下，煙流擴散整體情況可以很順利的從排煙口排出，與陳聖澤學者先前實驗比較（未拿掉）在此稱為先前實驗（煙流圖可參照附錄圖 4.1），在 100 秒時原本會在中間走道上方蓄積的煙層，在此案例中無煙層蓄積情況，在全尺度 320 秒時先前模擬會因蓄積一定厚度的煙層，加上煙氣來不及排出，使得煙流竄進梯間，而本案例中全尺度無擴散至梯間，反而在三明治加壓下順利的從二樓排煙口排出，而在 300 秒實驗及 950 秒全尺度模擬，先前實驗之煙流情況已進入梯間樓梯，且其全尺度模擬煙流已竄升之三樓梯間及走道處，對比本案例在同時間下，皆無擴散至梯間情況發生，且持續至模擬及實驗結束，也顯見在對模型修改後，更有利煙氣於在走道上的擴散，同時三明治加壓排煙下，阻止煙流進入梯間之效果也更佳。

再來比較 Case1 全尺度模擬、小尺度模擬與小尺度實驗等三組測試（以下均簡稱“三組測試”）由 0 至 600 秒的煙霧變化。由圖 4.1 看出在 10 秒前三者火

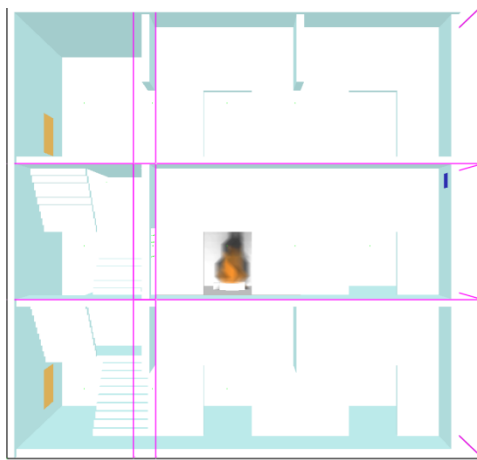
源型態皆很相近，但是在煙霧的部分全尺度煙霧明顯較實驗與小尺度來的多；在 200 秒時，三組測試之煙氣皆因熱浮力上升至天花板，並沿著天花板排出，過程中全尺度模擬在 320 秒時，因煙氣量較大，導致部分煙氣往下沉進而充滿走道，並隨著火源熄滅後而稍有改善。

在溫度測點方面見圖 4.2，在與先前實驗互相比較後，本研究之 Case1 因為煙層很順利地被排出且沒有下沉的緣故，使得各測點的溫度都無明顯變化，而火源房間的走道測點，在先前全尺度模擬中可以輕鬆來到 200 多度，小尺度及實驗也別可以達到 100 多度及 70 幾度高溫，然而在 Case1 三組測試結果看來最高僅來到 58.5 °C，也因為煙霧沒有太多竄進梯間樓梯，故梯間溫度曲線無較大變化，僅在走道上有較大的變化見圖 4.2 B，在各溫度測點曲線下，無明顯較大之差別見圖 4.2 A，趨勢情況皆相同，也顯現在驗證縮小尺度法則上，對於煙流流動有很高的符合度。

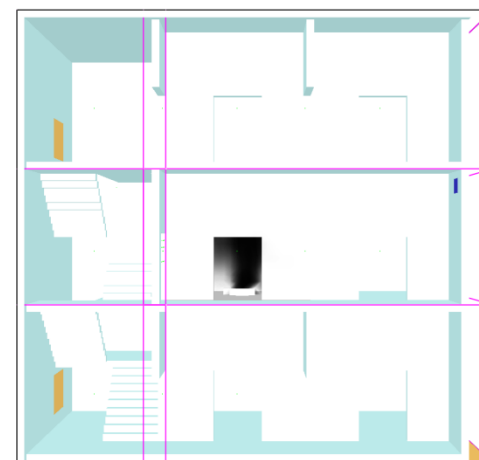
能見度觀察如圖 4.4 左圖小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 之能見度模擬結果其測點皆設置在各樓層門口中間處，由模擬煙流圖中發現，煙霧在三明治加壓下順利排出，使得能見度僅 V202 有較大的變化，全尺度因為燃料較大使得煙霧較多，在初期模擬秒數下能見度就很快下降直至模擬結束，小尺度方面則是中後段下降，則是因為煙霧沒有來得全尺度多，故在天花板上蓄積後沉降才有此結果；圖 4.4 右圖為光強度 (實驗) 結果顯示反而在 L202 有較好的光強度，L201 則是有較差的光強度，推測可能與探頭的方向性有關，因為光感度感測器為一平面量測，故隨著時間進行煙霧在天化板蓄積沉降，遮蔽了光線使得才會使得光強度逐漸下降。



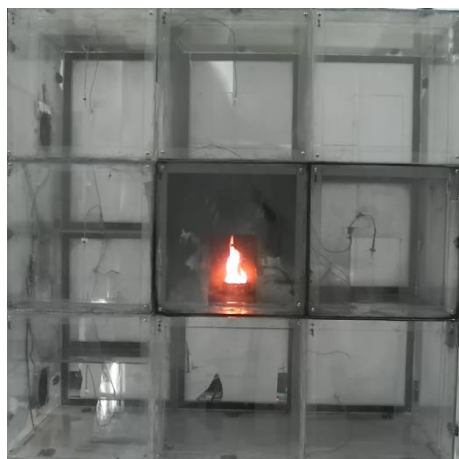
(a1) 實驗 5 秒



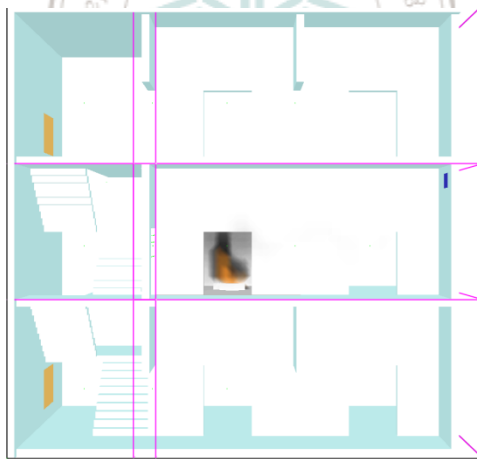
(b1) 小尺度 5 秒



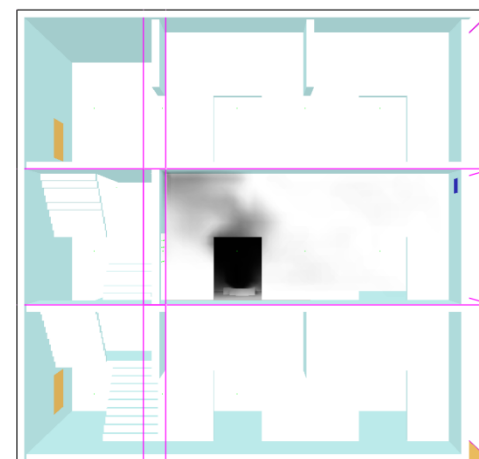
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒



(b2) 小尺度 10 秒

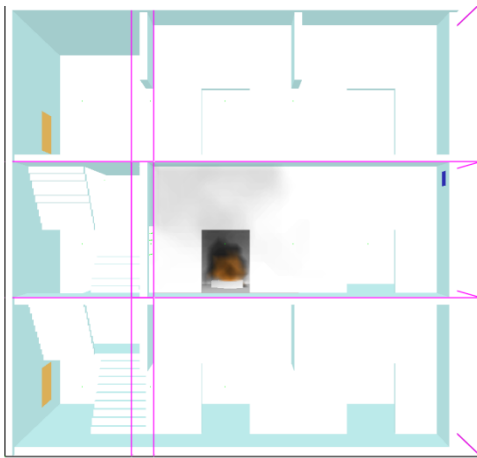


(c2) 全尺度 30 秒

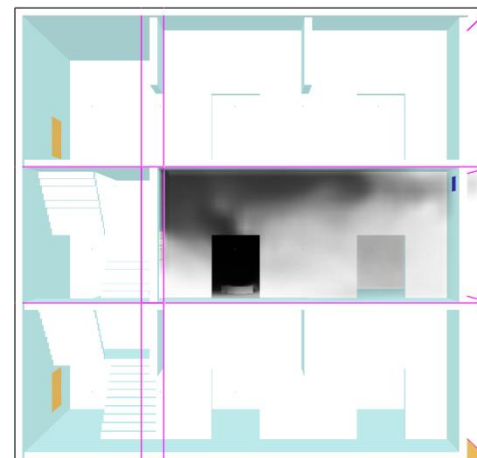
圖 4.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



(a3) 實驗 100 秒



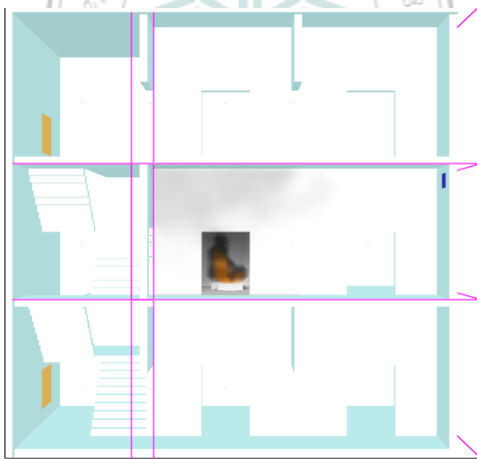
(b3) 小尺度 100 秒



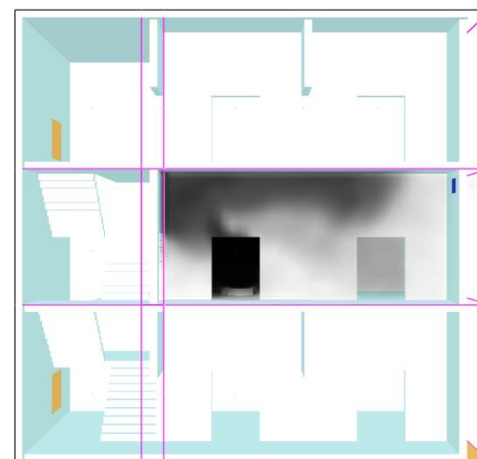
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒



(b4) 小尺度 200 秒

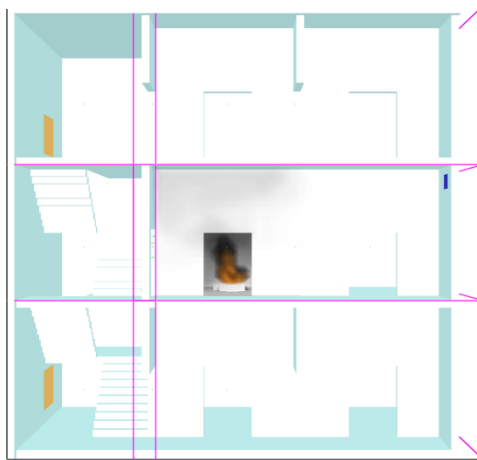


(c4) 全尺度 635 秒

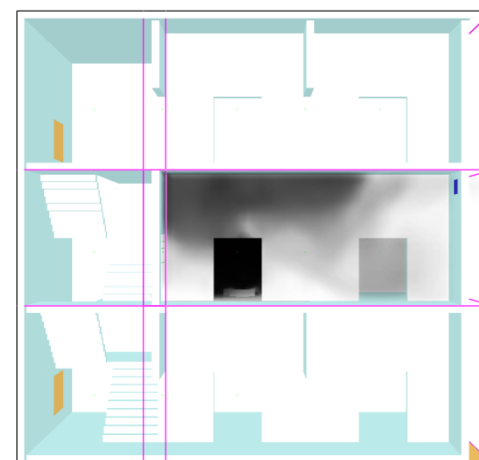
圖 4.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



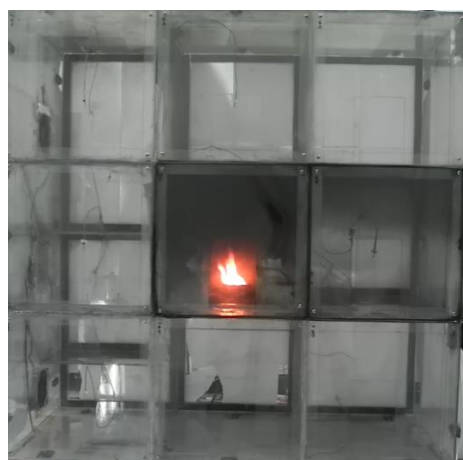
(a5) 實驗 300 秒



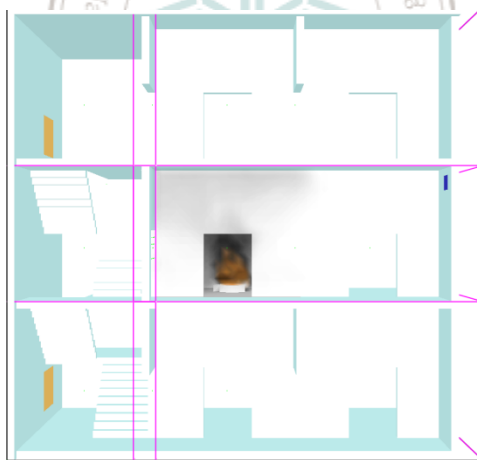
(b5) 小尺度 300 秒



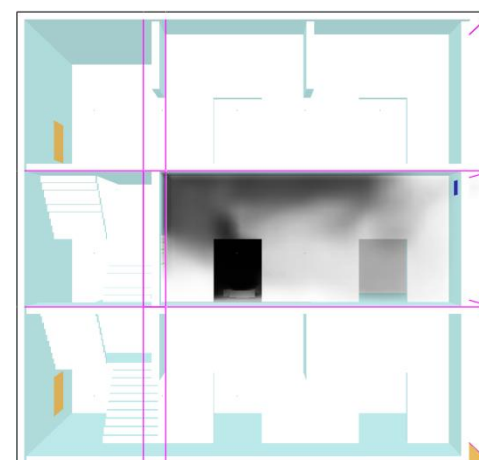
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

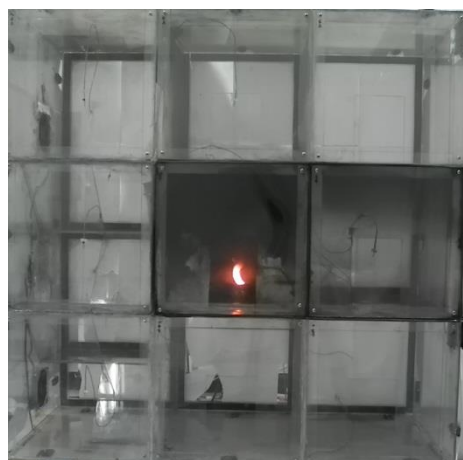


(b6) 小尺度 400 秒

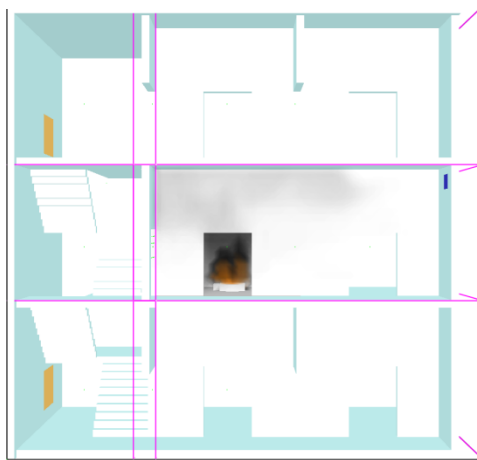


(c6) 全尺度 1265 秒

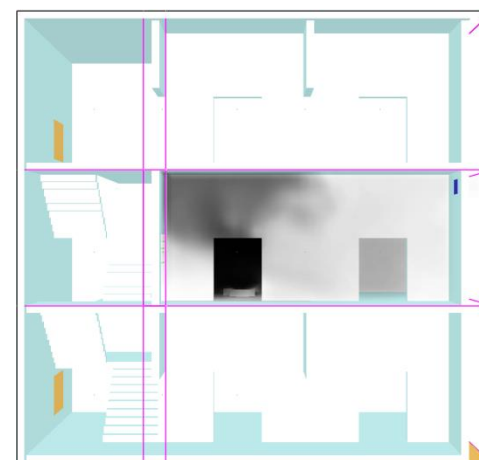
圖 4.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



(a7) 實驗 500 秒



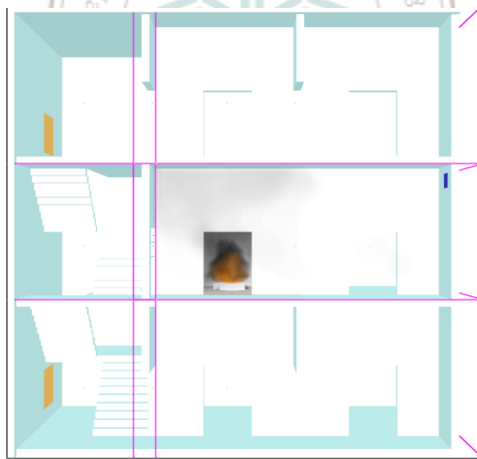
(b7) 小尺度 500 秒



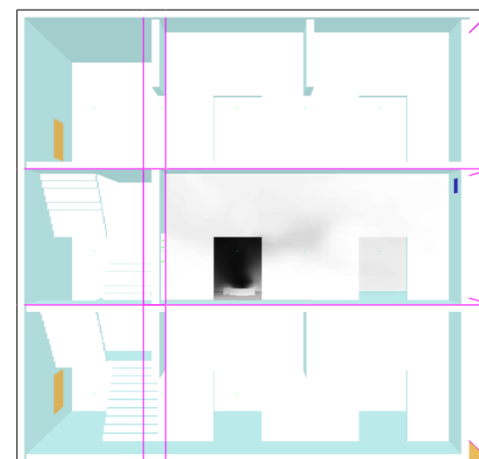
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

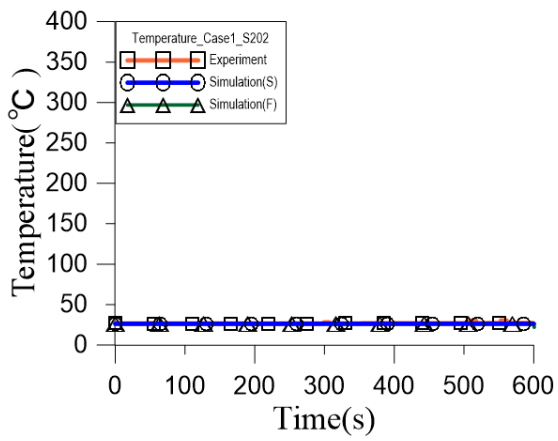


(b8) 小尺度 600 秒

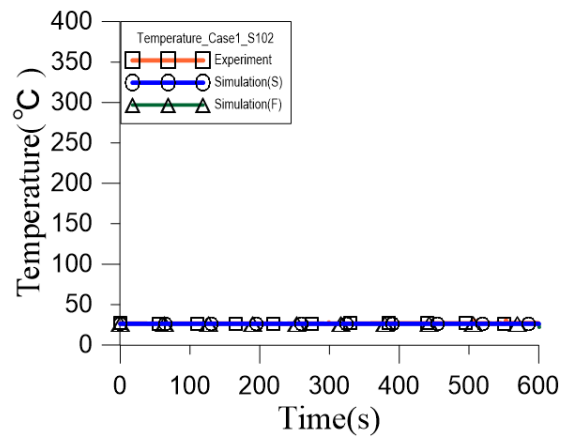


(c8) 全尺度 1900 秒

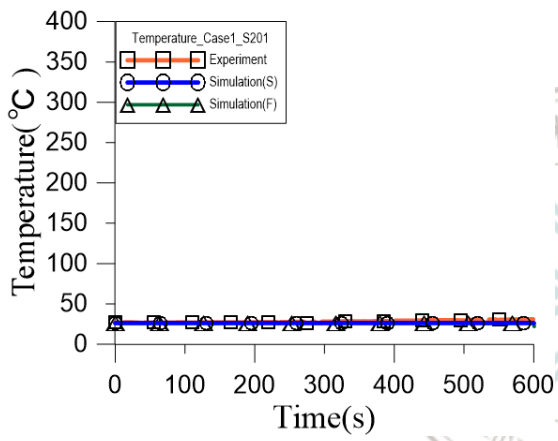
圖 4.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



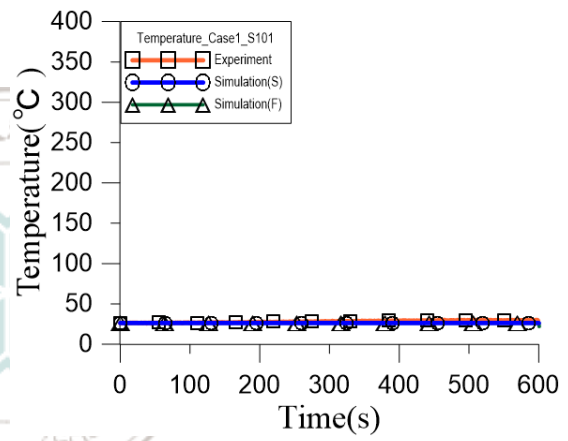
(a) S202



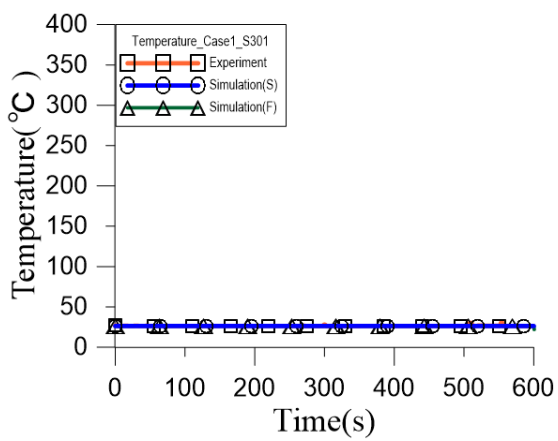
(b) S102



(c) S201

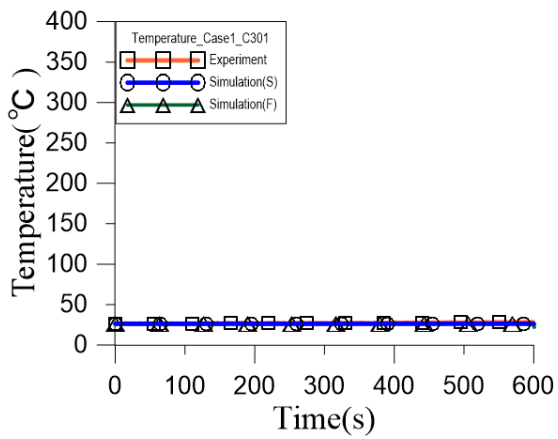


(d) S101

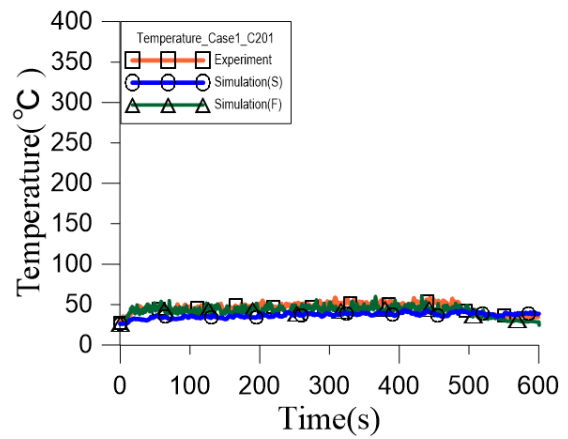


(e) S301

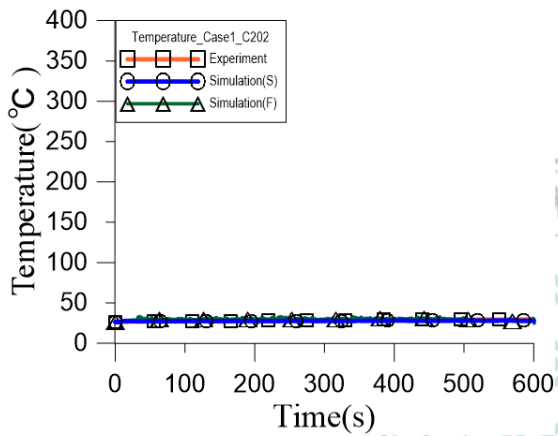
圖 4.2 Case1 梯間溫度曲線圖



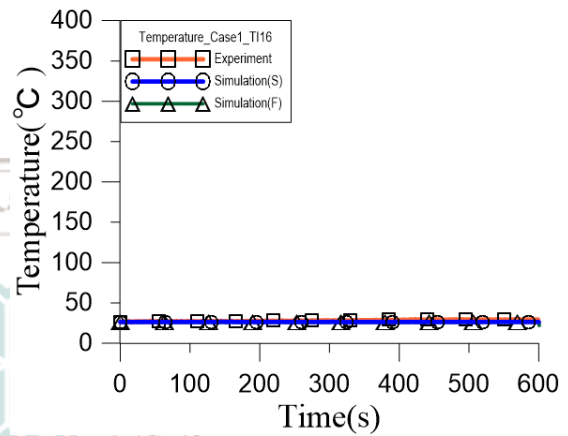
(f) C301



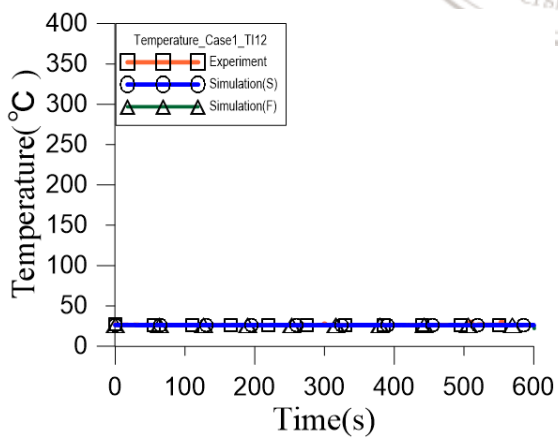
(g) C201



(h) C202

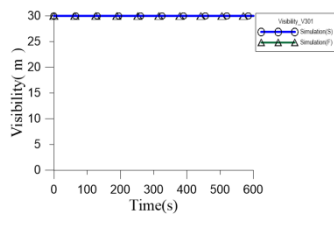


(i) TI16

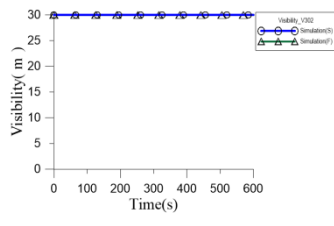


(j) TI12

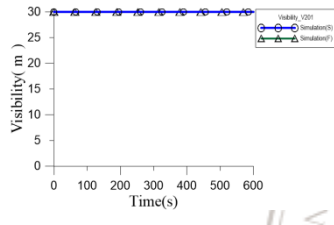
圖 4.3 Case1 走道溫度曲線圖



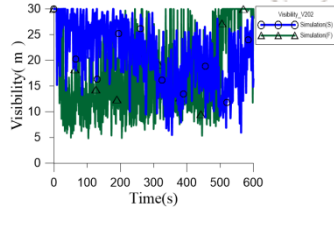
V301



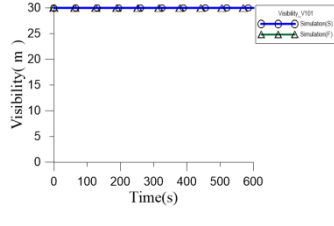
V302



V201

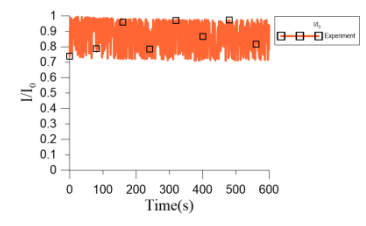


V202

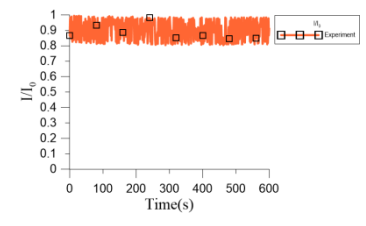


V101

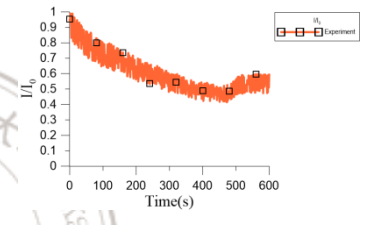
能見度(模擬)



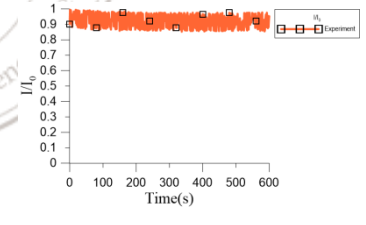
L301



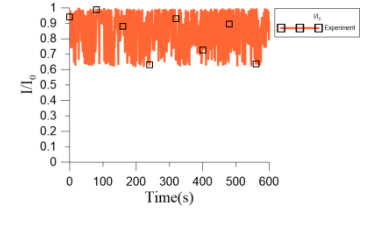
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.4 Case1 能見度與光強度對照圖

4.1.2 Case2 案例分析

Case2 是以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬，並與 1:10 之實驗結果進行比較，與 Case1 設置相同火場情境設定均為梯間進風設備一、三樓作動與排煙設備二樓作動，進氣通風口二樓封閉僅一、三樓開啟，排氣口一、三封閉僅二樓開啟，並在二樓梯間往走道門口上方設置一阻煙氣簾，且在內部風速調整過後和移走中間走道右邊門口與上方構造物的情況下，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺^[5]，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，而氣簾排氣於全尺度下速度為 17 m/s，小尺度下速度則為 5.375 m/s；排氣量則為全尺度為每秒 1.7 立方公尺，小尺度則為每秒 0.005 立方公尺並探討煙流擴散沉積的情形。

模擬全尺度模型模擬時間同樣利用縮小尺度法則公式 $t_m = t_f (l_m / l_f)^{1/2}$ 將 1,900 秒模擬時間換算壓縮成 600 秒後，進行小尺度與實驗於火源燃燒 600 秒之間的變化比較，在圖 4.5 中，發現在阻煙策略三明治加壓並設置氣簾下，煙霧雖無明顯的擴散至梯間，但是整體煙流擴散卻是很紊亂，不像 Case1 煙層由頂部蓄積而下沉，反而是受到氣簾排氣干擾，使得原先穩定蓄積的煙層，變成擴散整個走道間；初期煙氣剛從火源房間出來，並受到氣簾氣流影響水平擴散開來，使得初期測點溫度略高於 Case1，而在實驗及全尺度後期時，因為氣簾干擾煙層使得擴散整個走道，因此排煙結果相比較 Case1 還是有部分煙氣未排出於走道上。

溫度測點方面，也是因為煙流未竄進梯間，故梯間溫度測點見圖 4.6 並無明顯變化，而走廊測點 C201，溫度曲線整體比 Case1 上升一些，詳細原因可以從煙流變化圖中得知，如上述所講主要受到氣簾氣流影響使得煙團受到干擾而充滿走道間，進而使溫度上升一些，實驗溫度最高也有來到 75.76 °C，而全尺度模擬溫度

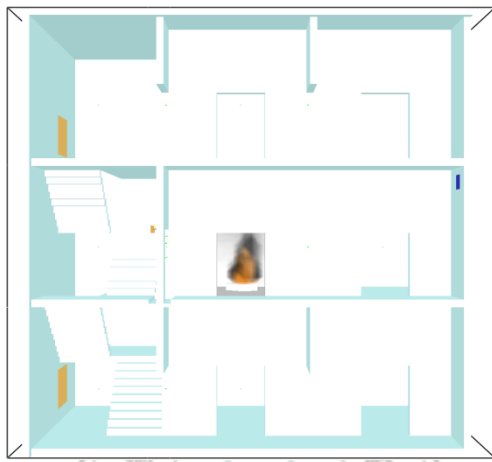
也是同樣如此，主要都是煙氣量大加上氣簾干擾才有此現象，而比較 Case1 全尺度模擬、小尺度模擬與小尺度實驗等三組測試（以下均簡稱“三組測試”），在驗證縮小尺度法則之吻合性，三組測試中在 C201 及梯間門口 TI16 兩側點有明顯之溫度變化，C201 全尺度模擬於實驗皆是因為煙氣量較小尺度大，故如初期所述受到氣簾氣流影響進而都有溫度上升之情形，只是在實驗溫度未下降乃是火源還在燃燒，而此時的全尺度已熄滅故有此現象，而燃燒較久的原因推測氣簾影響燃燒情形。

能見度觀察如圖 4.8 左圖為能見度（模擬）小尺度（1:10）與全尺度（1:1）針對測點皆設置在各樓層門口中間處，由模擬煙流圖中，發現在 V202 與 V201 有較大的變化，因為全尺度因為燃料較大使得煙霧較多，加上氣簾氣流干擾下，能見度均不甚理想，直至火源熄滅效果才有改善，小尺度方面則則是因為煙霧沒有來得全尺度多，故較無明顯能見度上的變化，圖 4.8 右圖為光強度（實驗）結果顯示而在 L201 光強度有逐漸下降的趨勢，而在 L202 卻是有較好光強度，推測實驗過程中煙氣經氣流稀釋擴散於走道間，故光強度無明顯變化，而 L201 因為靠近火源，煙氣於門中竄出並於頂部蓄積沿著門下方沉降，故有此下降結果。

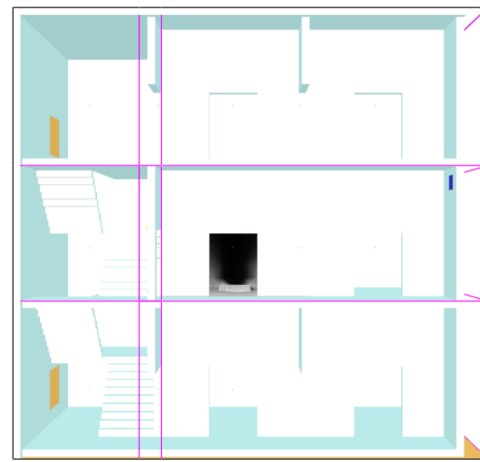
添加氣簾來阻止煙流進入梯間同時維持良好的能見度，但在此案例可能不是有那麼明顯的效果，因為本身就是案例為阻煙策略的進排氣條件，加上走道較短不適合煙流的擴散，致使在局部空間累積，故在結果表現上不是那麼好。



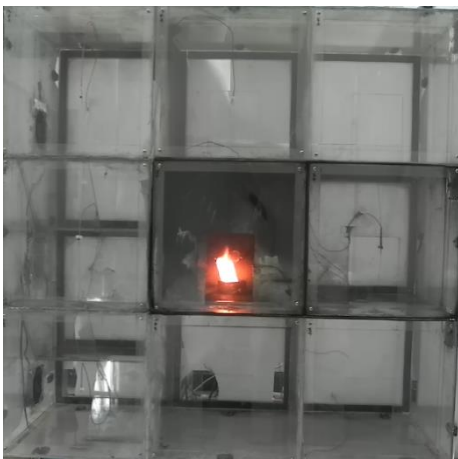
(a1) 實驗 5 秒



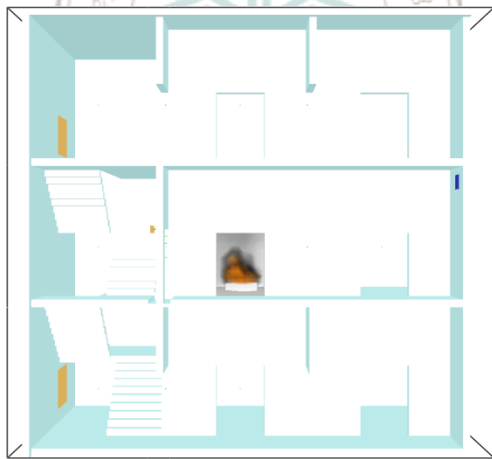
(b1) 小尺度 5 秒



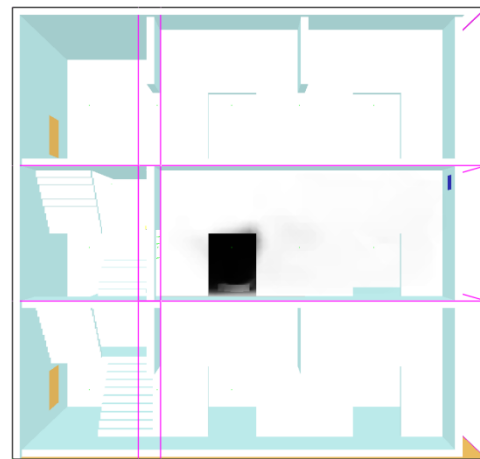
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

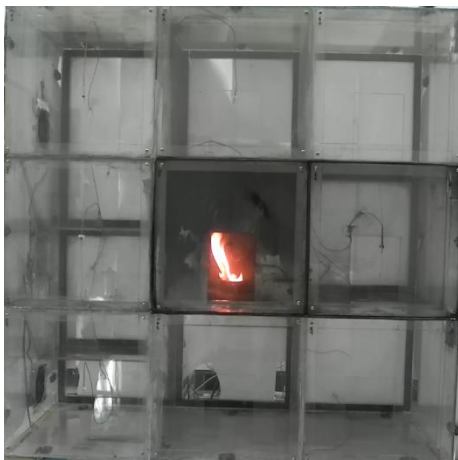


(b2) 小尺度 10 秒

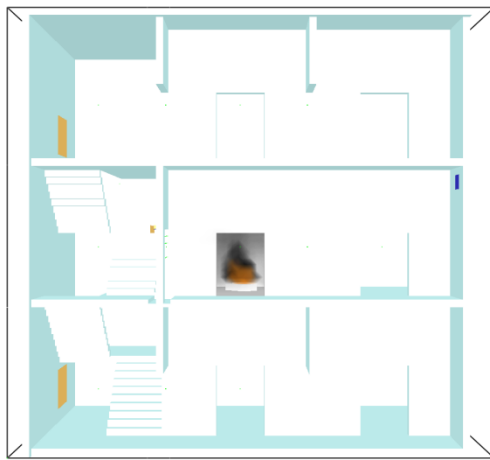


(c2) 全尺度 30 秒

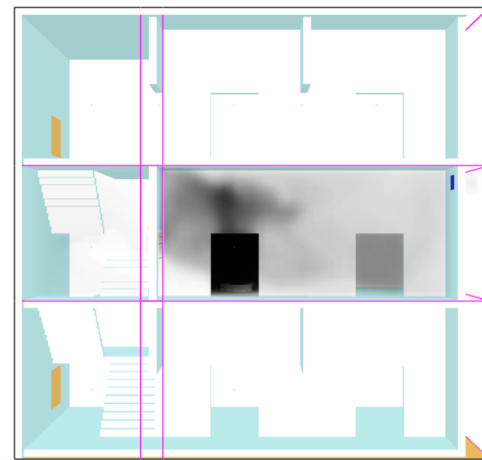
圖 4.5 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



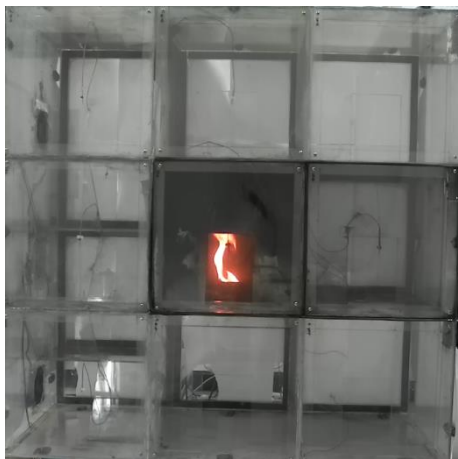
(a3) 實驗 100 秒



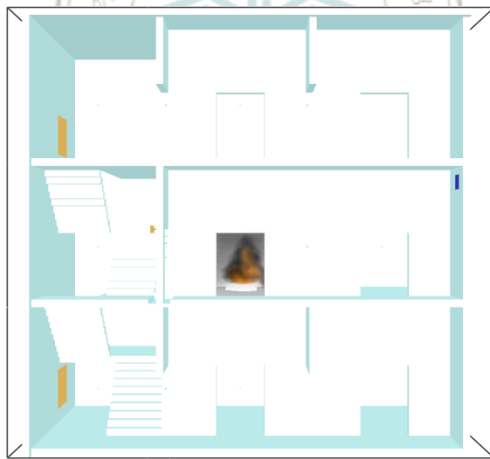
(b3) 小尺度 100 秒



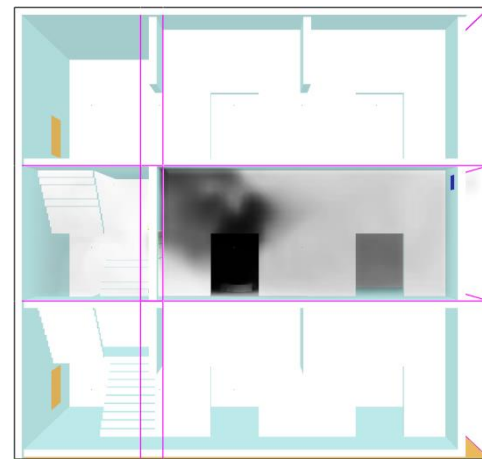
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒



(b4) 小尺度 200 秒

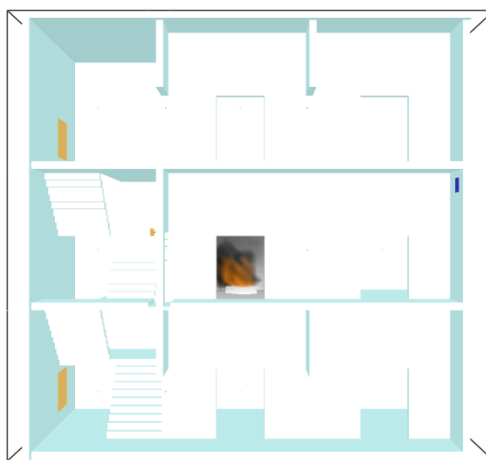


(c4) 全尺度 635 秒

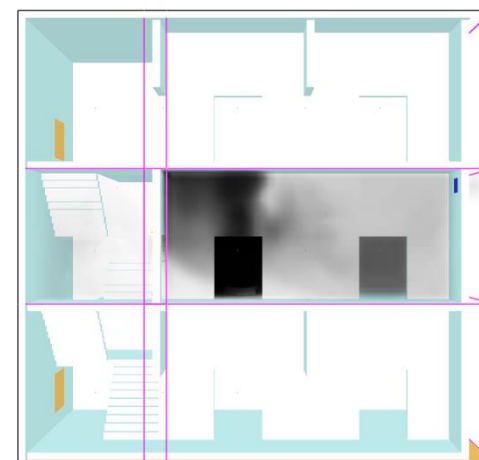
圖 4.5 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



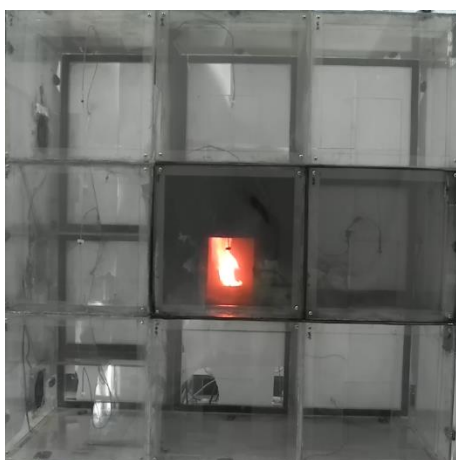
(a5) 實驗 300 秒



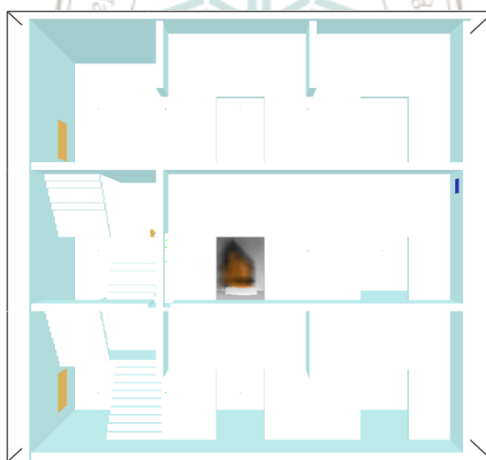
(b5) 小尺度 300 秒



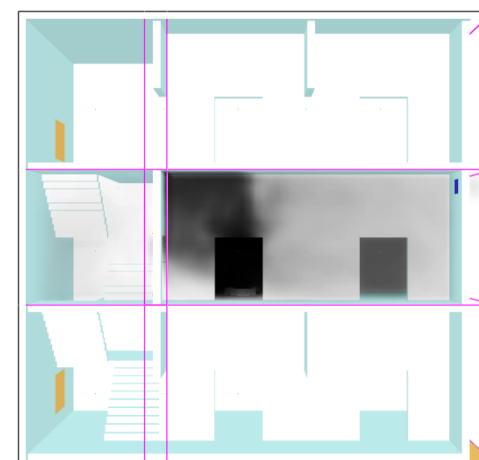
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒



(b6) 小尺度 400 秒

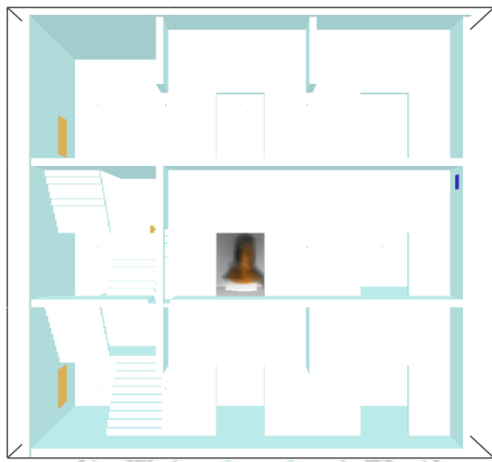


(c6) 全尺度 1265 秒

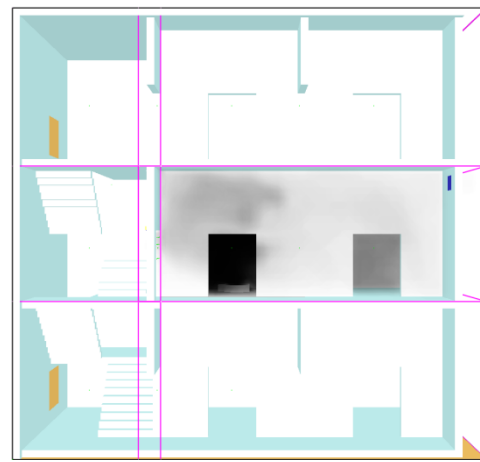
圖 4.5 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



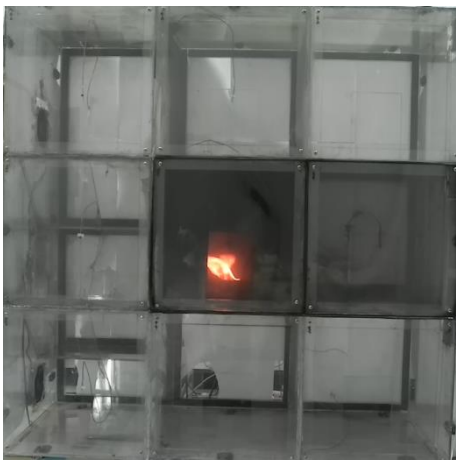
(a7) 實驗 500 秒



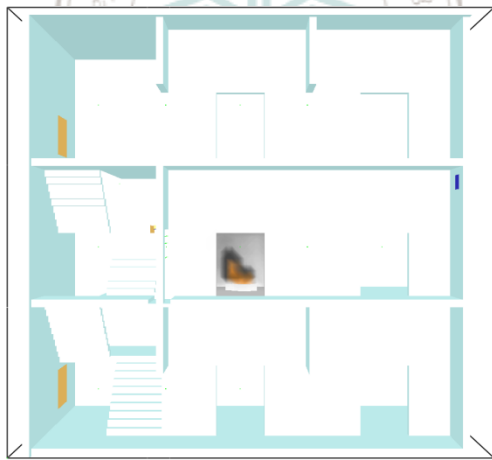
(b7) 小尺度 500 秒



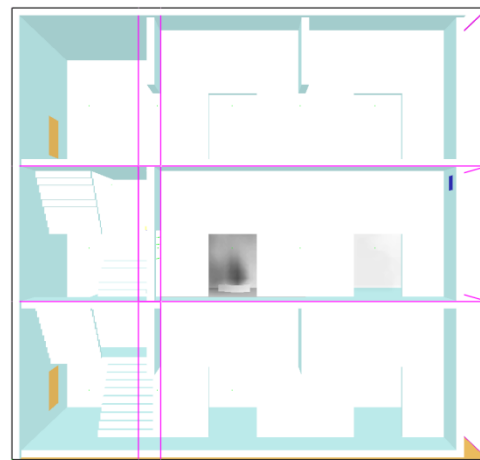
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

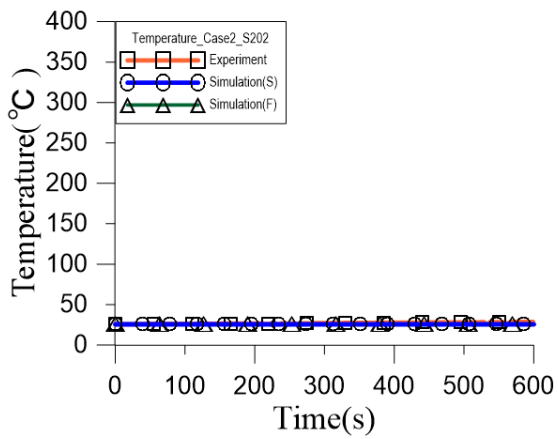


(b8) 小尺度 600 秒

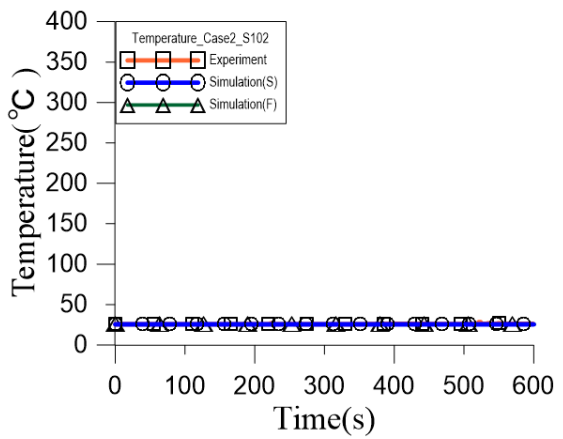


(c8) 全尺度 1900 秒

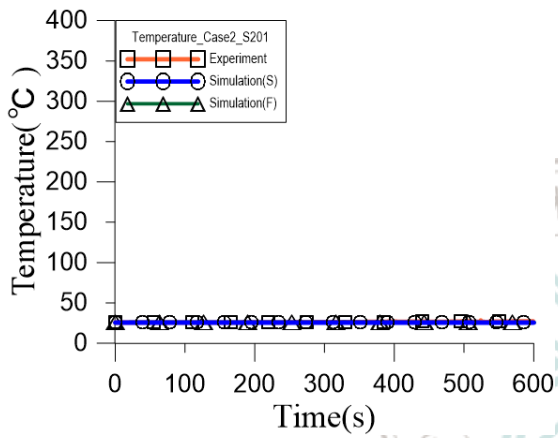
圖 4.5 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



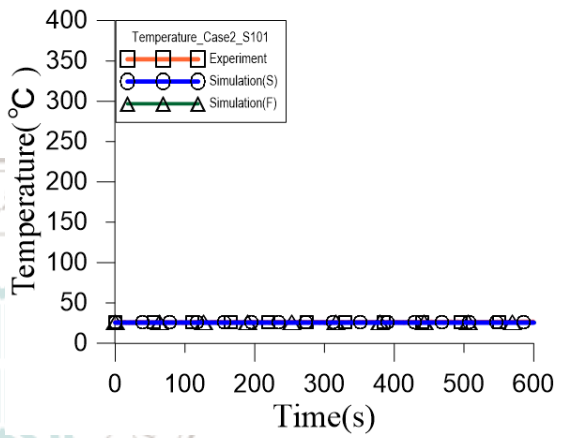
(a) S202



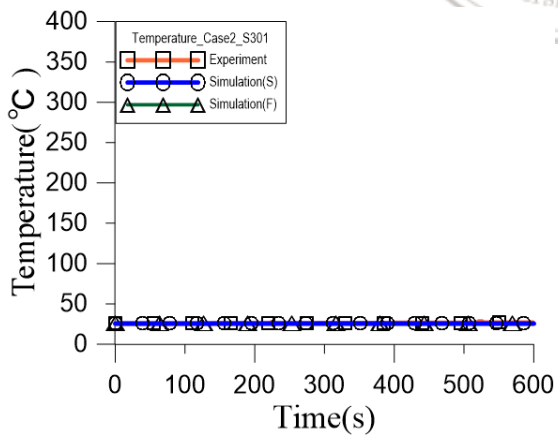
(b) S102



(c) S201

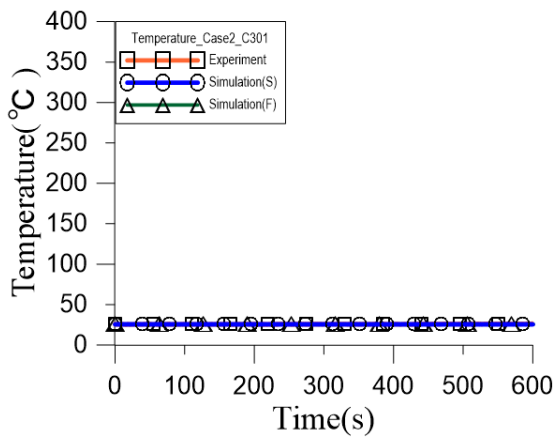


(d) S101

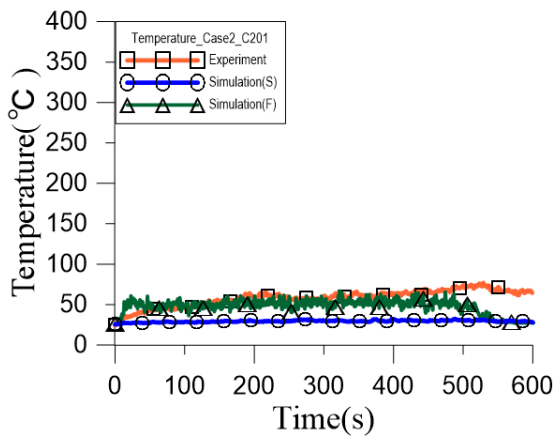


(e) S301

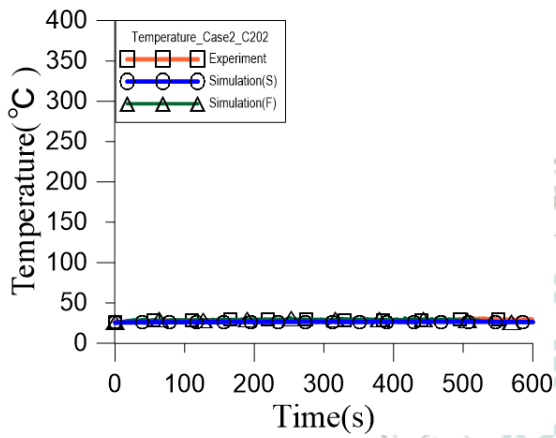
圖 4.6 Case2 梯間溫度曲線圖



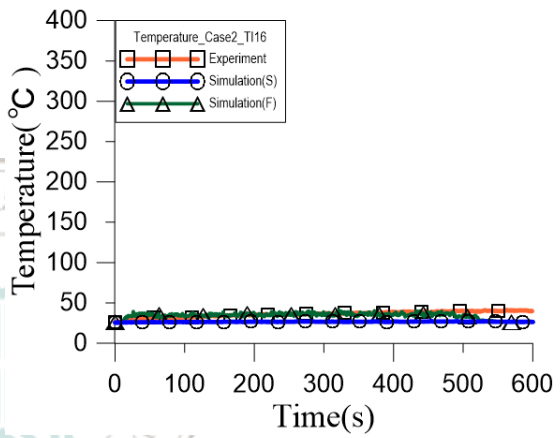
(f) C301



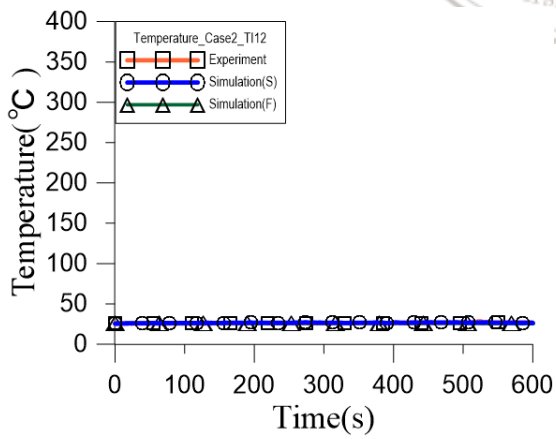
(g) C201



(h) C202

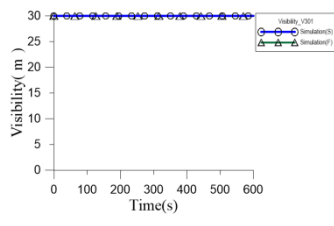


(i) TI16

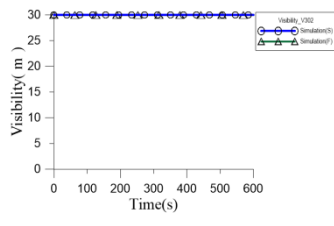


(j) TI12

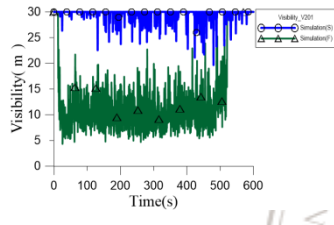
圖 4.7 Case2 走道溫度曲線圖



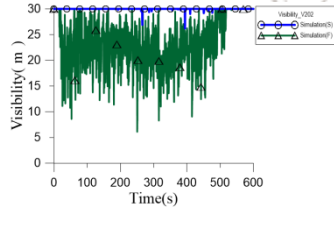
V301



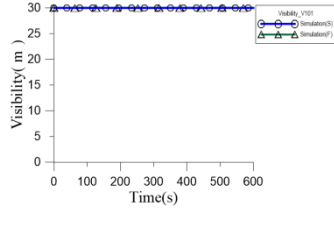
V302



V201

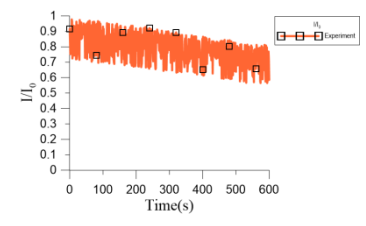


V202

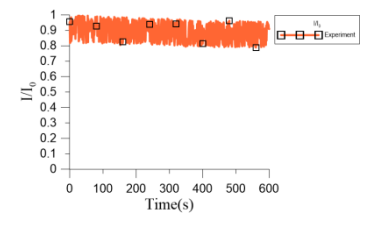


V101

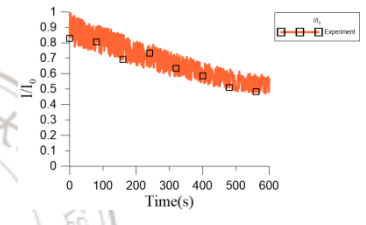
能見度(模擬)



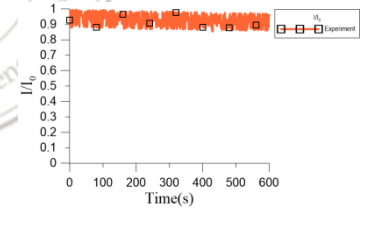
L301



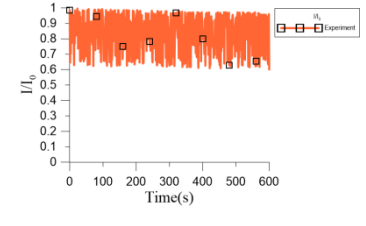
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.8 Case2 能見度與光強度對照圖

4.1.3 Case3 案例分析

Case3 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為梯間進風設備二樓作動與排煙設備無作動，進氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，排氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺^[5]，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，探討煙流擴散沉積的情形。

模擬全尺度模型模擬時間利用縮小尺度法則公式 $t_m = t_f (l_m / l_f)^{1/2}$ 將 1,900 秒模擬時間換算壓縮成 600 秒後，進行小尺度與實驗於火源燃燒 600 秒之間的變化比較，在圖 4.9 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖中，發現在正壓排煙模擬小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 煙流擴散情形，與陳聖澤學者先前做的實驗比較 (未拿掉) 比較改善許多，無明顯的煙流竄進梯間樓梯，僅全尺度 950 秒時有部分煙流竄進梯間，反觀實驗影片截圖，結果就不是那麼好，在實驗第 300 秒時就煙霧就開始穿過梯間門口而往上擴散，且隨著實驗進行有愈來愈增加，直至火源熄滅後才減緩，顯見在與模擬結果不太完全符合，可能與實驗時因為模型構造、密合度及外在環境條件等原因，使得模擬與實驗有不同之結果。

在溫度測點方面，同樣與先前實驗比較在拿掉二樓右側構造物後，火源前走道溫度測點 C201 溫度也明顯的下降許多，從先前實驗中最高 230 幾度至實驗出現的最高溫度 66.7 °C，相同其他測點也均有溫度下降趨勢，同時在 C202 測點先前實驗結果溫度並無上升情況，但在實驗過程因為煙層蓄積沉降，使得在此案例中反而有上升的情形發生，最高溫度也有來到 51 °C，至於實驗走道溫度測點 s201 有約在 300 秒之後煙流擴散至梯間時而有上升情形，但最高僅來到 37 °C 左右。

能見度觀察圖 4.12 Case3 能見度與光強度對照圖左圖為能見度 (模擬) 小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 針對測點皆設置在各樓層門口中間處，由模擬煙流圖中，發現僅在 V202 和 V201 能見度有較大的變化，同樣全尺度因為燃料較大使得煙霧較多，在初期模擬秒數下能見度就下降很快直至模擬結束，小尺度方面也是同樣能見度在 V202 下降的很多，但較無全尺度明顯則是因為煙霧沒有來得全尺度多，右圖為光強度 (實驗) 結果顯示因為煙霧有竄進梯間樓梯，且有往樓上走到擴散之情形，甚至有些許煙霧竄進一樓，故在光強度方面各測點上均有影響，二樓梯間門口處 V201 光強度最差，相反在 V202 則比較少受到煙霧影響，相比較有較好光強度，而煙流往上竄流結果同時使得三樓走道門口能見度均有下降的趨勢。

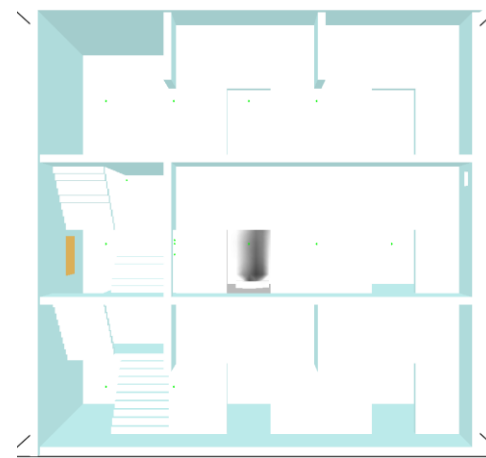




(a1) 實驗 5 秒



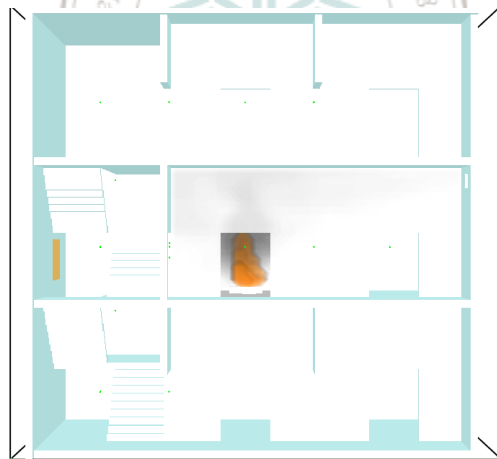
(b1) 小尺度 5 秒



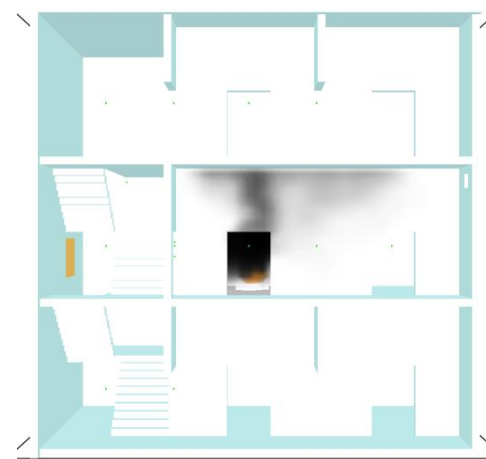
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

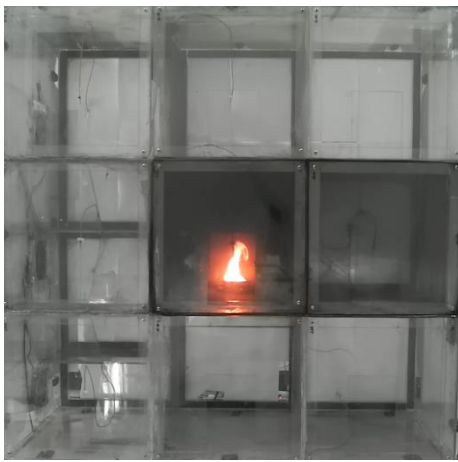


(b2) 小尺度 10 秒



(c2) 全尺度 30 秒

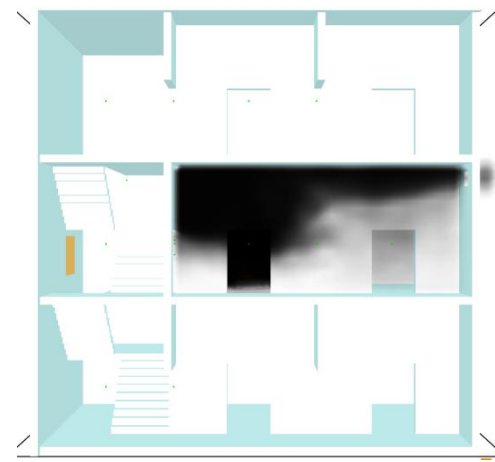
圖 4.9 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



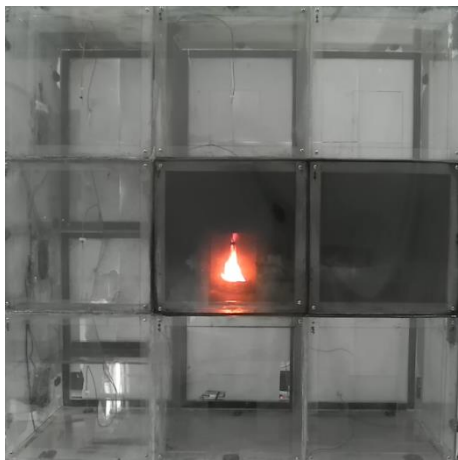
(a3) 實驗 100 秒



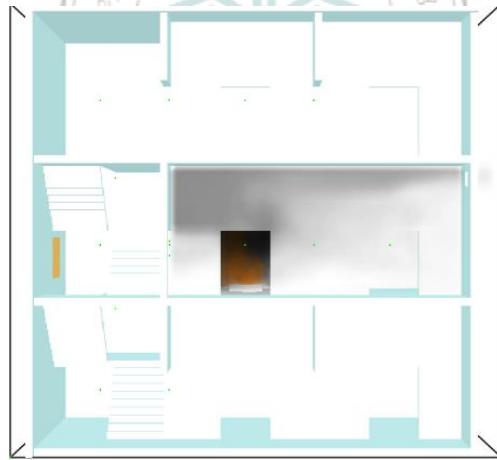
(b3) 小尺度 100 秒



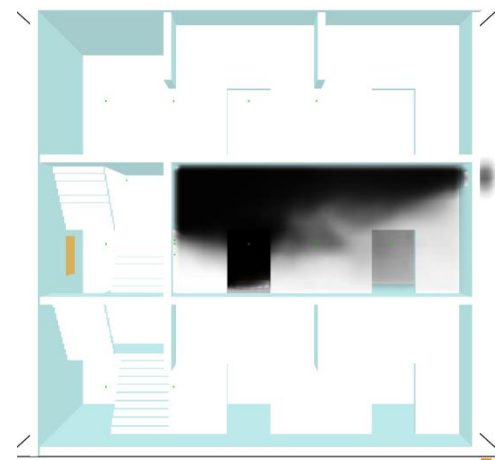
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

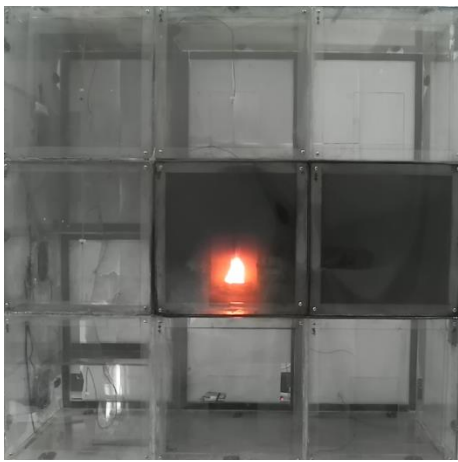


(b4) 小尺度 200 秒

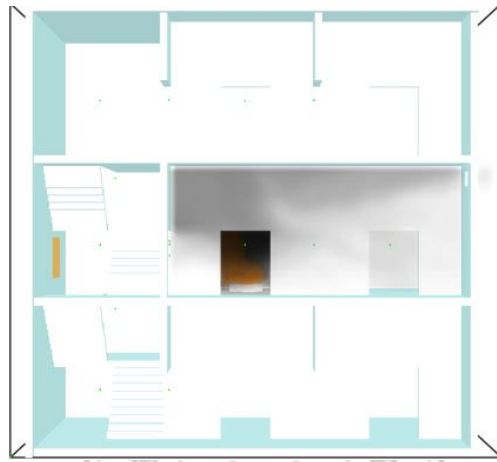


(c4) 全尺度 635 秒

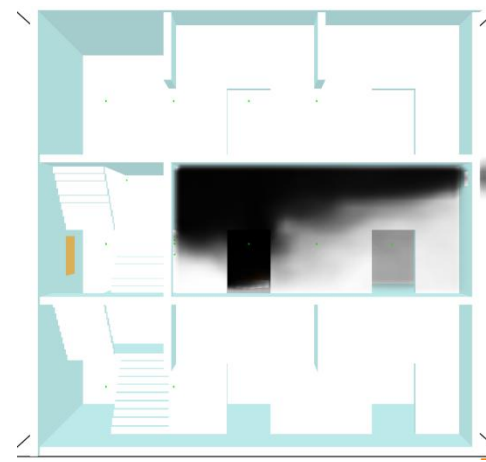
圖 4.9 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



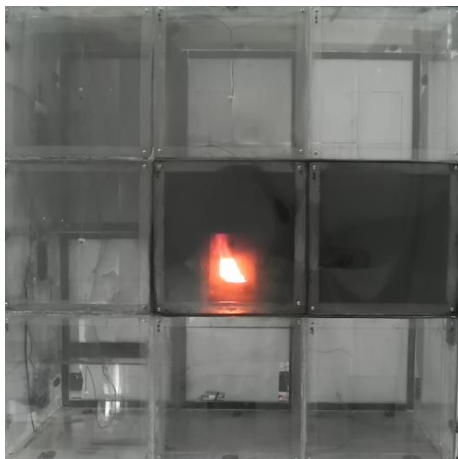
(a5) 實驗 300 秒



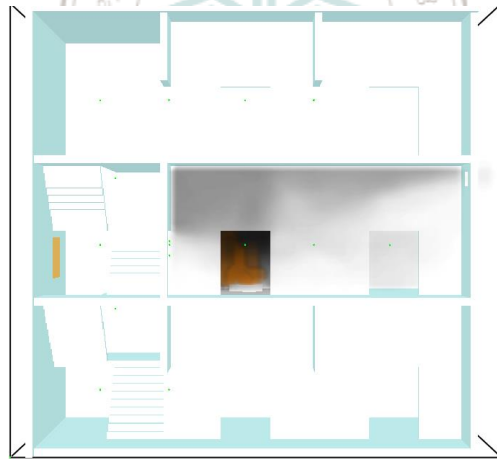
(b5) 小尺度 300 秒



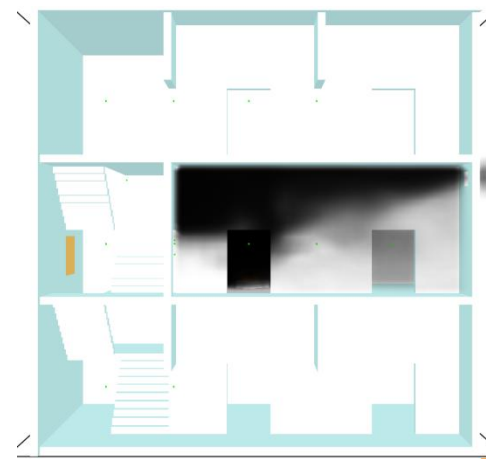
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

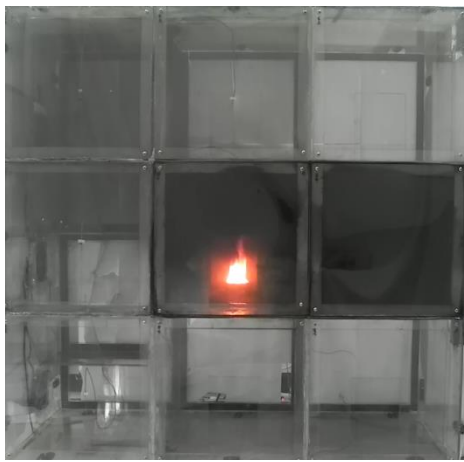


(b6) 小尺度 400 秒



(c6) 全尺度 1265 秒

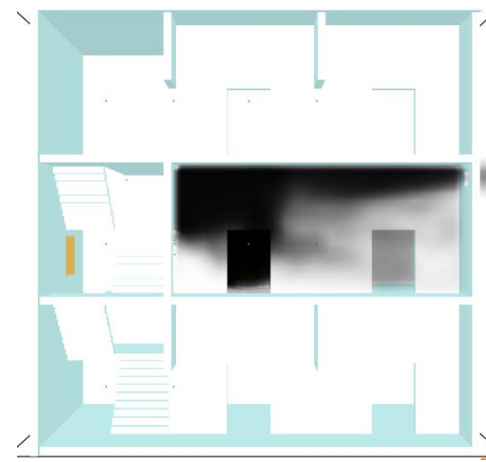
圖 4.9 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



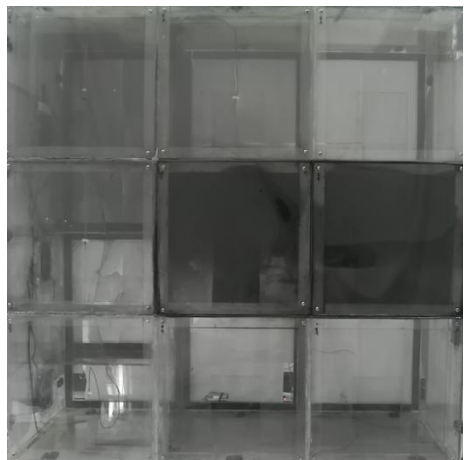
(a7) 實驗 500 秒



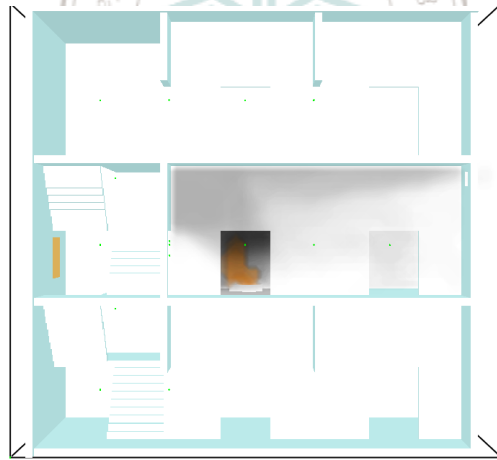
(b7) 小尺度 500 秒



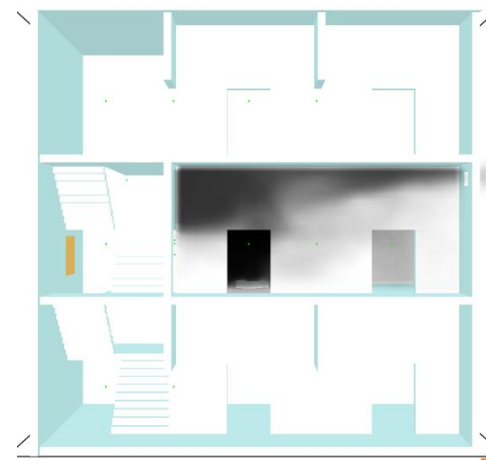
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

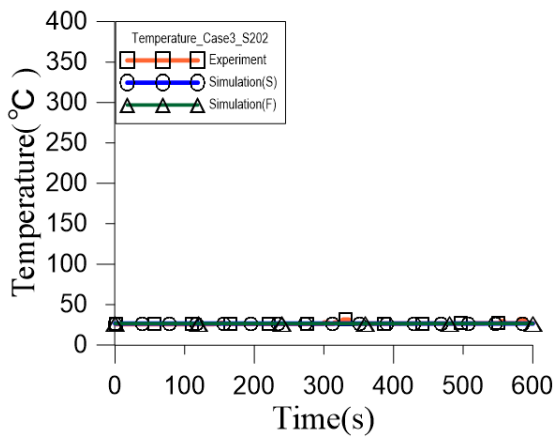


(b8) 小尺度 600 秒

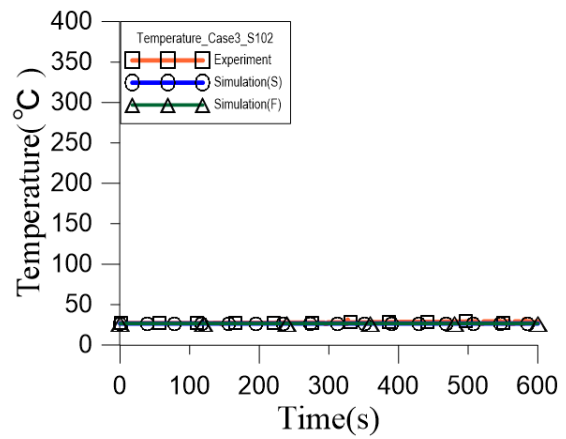


(c8) 全尺度 1900 秒

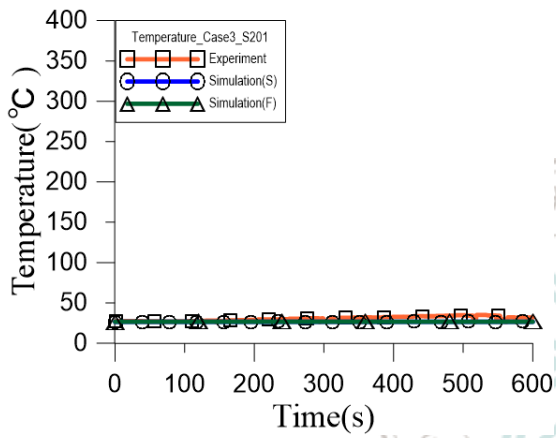
圖 4.9 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



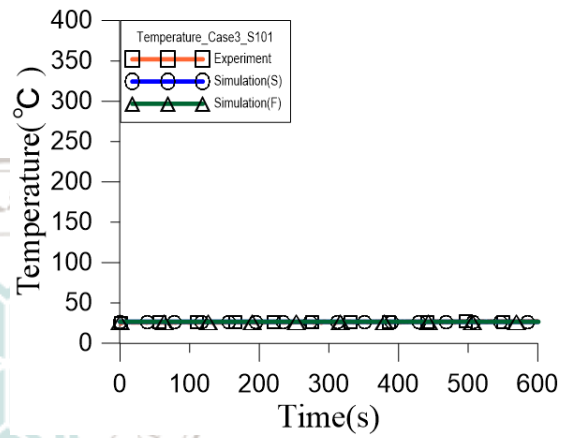
(k) S202



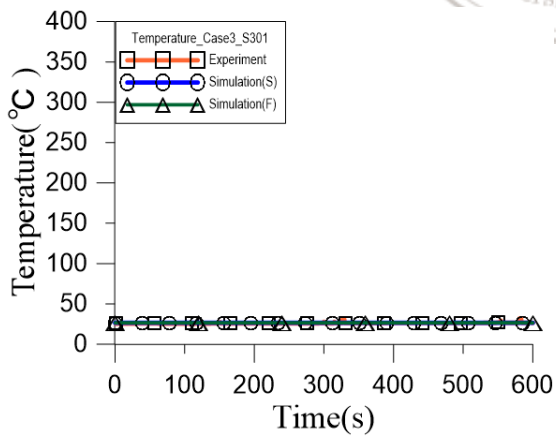
(l) S102



(m) S201

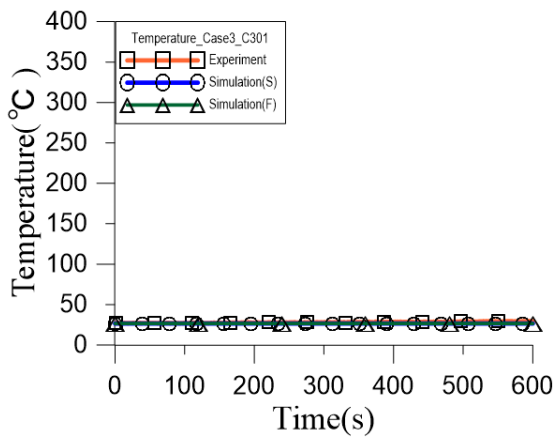


(n) S101

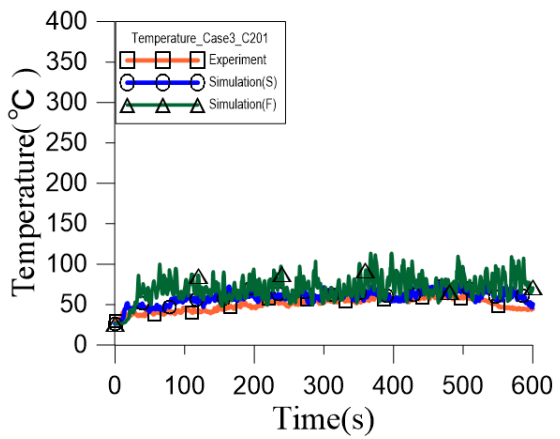


(o) S301

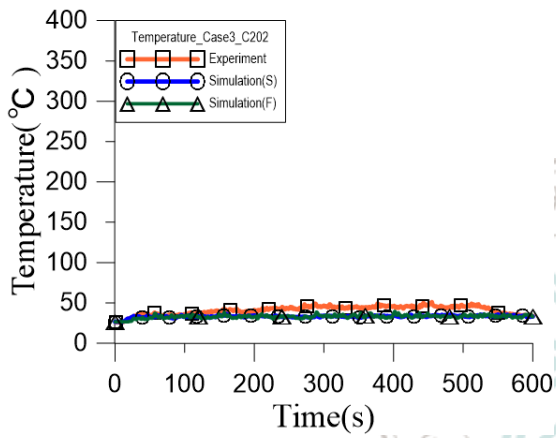
圖 4.10 Case3 梯間溫度曲線圖



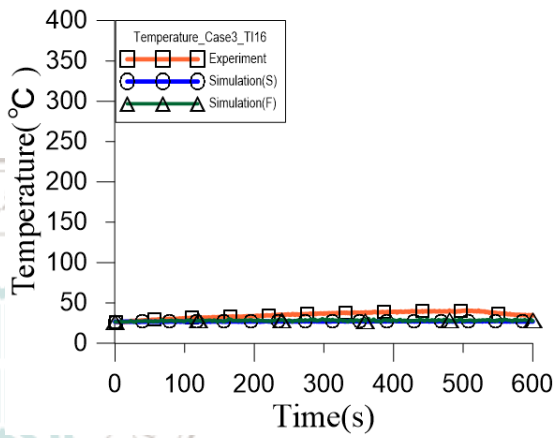
(p) C301



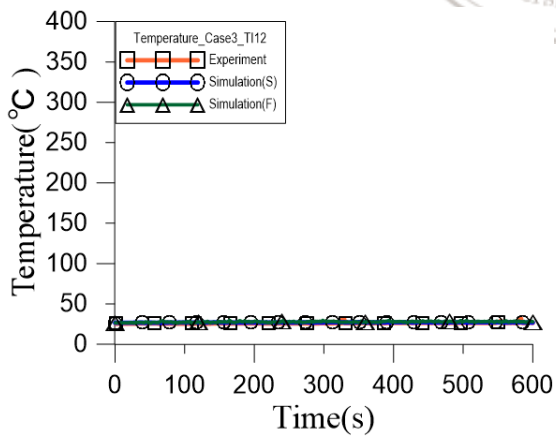
(q) C201



(r) C202

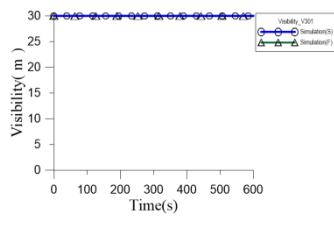


(s) TI16

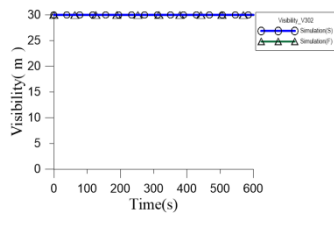


(t) TI12

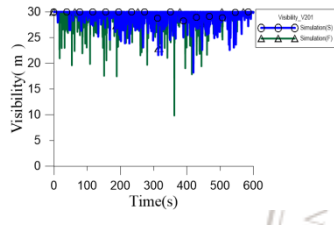
圖 4.11 Case3 走道溫度曲線圖



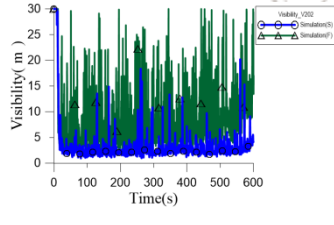
V301



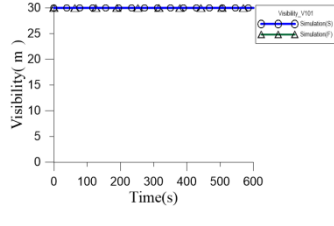
V302



V201

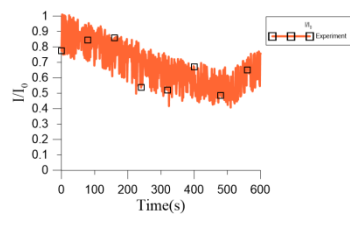


V202

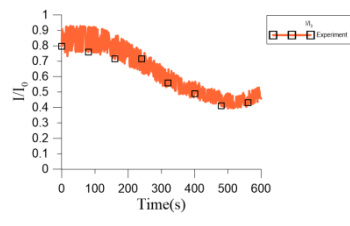


V101

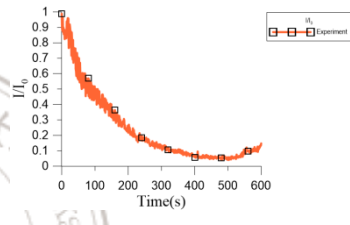
能見度(模擬)



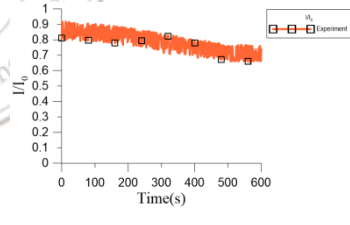
L301



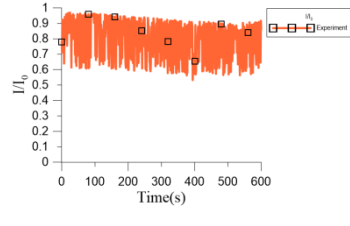
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.12 Case3 能見度與光強度對照圖

4.1.4 Case4 案例分析

Case4 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為梯間進風設備二樓作動與排煙設備無作動並設置氣簾，進氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，排氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，氣簾排氣全尺度下速度為 17 m/s，小尺度下速度則為 5.375 m/s；排氣量則為全尺度為每秒 1.7 立方公尺，小尺度則為每秒 0.005 立方公尺並探討煙流擴散沉積的情形。

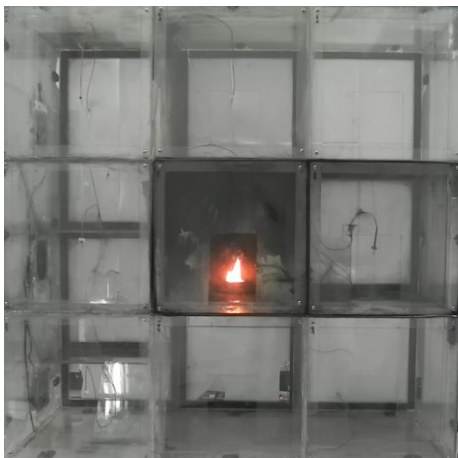
模擬全尺度模型模擬時間利用縮小尺度法則公式 $t_m = t_f (l_m / l_f)^{1/2}$ 將 1,900 秒模擬時間換算壓縮成 600 秒後，進行小尺度與實驗於火源燃燒 600 秒之間的變化比較，在圖 4.13 Case4 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖中，發現在與未設置氣簾條件下的 Case3 比較煙流擴散，初期 Case4 全尺度 30 秒時煙氣剛擴散至走道間就受到氣簾氣流干擾，而在全尺度 320 秒時部分煙氣擴散至梯間，反而無設置氣簾下的 Case3 無煙氣進入梯間，全尺度 950 秒時因為氣簾氣流影響，把煙氣往上下擴散開來，但在實驗 300 秒本案例下煙氣卻無明顯進入至梯間，反觀 Case3 實驗有明顯煙氣進入至梯間，而在模擬後期同樣有著相同狀況，本案例下全尺度比 Case3 較差，但在實驗下則是比 Case3 好一點，推估可能與模擬模型內風速或實驗之誤差影響結果。

在溫度測點方面，若與 Case 3 案例做比較，雖然皆有煙流擴散至梯間的案例，但也因為擴散的煙氣沒有來得這麼多，故在梯間走道的溫度測點皆無明顯的變化趨勢，而在 C201 全尺度溫度下 Case3 因為沒有 Case4 設置氣簾氣流干擾，溫度較明顯的隨著煙流剛竄出隨即往上蓄積而上下跳動，反觀 Case4 因為氣簾氣流影響，

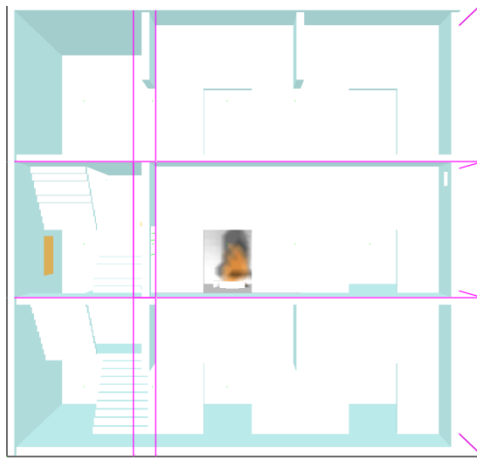
溫度則較為平穩變化，值得注意在全尺度 Case4 因為氣簾氣流干擾煙層，使得走走道充滿煙氣，加上本身走道狹短不利擴散，使得在逃生門中間處測點 TI16 溫度明顯的上升。

在圖 4.16 Case4 能見度與光強度對照圖中，如前述所述因為本身模型之結構，使得設置最大氣簾風速，不僅沒有在逃生門處發揮良好的能見度，反而因為太大的氣流影響煙流本身的平穩的擴散，使得在此案例在 V201 處有較差的能見度；而在實驗光感度上，也因為實驗有後期有部分煙氣進入至梯間而往三樓擴散，故在 L301、L302 皆有光感度的下降。

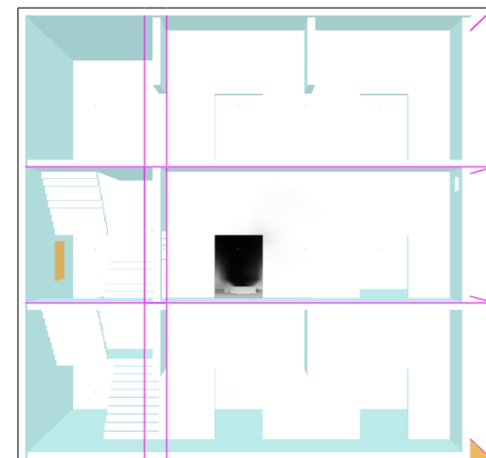




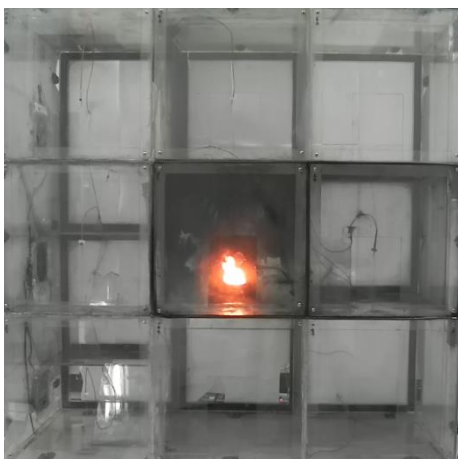
(a1) 實驗 5 秒



(b1) 小尺度 5 秒



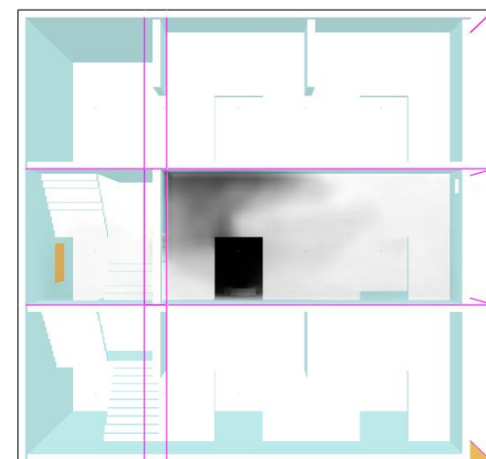
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒



(b2) 小尺度 10 秒

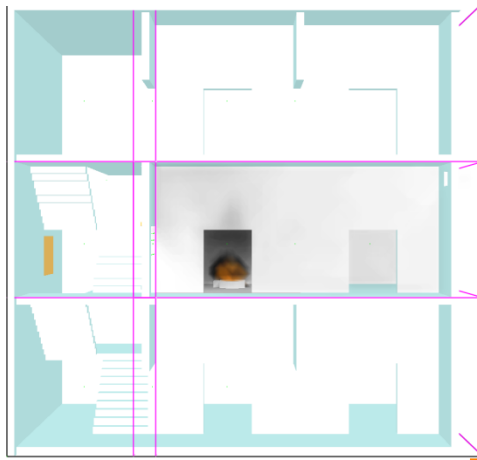


(c2) 全尺度 30 秒

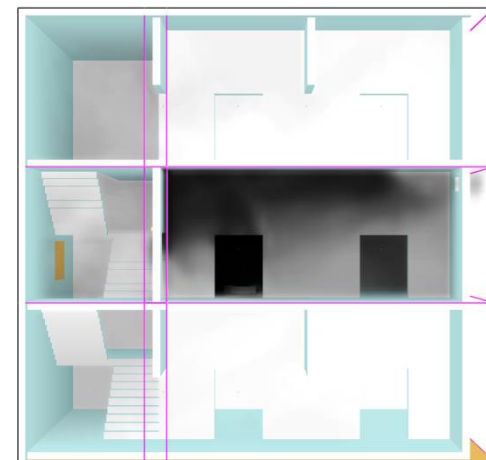
圖 4.13 Case4 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



(a3) 實驗 100 秒



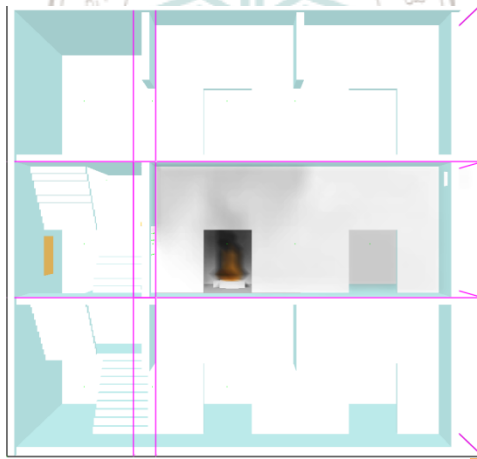
(b3) 小尺度 100 秒



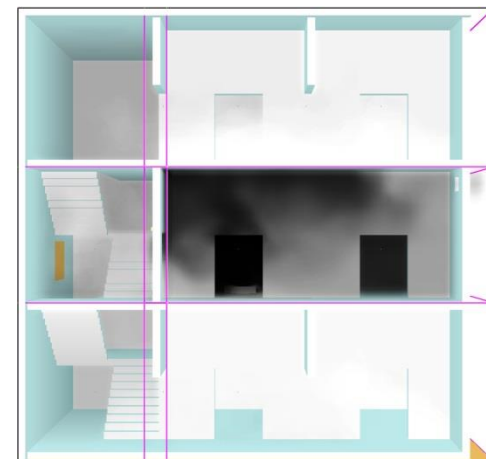
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

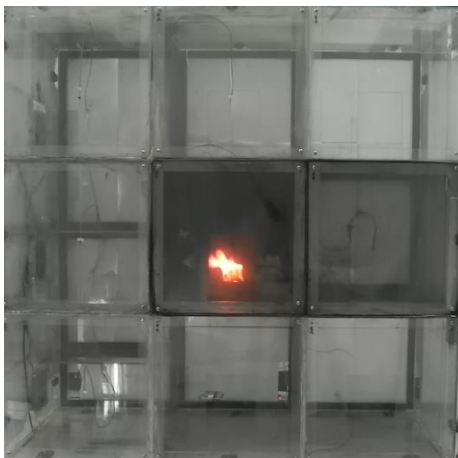


(b4) 小尺度 200 秒

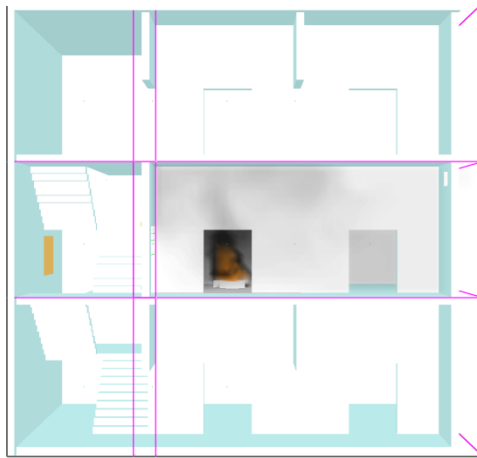


(c4) 全尺度 635 秒

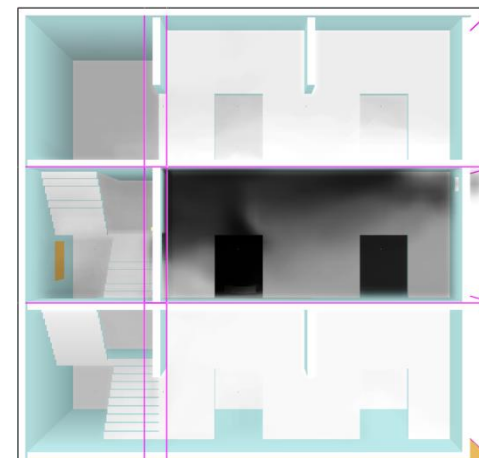
圖 4.13 Case4 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



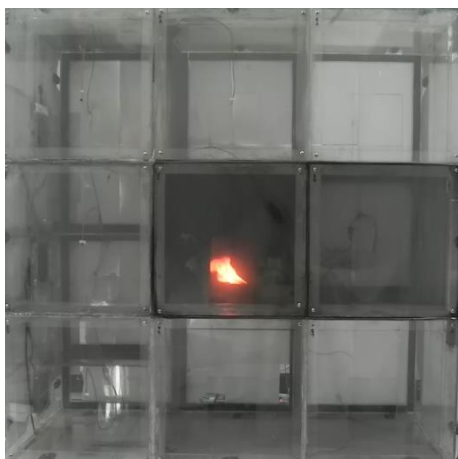
(a5) 實驗 300 秒



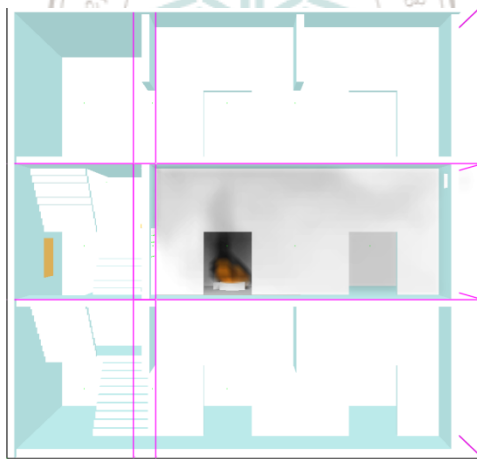
(b5) 小尺度 300 秒



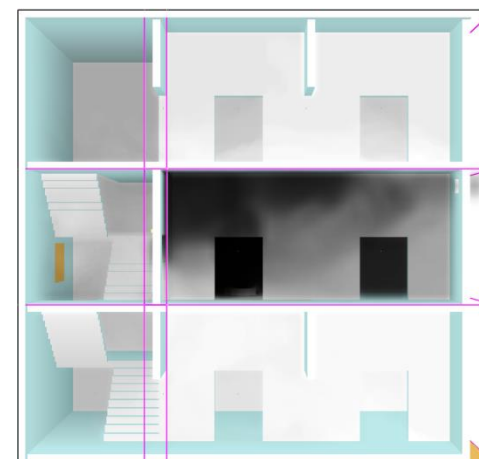
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒



(b6) 小尺度 400 秒

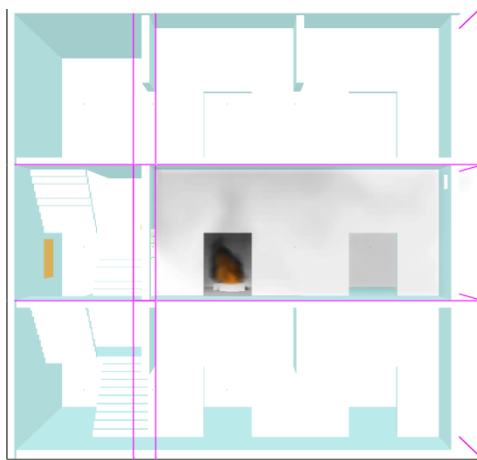


(c6) 全尺度 1265 秒

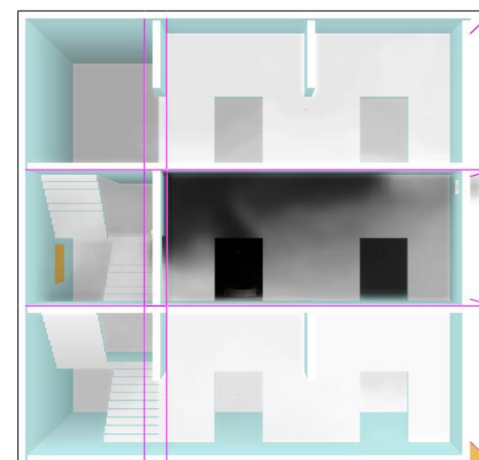
圖 4.13 Case4 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



(a7) 實驗 500 秒



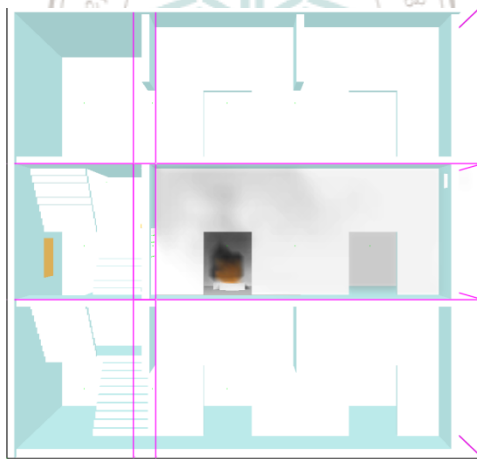
(b7) 小尺度 500 秒



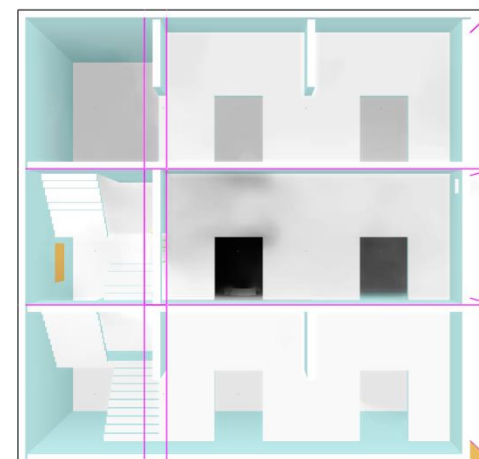
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

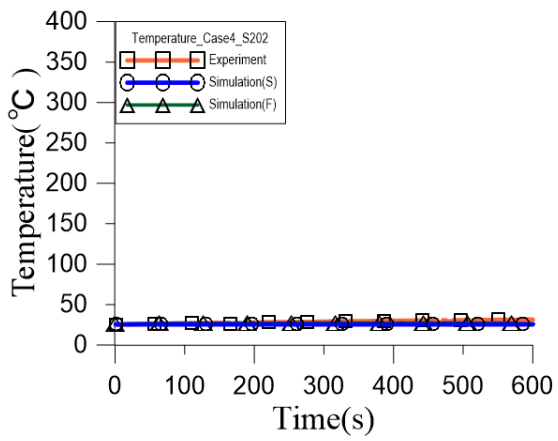


(b8) 小尺度 600 秒

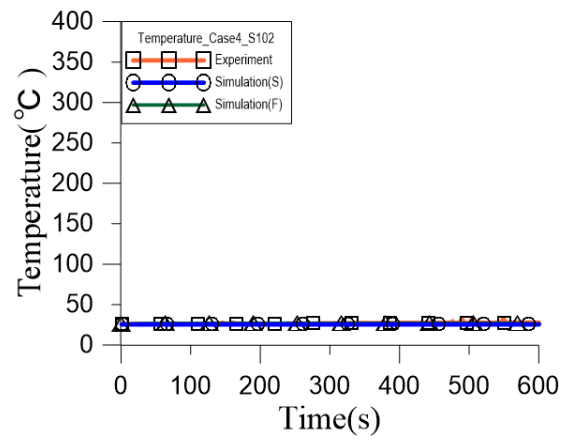


(c8) 全尺度 1900 秒

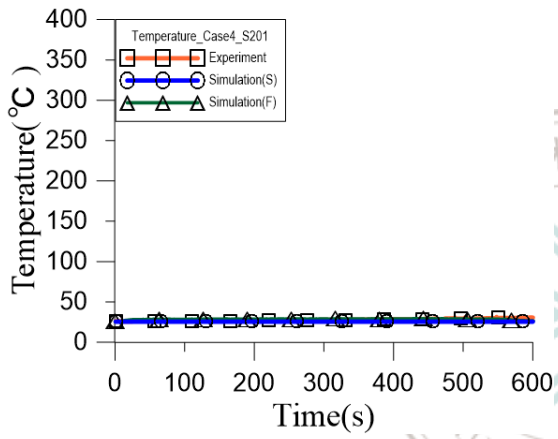
圖 4.13 Case4 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



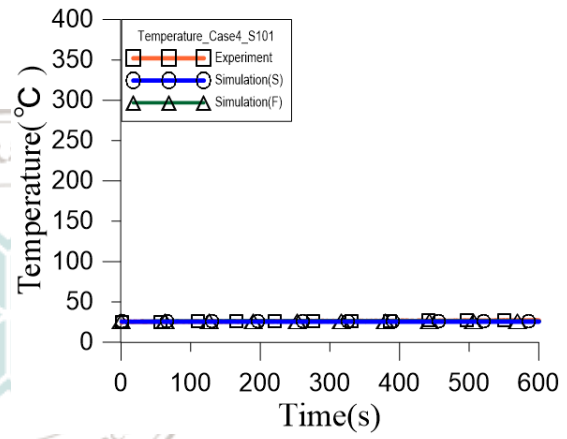
(a) S202



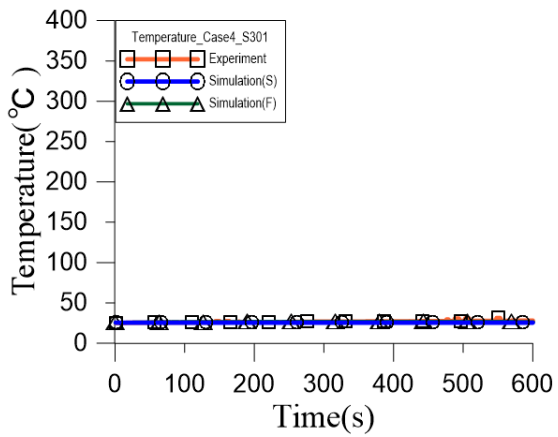
(b) S102



(c) S201

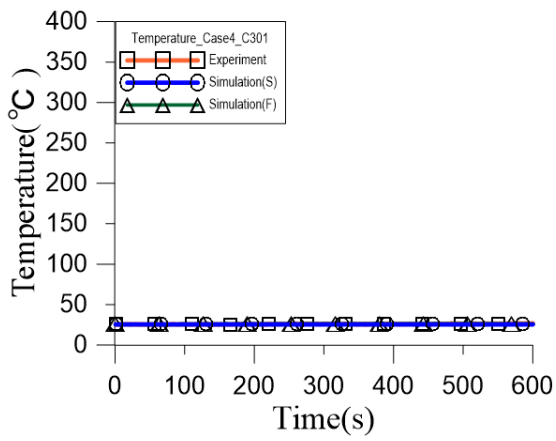


(d) S101

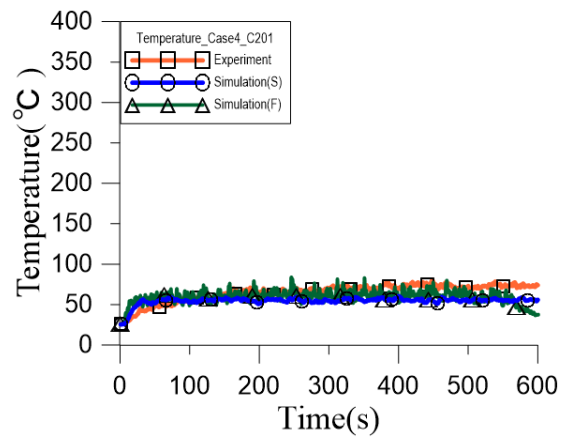


(e) S301

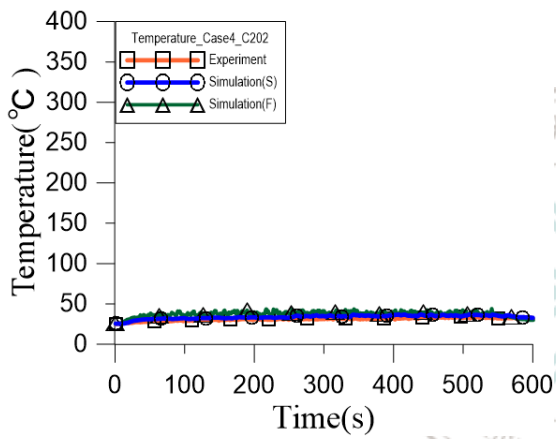
圖 4.14 Case4 梯間溫度曲線圖



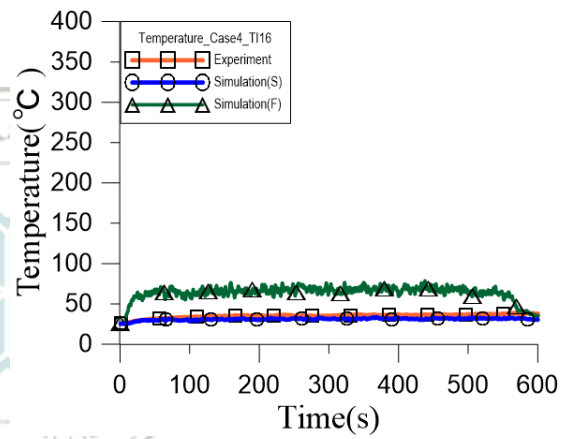
(f) C301



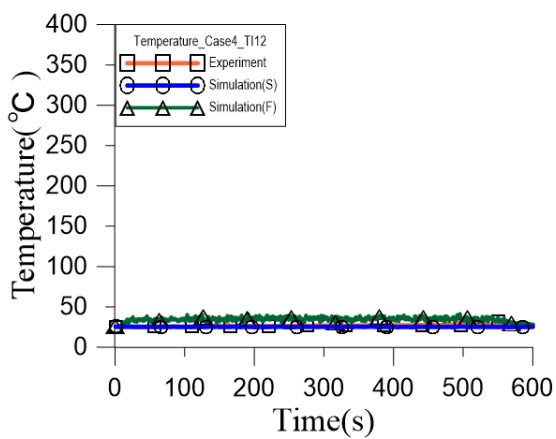
(g) C201



(h) C202

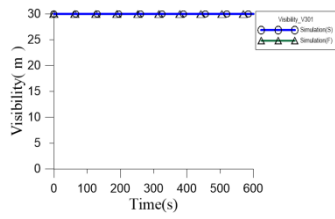


(i) TI16

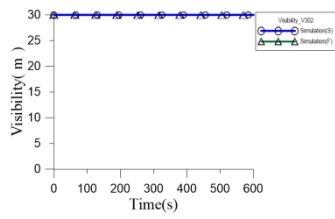


(j) TI12

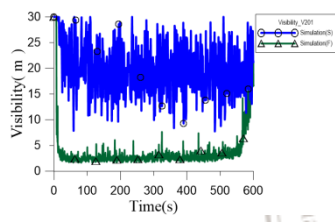
圖 4.15 Case4 走道溫度曲線圖



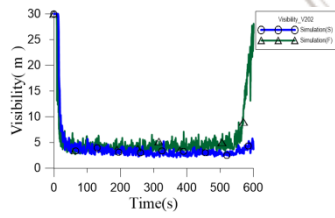
V301



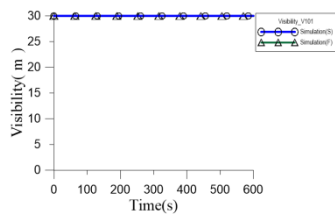
V302



V201

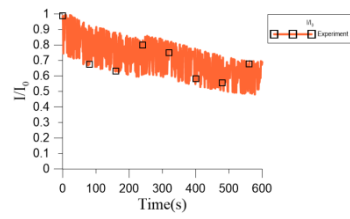


V202

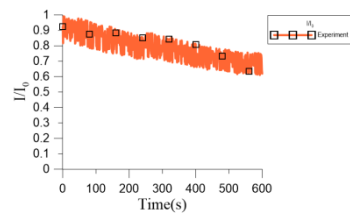


V101

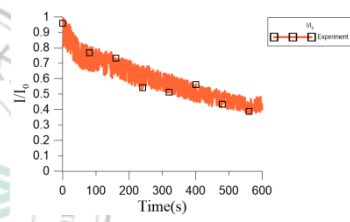
能見度(模擬)



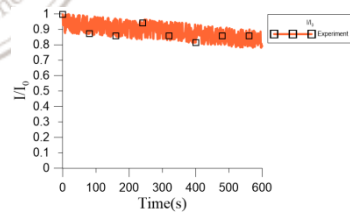
L301



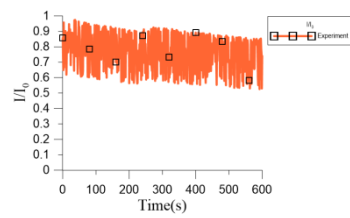
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.16 Case4 能見度與光強度對照圖

4.1.5 Case5 案例分析

Case5 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為梯間進風設備二樓無作動與排煙設備作動，進氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，排氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，並探討煙流擴散沉積的情形。

模擬全尺度模型模擬時間利用縮小尺度法則公式 $t_m = t_f (l_m / l_f)^{1/2}$ 將 1,900 秒模擬時間換算壓縮成 600 秒後，進行小尺度與實驗於火源燃燒 600 秒之間的變化比較，在圖 4.17 中，發現在負壓排煙模擬小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 煙流擴散情形，與陳聖澤學者先前做的實驗比較 (未拿掉) 在此稱為 "先前實驗" 比較同樣改善許多，case5 負壓排煙在與先前實驗互相比較下，再移走構造物後，案例負壓排煙下，走道情況無先前實驗在中間樓層走道上蓄積，在全尺度 320 秒案例中部分煙流進入至梯間，然而在先前全尺度同樣時間下，大量煙流已進入至梯間病充滿整個上層走道，而實驗及小尺度維持良好的排煙效果；在模擬實驗秒數來到 500 秒時先前實驗及小尺度模擬也因為煙流的沉降進入至梯間，對比同時段本案例下無明顯煙氣進入，僅在大尺度有此情況，也間接說明在負壓排煙下在面對大量煙流的情況下，會因為排煙不及使得煙流進入至梯間，而不利人員的逃生。

溫度測點方面，也因為全尺度有煙進入梯間並往上竄升，故在 S202 二樓往三樓樓梯中間有明顯溫度上升情況，而在走道溫度上 C201 測點，因為在火源房間出口處，故溫度上升幅度較大，而在三組測試中，全尺度因為煙流量大竄出後隨即因為熱浮力蓄積在天花板，所以溫度曲線才會上下跳動不穩定，在小尺度與實驗

在相同情況下，但在兩者煙流擴散情況一樣下，溫度曲線卻不是那麼吻合準確，也說明在縮小尺度法則驗證下，對於溫度不是那麼準確符合，而在測點 TI16 逃生門中間處測點，可以看到溫度大幅度的上升，甚至有來到 200 多度，這也因為右側排煙不及，左側煙層蓄積沉降並通過門口處才有此現象，整體溫度全尺度皆較高於小尺度與模擬。

能見度看來在圖 4.20 Case5 能見度與光強度對照圖中左側部分為全尺度與小尺度模擬於各樓層門口中間處，看到 V301、V302 因為全尺度有擴散至三樓走道間，能見度上明顯地往下降，V201、V202 火源房間外走道處，同樣因為有煙氣沉降，皆有能見度不佳的情況；而圖中右側為實驗量測模型內部的光感度探頭，在與模擬小尺度比較，V201 與 L201 有相同的下降趨勢，雖然一個是能見度另一個是光感度，但皆是有煙霧存在才有此現象，但在 L202 卻是無明顯光感度下降，從實驗煙流截圖中，似乎在頂部煙層無明顯下降，所以光感度無明顯被遮蔽。

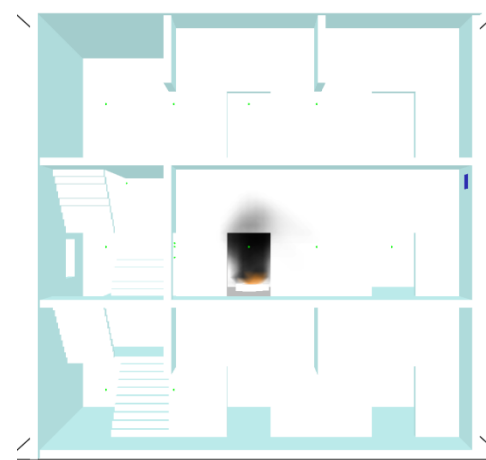




(a1) 實驗 5 秒



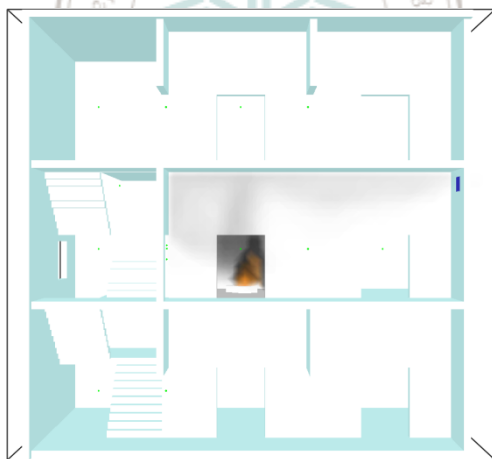
(b1) 小尺度 5 秒



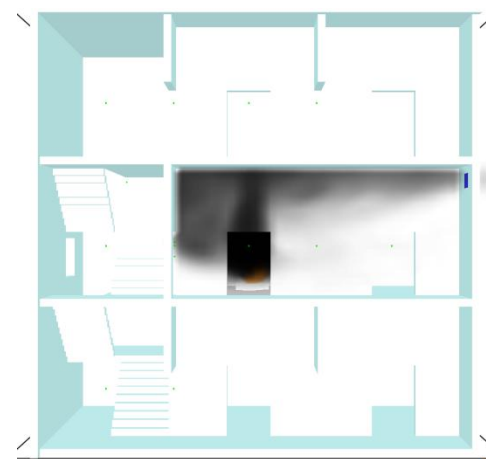
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

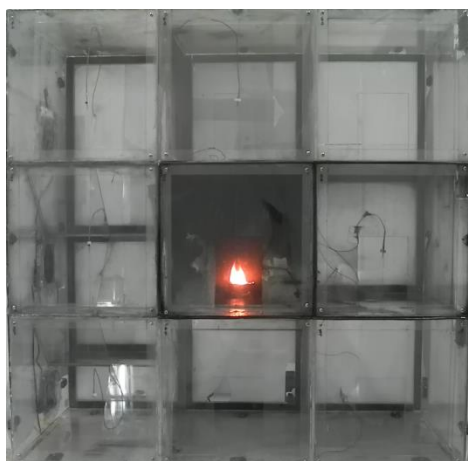


(b2) 小尺度 10 秒

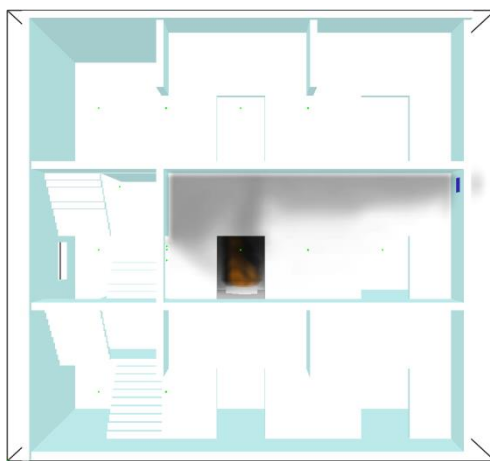


(c2) 全尺度 30 秒

圖 4.17 Case5 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



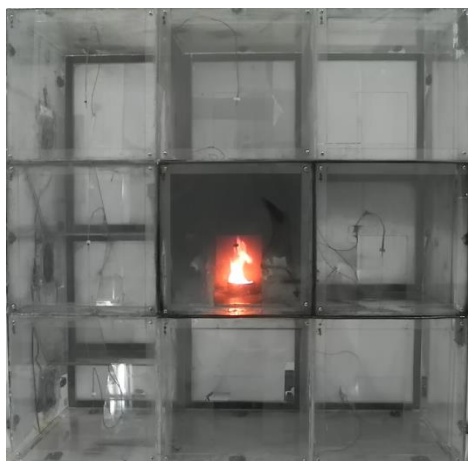
(a3) 實驗 100 秒



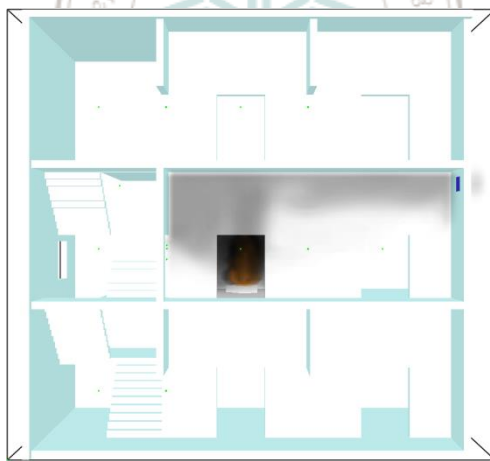
(b3) 小尺度 100 秒



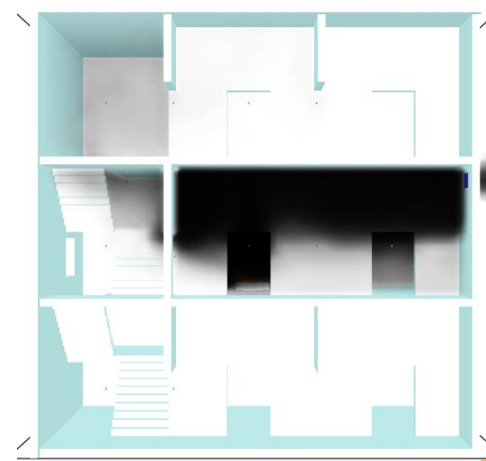
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒



(b4) 小尺度 200 秒

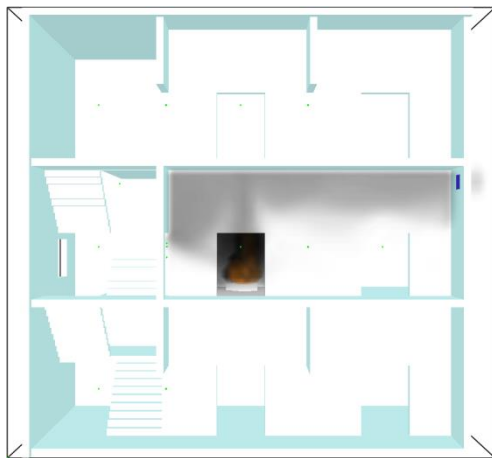


(c4) 全尺度 635 秒

圖 4.17 Case5 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



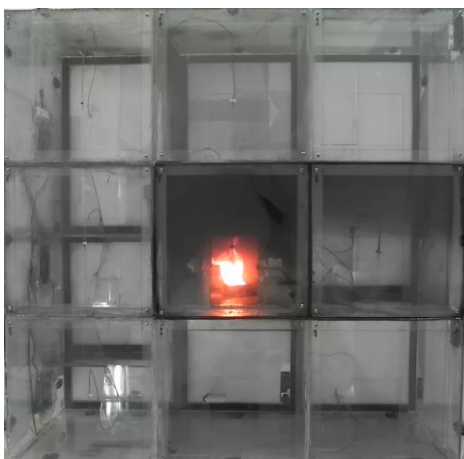
(a5) 實驗 300 秒



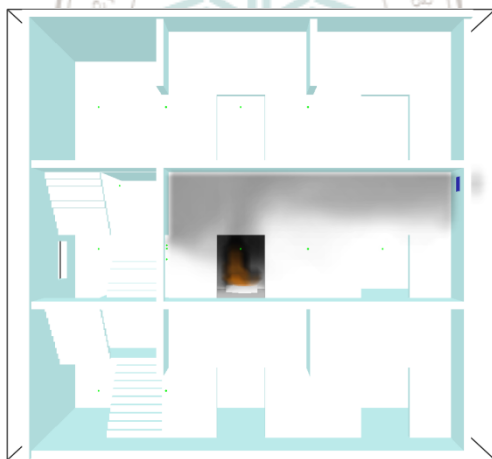
(b5) 小尺度 300 秒



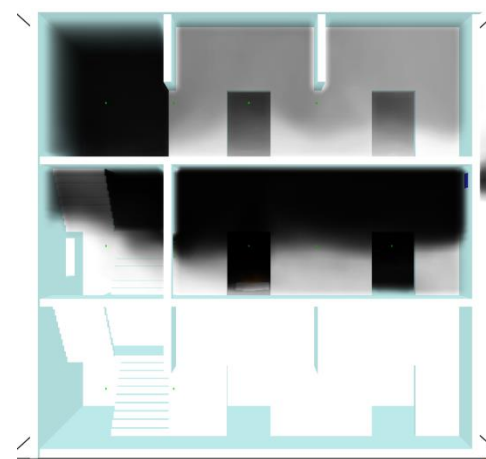
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒



(b6) 小尺度 400 秒

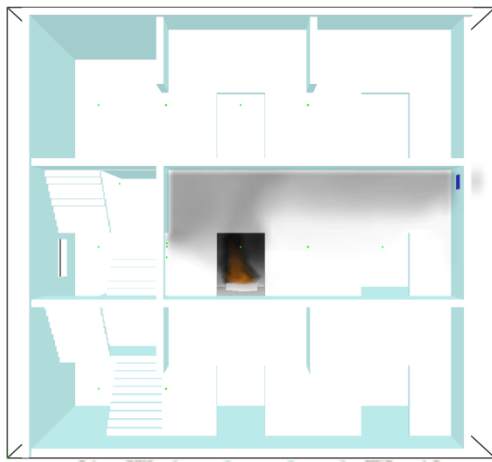


(c6) 全尺度 1265 秒

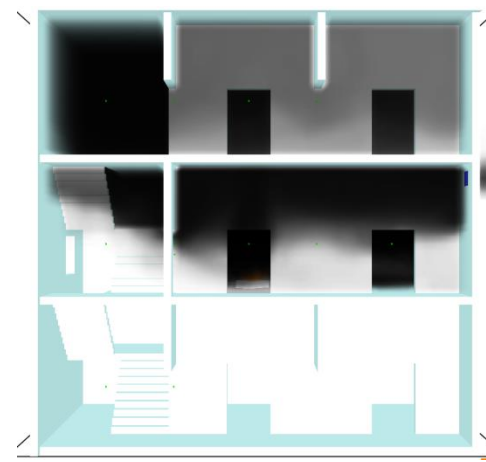
圖 4.17 Case5 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



(a7) 實驗 500 秒



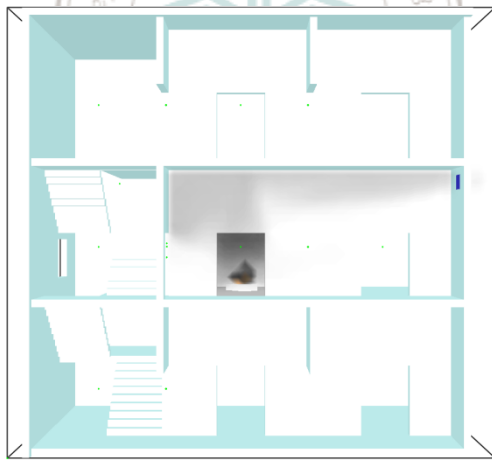
(b7) 小尺度 500 秒



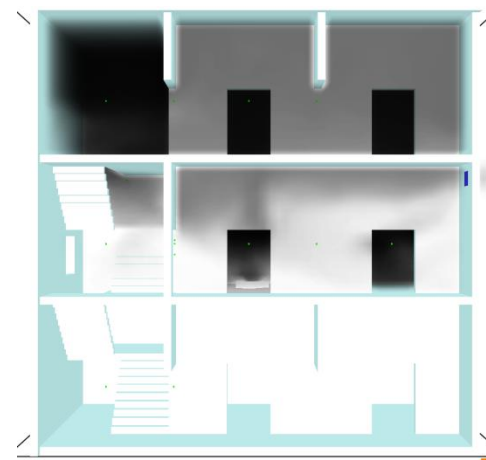
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

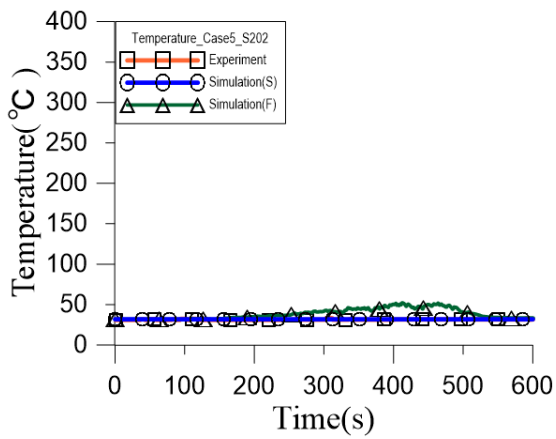


(b8) 小尺度 600 秒

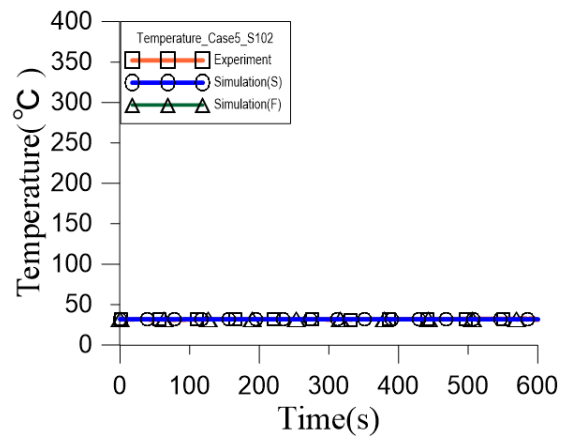


(c8) 全尺度 1900 秒

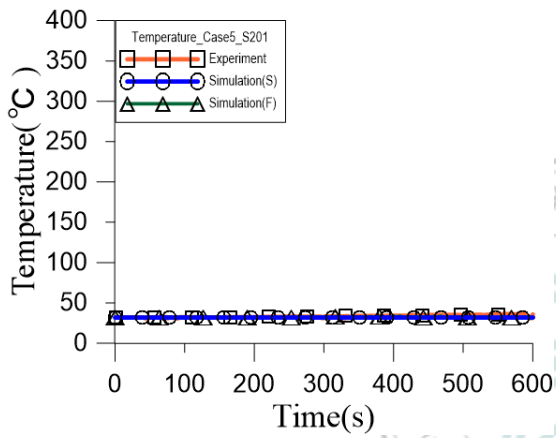
圖 4.17 Case5 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



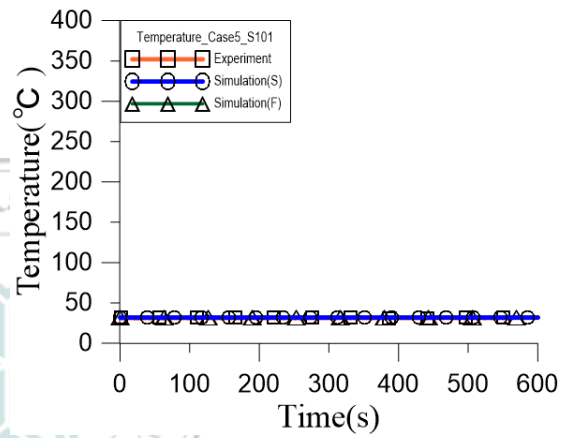
(a) S202



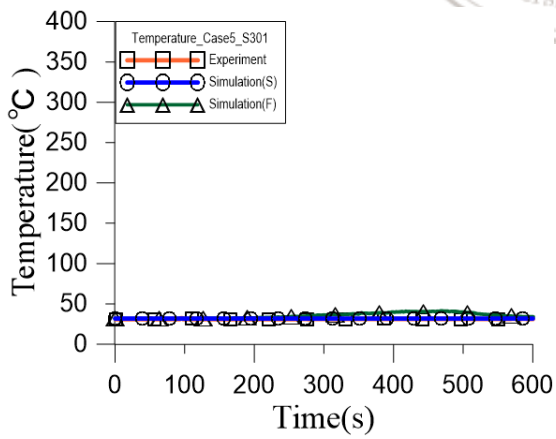
(b) S102



(c) S201

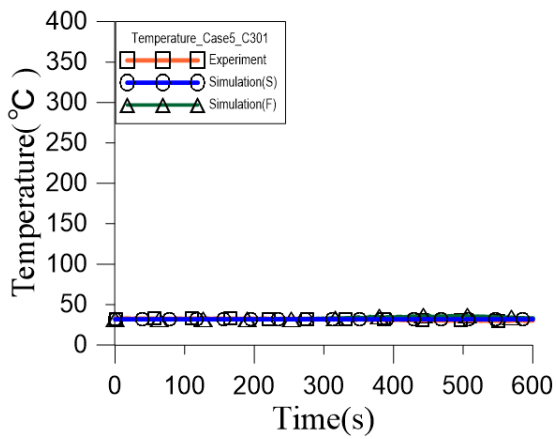


(d) S101

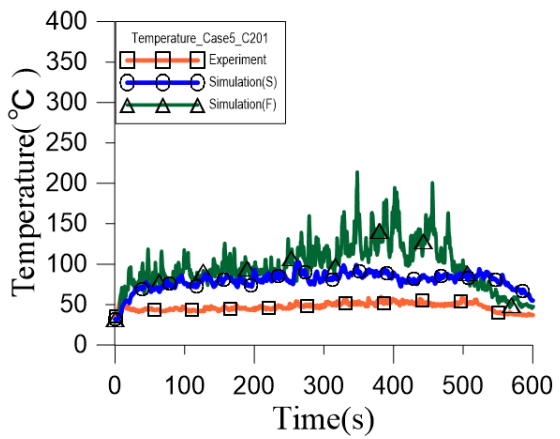


(e) S301

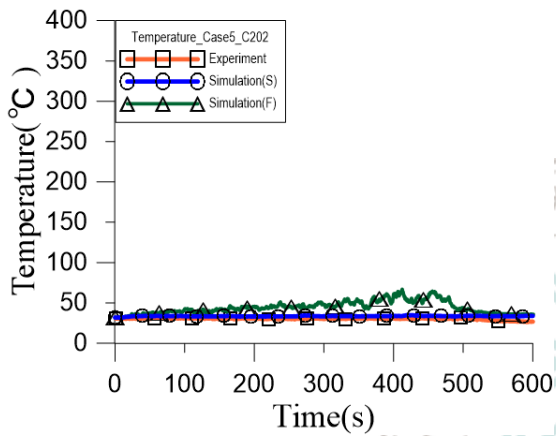
圖 4.18 Case5 梯間溫度曲線圖



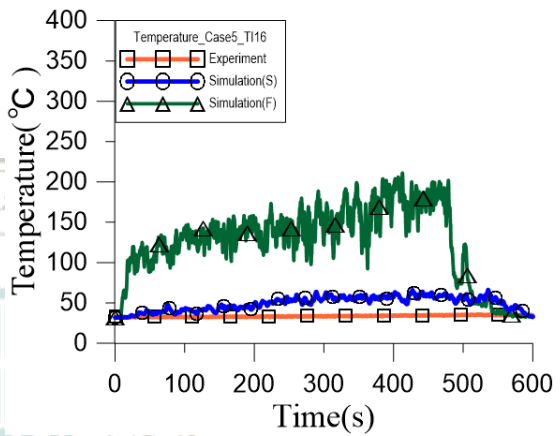
(f) C301



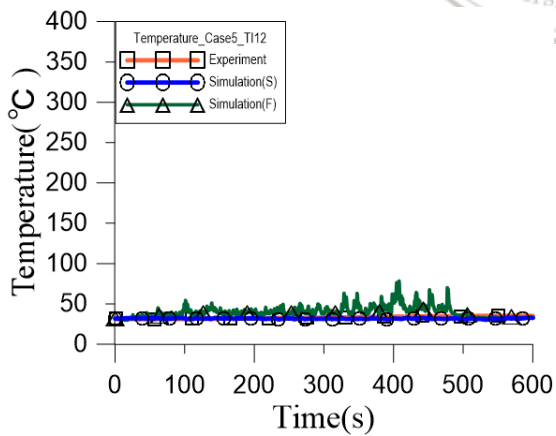
(g) C201



(h) C202

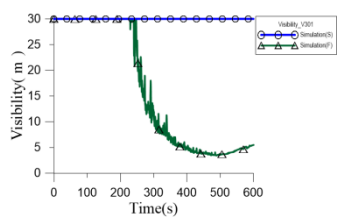


(i) TI16

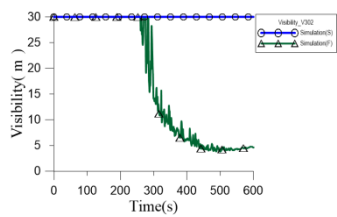


(j) TI12

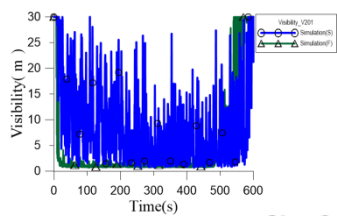
圖 4.19 Case5 走道溫度曲線圖



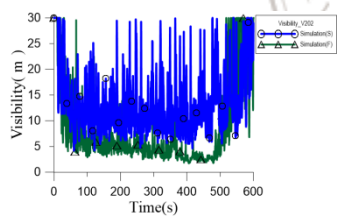
V301



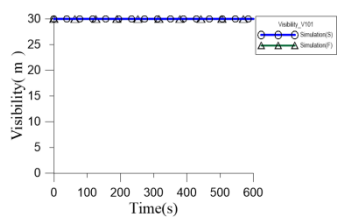
V302



V201

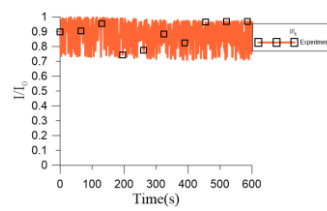


V202

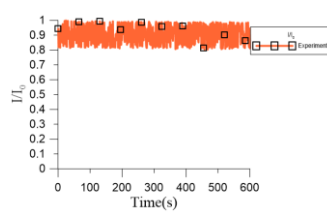


V101

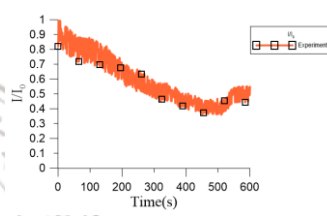
能見度(模擬)



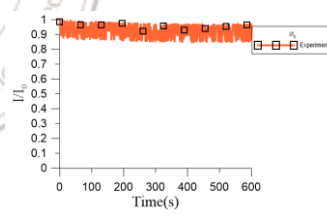
L301



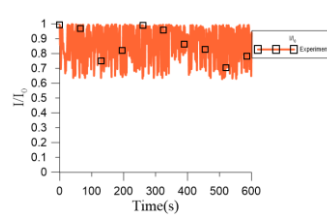
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.20 Case5 能見度與光強度對照圖

4.1.6 Case6 案例分析

Case6 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為梯間進風設備二樓無作動與排煙設備作動，進氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，排氣通風口一、三樓封閉僅二樓開啟，小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，氣簾排氣全尺度下速度為 17 m/s，小尺度下速度則為 5.375 m/s；排氣量則為全尺度為每秒 1.7 立方公尺，小尺度則為每秒 0.005 立方公尺並探討煙流擴散沉積的情形。

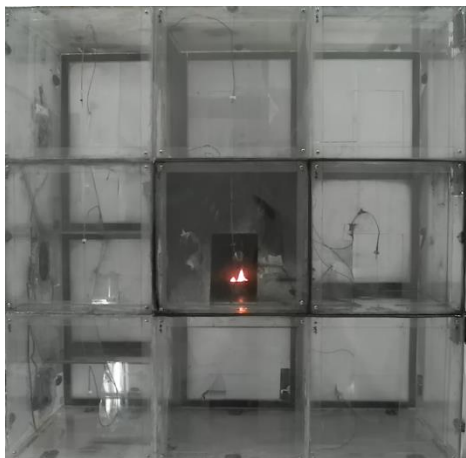
本案例加裝阻煙氣簾，在初期煙流擴散中，同樣受到氣簾氣流影響，對照前組 Case5 實驗及小尺度明顯的煙流，在此案例中則是受到氣簾影響快速的在走道間擴散開來，也因為氣簾速度使用最大風速，使得火源明顯的火焰左右飄動；在全尺度 320 秒時已經煙流進入至梯間，也因為氣流影響，有部分菸流往下沉降造成一至三樓梯間皆充滿煙霧，對比同時間的 Case5 全尺度才開始有煙流進入梯間；而在小尺度及模擬 300 秒時，有著類似的煙流擴散情形，且並無明顯煙氣進入梯間，反觀全尺度則擴散更加嚴重，三樓走道皆充滿；而模擬與小尺度在最後 600 秒時，看到皆有少許煙氣竄過氣簾，而全尺度則是於整個模型皆有煙霧存在。

梯間溫度測點方面，皆在 30 幾度無明顯的哪一處有較高的情形，而在 Case5 則是因為無受到氣簾氣流影響擴散的這麼明顯，故在 S202 有較高的溫度產生；而在走廊處的測點，發現在此案例下 C201 火源房間外測點，溫度較無 Case5 到達上百溫度，而小尺度與實驗溫度曲線也無較大變化，推測是受到氣簾氣流影響，使得穩地高溫煙層擴散開來才有此現象，而看到 TI16 全尺度在 Case5 無氣簾下門口處溫度可到達快 200 度的高溫，與本案例下則是可能受到氣簾氣流影響，無較高

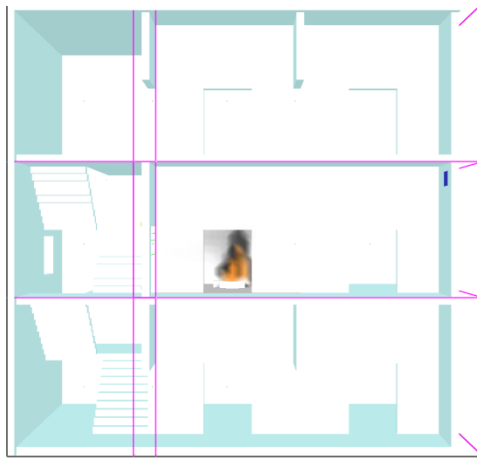
溫度出現於往梯間處的逃生門處。

能見度則參考如圖 4.24 Case6 能見度與光強度對照圖中，看到因為煙氣受到氣簾影響，全尺度因為於模型各處都有煙氣存在，故於五處能見度測點都有下降的趨勢，而小尺度模擬則是模擬後期少許煙霧進入三樓走道才會在 V301、V302 與 V101 末端有下降情況；再來看到右側實驗的光感度測點，則是皆無明顯的下降幅度，推測與煙流擴散使得煙層無明顯遮蔽陽光的情況，故在光感度上都較大影響。

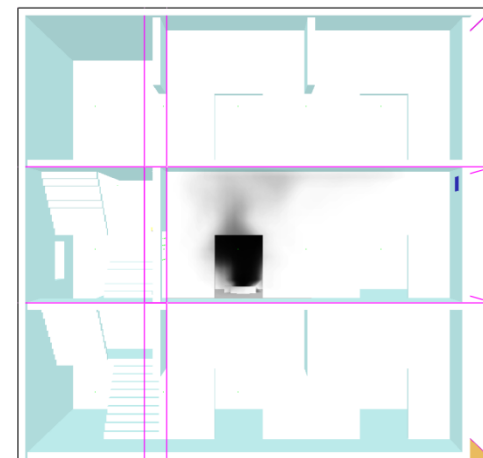




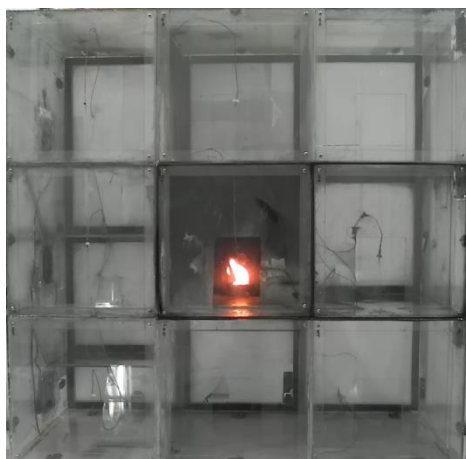
(a1) 實驗 5 秒



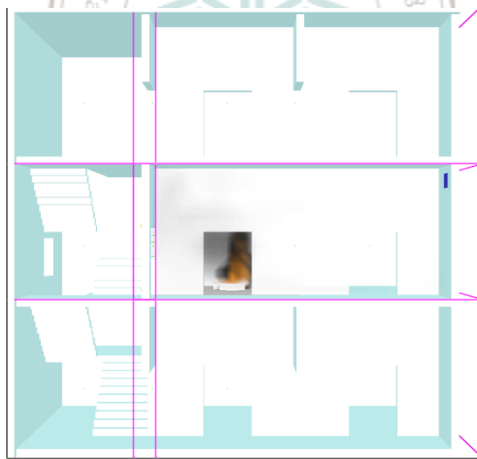
(b1) 小尺度 5 秒



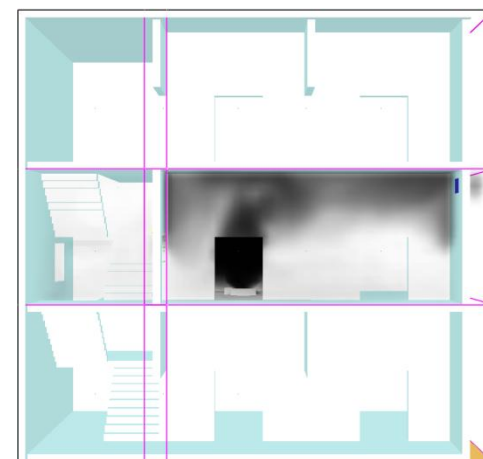
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

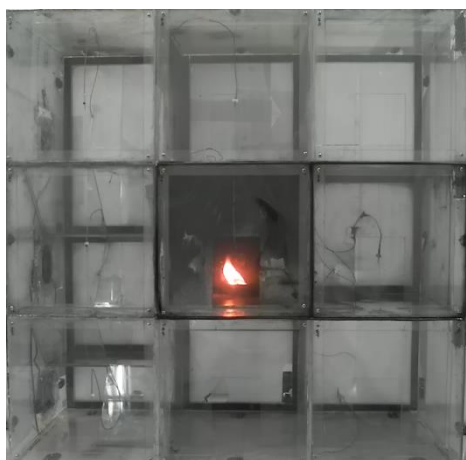


(b2) 小尺度 10 秒

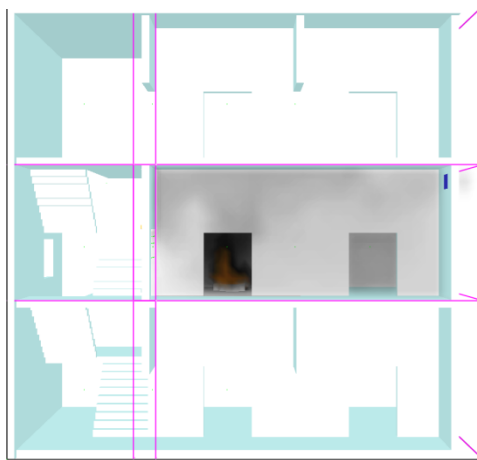


(c2) 全尺度 30 秒

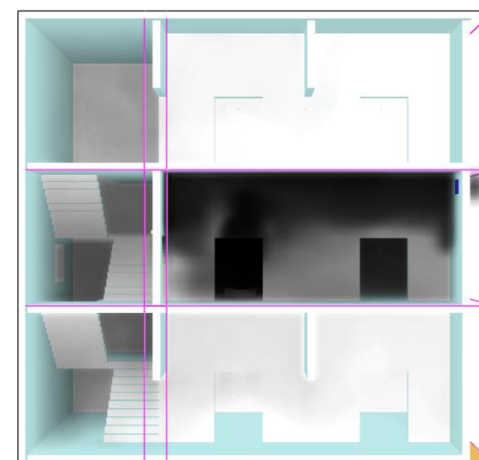
圖 4.21 Case6 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



(a3) 實驗 100 秒



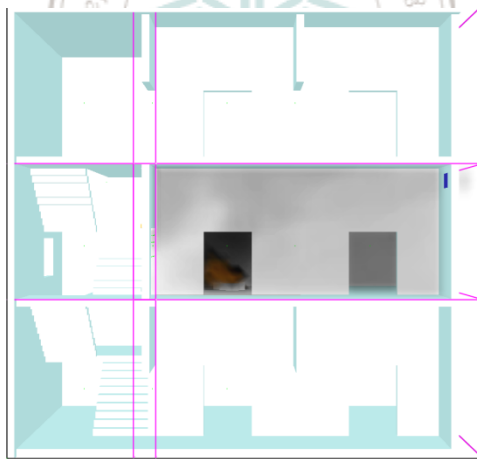
(b3) 小尺度 100 秒



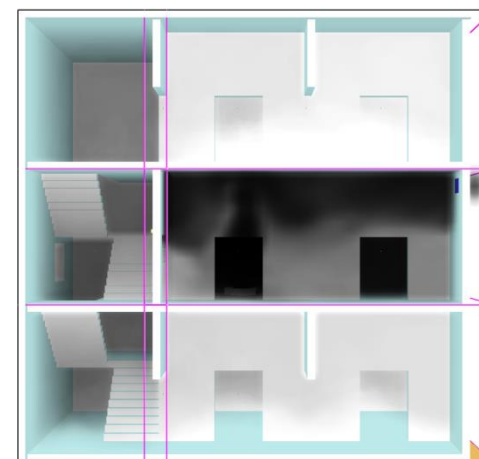
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

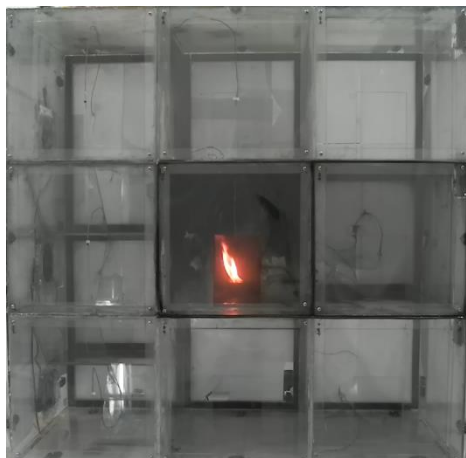


(b4) 小尺度 200 秒

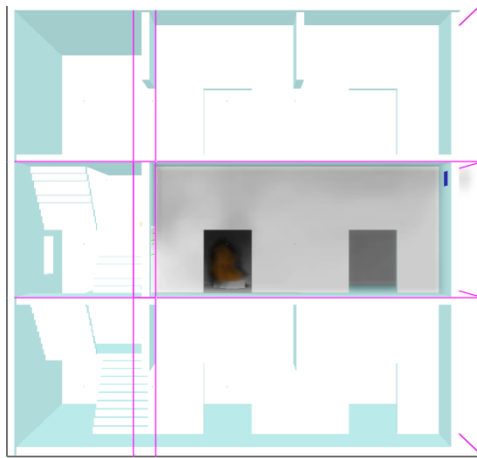


(c4) 全尺度 635 秒

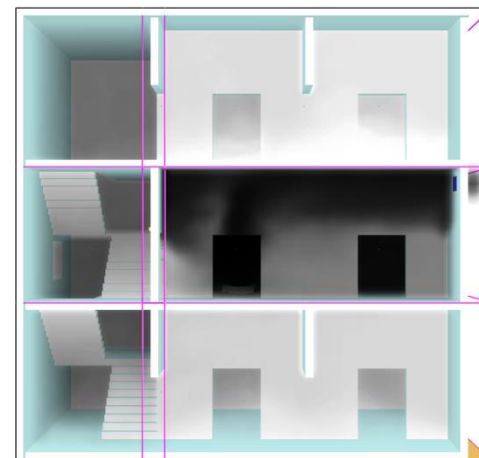
圖 4.21 Case6 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



(a5) 實驗 300 秒



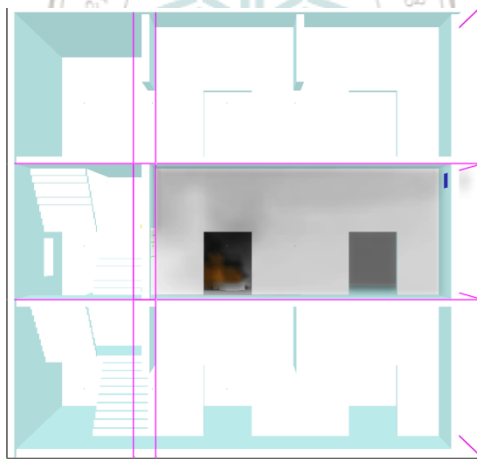
(b5) 小尺度 300 秒



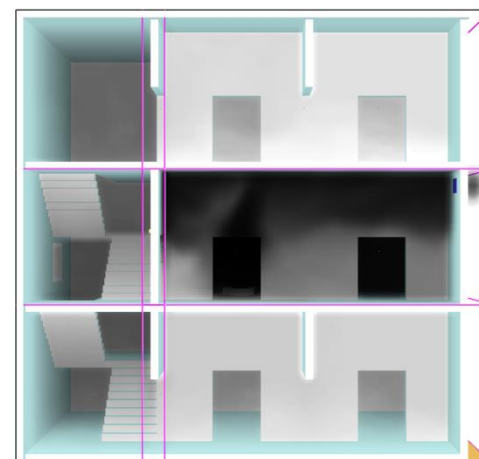
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒



(b6) 小尺度 400 秒

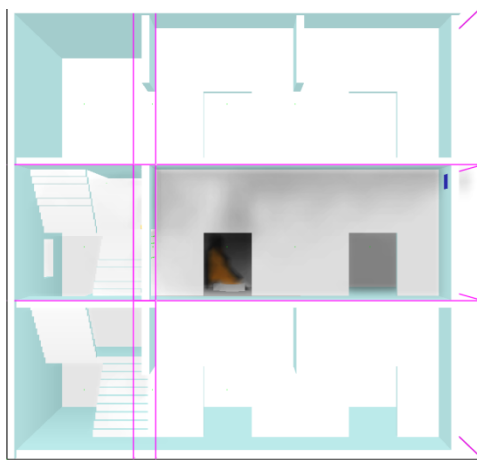


(c6) 全尺度 1265 秒

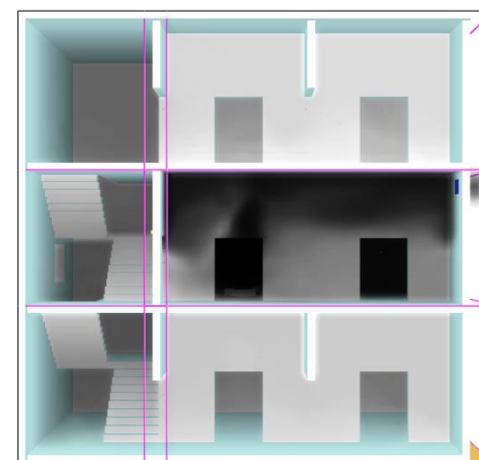
圖 4.21 Case6 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



(a7) 實驗 500 秒



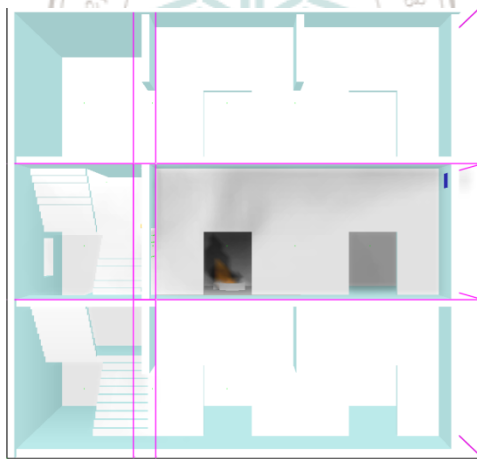
(b7) 小尺度 500 秒



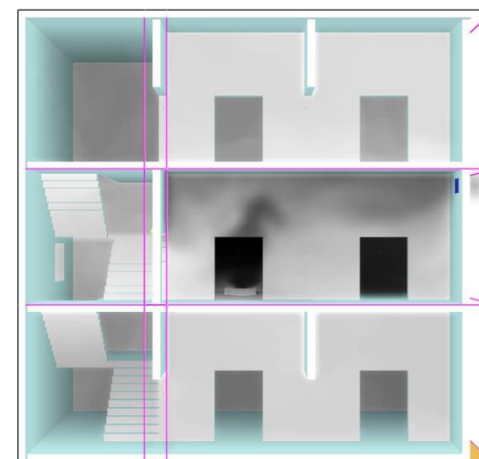
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

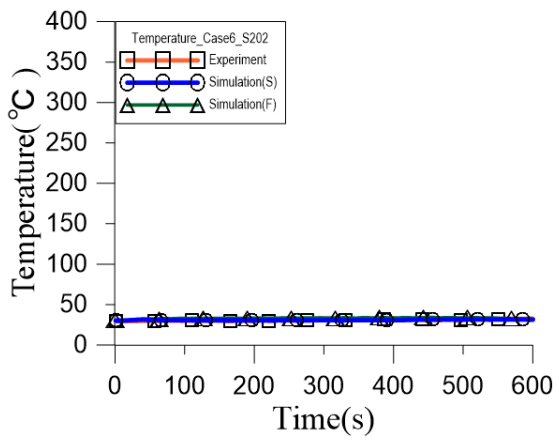


(b8) 小尺度 600 秒

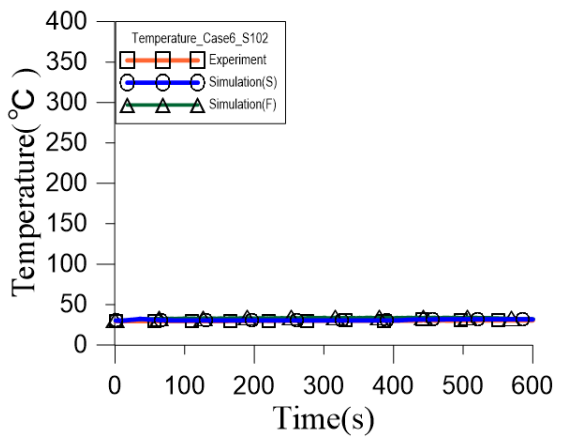


(c8) 全尺度 1900 秒

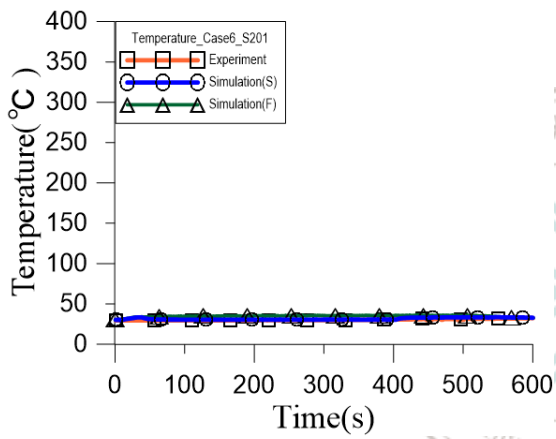
圖 4.21 Case6 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



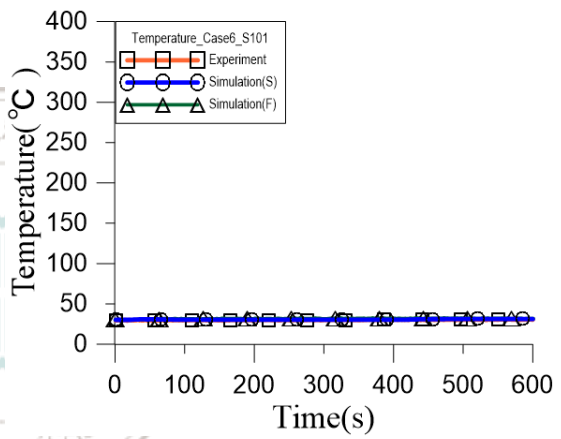
(a) S202



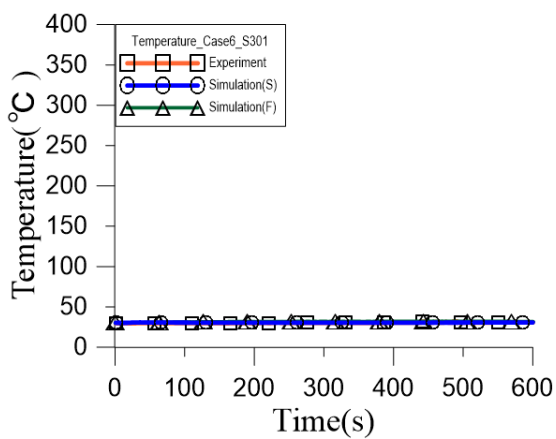
(b) S102



(c) S201

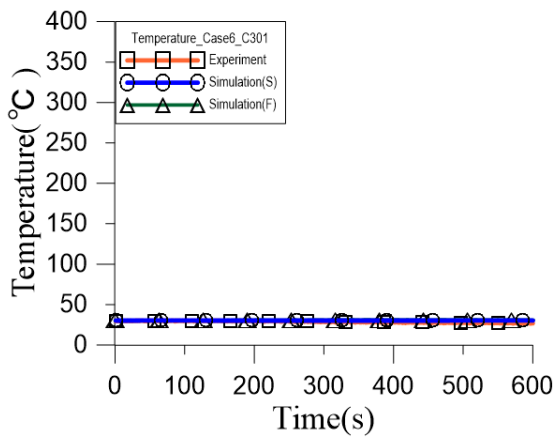


(d) S101

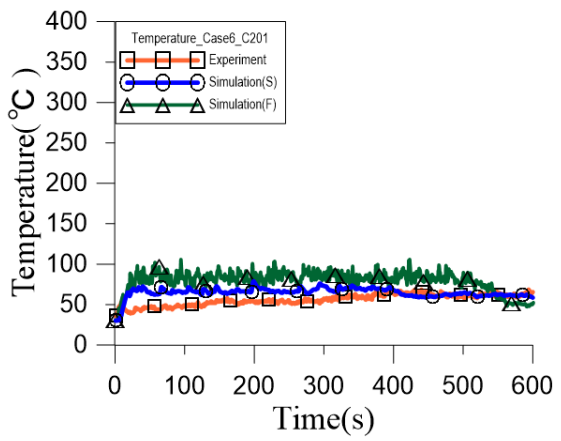


(e) S301

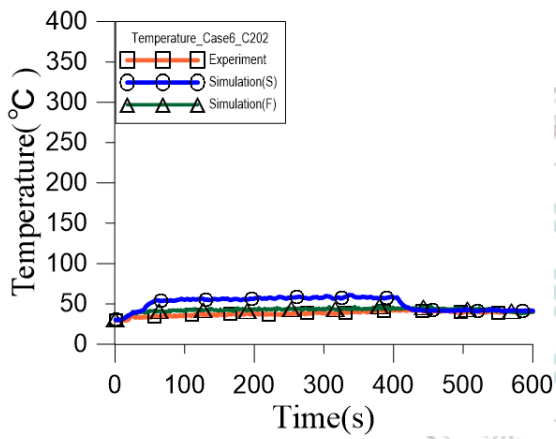
圖 4.22 Case6 梯間溫度曲線圖



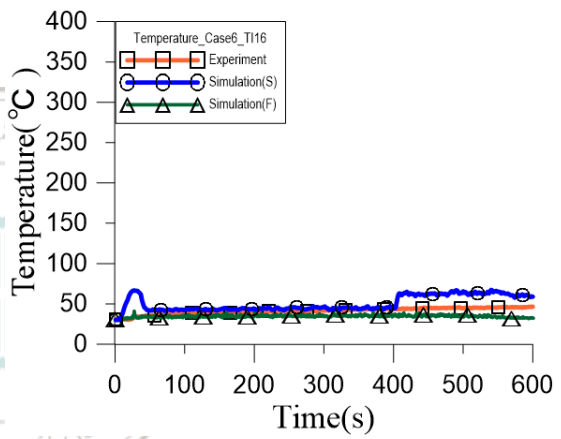
(f) C301



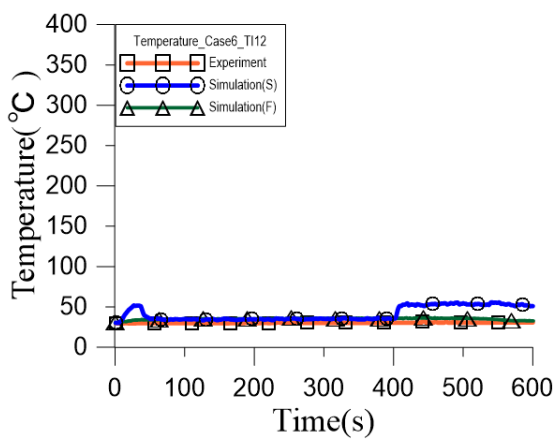
(g) C201



(h) C202

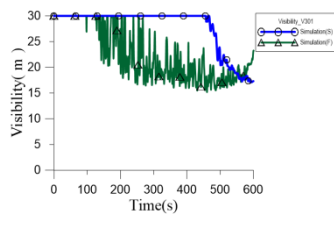


(i) TI16

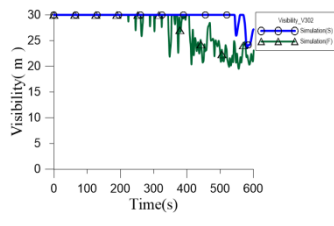


(j) TI12

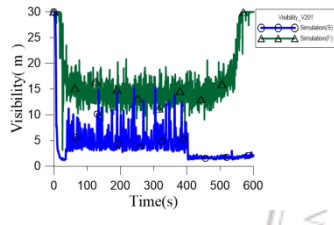
圖 4.23 Case6 走道溫度曲線圖



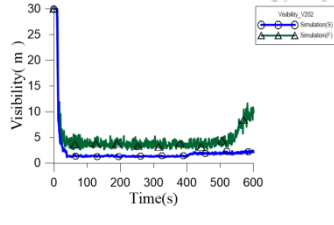
V301



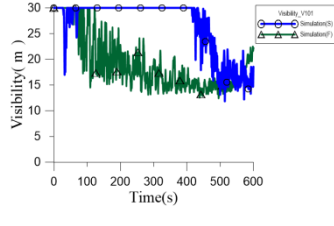
V302



V201

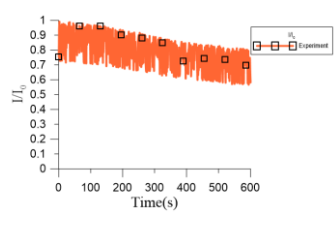


V202

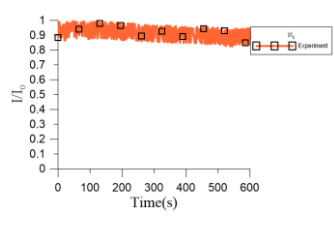


V101

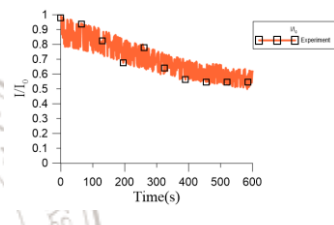
能見度(模擬)



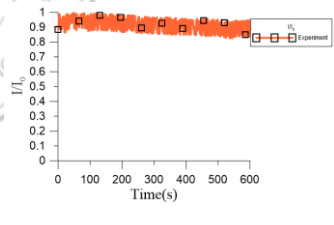
L301



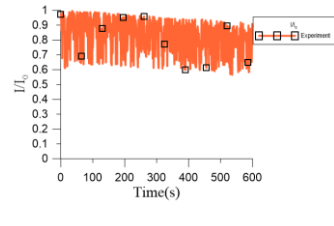
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

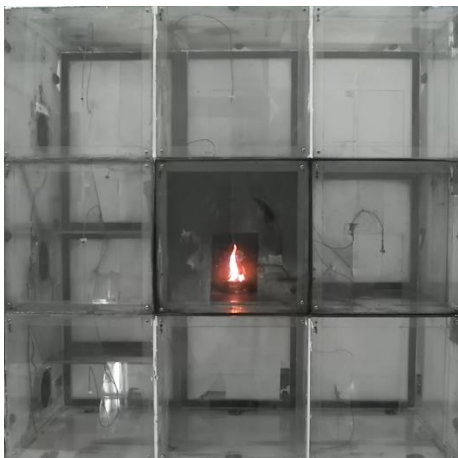
圖 4.24 Case6 能見度與光強度對照圖

4.1.7 Case7 案例分析

Case7 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為無加裝任何進排氣設備，進、排氣通風口一、二、三樓皆是開啟，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，並探討煙流擴散沉積的情形。

煙流圖參照圖 4.25 Case7 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖，同樣在初期前 10 秒時皆有相同的火源成長情況，而在三組測試當中來到實驗 100 秒時，因為無任何機械排煙設備，煙流很快的充滿整個走道間，且皆已擴散至整個梯間以及上樓層之走道，擴散情況隨著時間進行有愈來愈大，也因為全尺度有較大的煙流，煙流蓄積也較為明顯，而實驗最後 600 秒時看到與小尺度一樣因為火源還未熄滅，煙流擴散雷同，而全尺度火源已熄滅故對前一秒數比較煙層顏色有較少一些。

在溫度測點觀察上，梯間走道的溫度測點，S201、S202、S301 皆有微幅溫度增加，而在 S301 及 S202 因為全尺度煙流量較大，故在這兩個測點上有較高的溫度上升情況；走道間的溫度測點，測點 C201、C202 及往梯間的逃生門中間測點 TI16、TI12 這四個測點都在模擬中有明顯的上升，其中就以全尺度上升較大，而在比較小尺度與實驗，發現在逃生門中間測點 TI16、TI12 這兩點的溫度曲線有較大的異同，推測可能在實驗設置溫度探頭，因為與光感度探頭有重疊部分，故使得 TI12 無較大溫度的變化，加上實驗模型可能有部分漏氣現象，故與實際模擬條件有異造成。能見度則是參照圖 4.28 Case7 能見度與光強度對照圖，左側模擬全尺度及小尺度皆在梯間能見度有明顯下降；而右側實驗光感度也有同樣的趨勢。



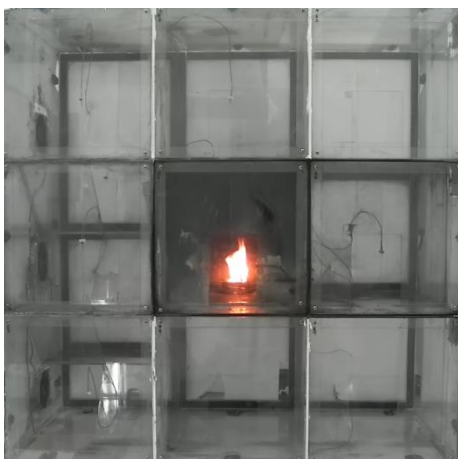
(a1) 實驗 5 秒



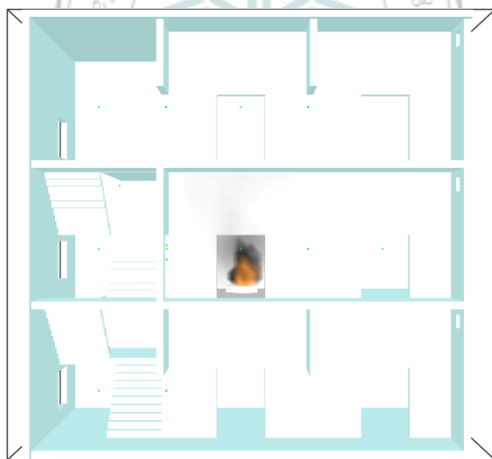
(b1) 小尺度 5 秒



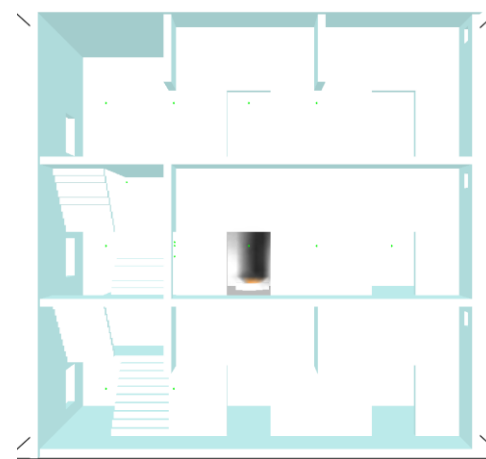
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

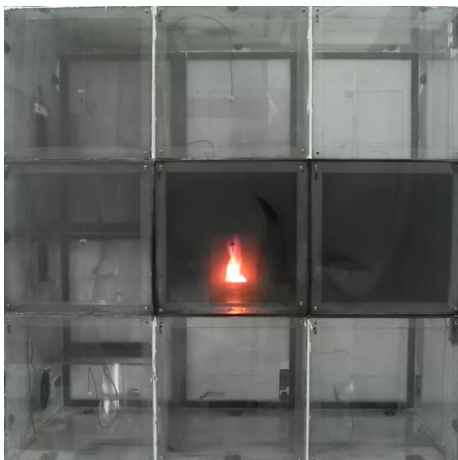


(b2) 小尺度 10 秒

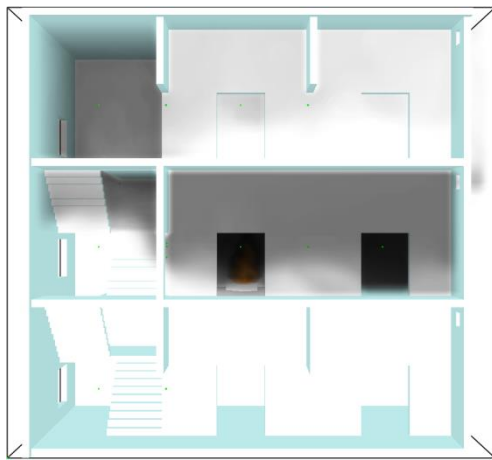


(c2) 全尺度 30 秒

圖 4.25 Case7 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



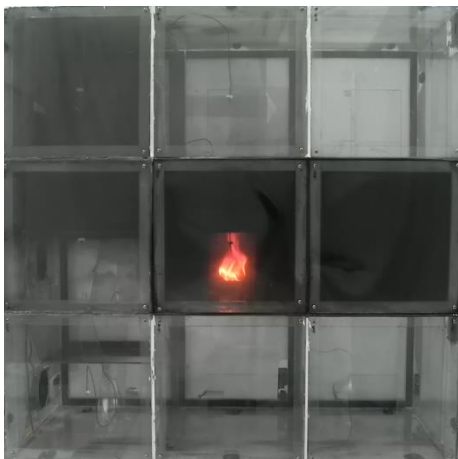
(a3) 實驗 100 秒



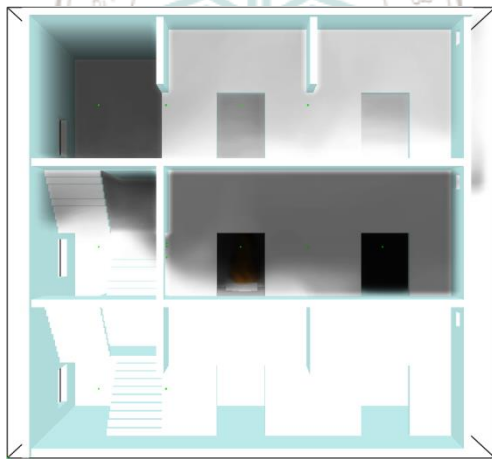
(b3) 小尺度 100 秒



(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

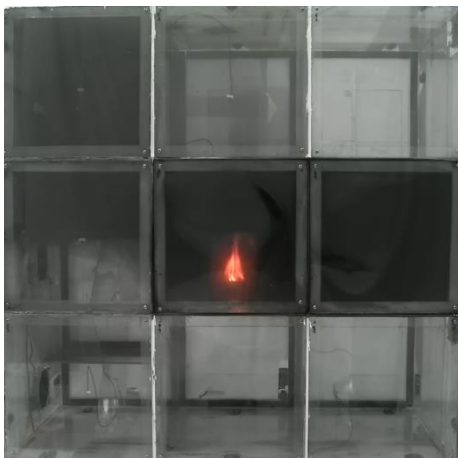


(b4) 小尺度 200 秒

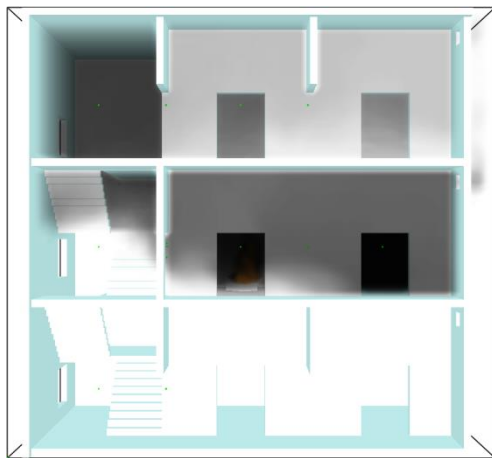


(c4) 全尺度 635 秒

圖 4.25 Case7 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



(a5) 實驗 300 秒



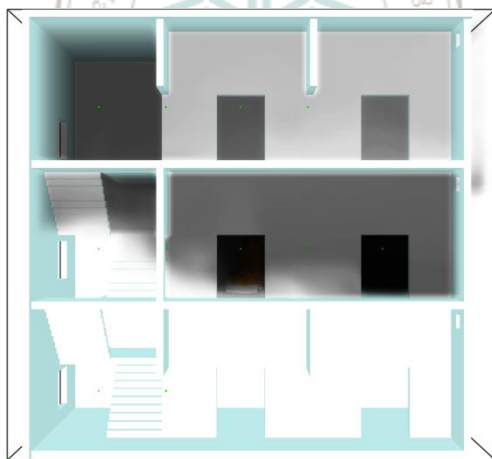
(b5) 小尺度 300 秒



(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒



(b6) 小尺度 400 秒

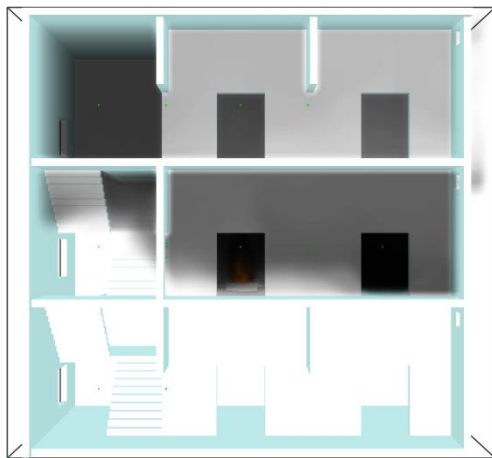


(c6) 全尺度 1265 秒

圖 4.25 Case7 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



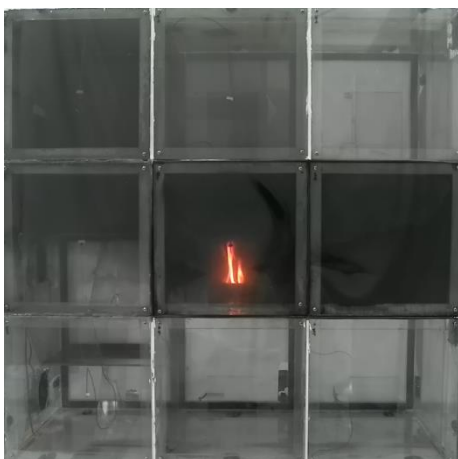
(a7) 實驗 500 秒



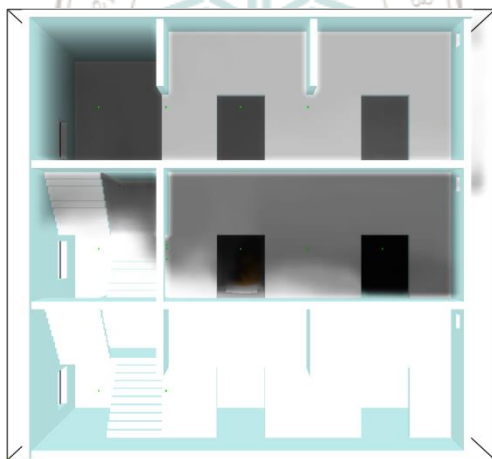
(b7) 小尺度 500 秒



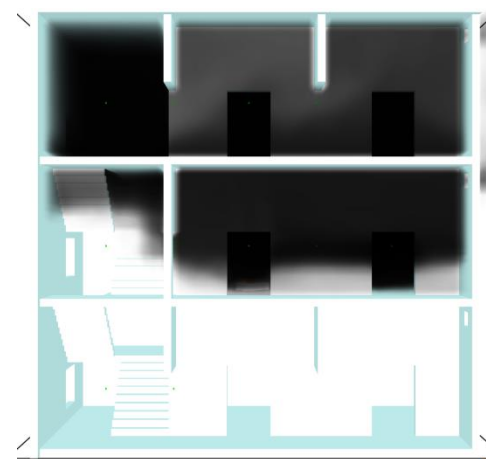
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

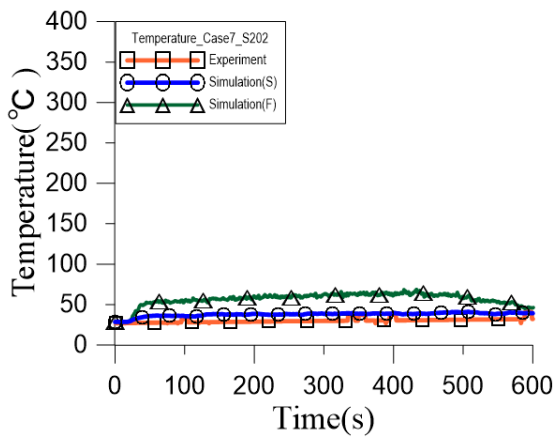


(b8) 小尺度 600 秒

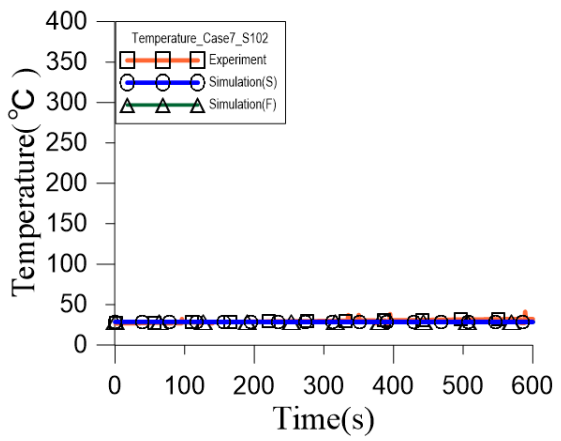


(c8) 全尺度 1900 秒

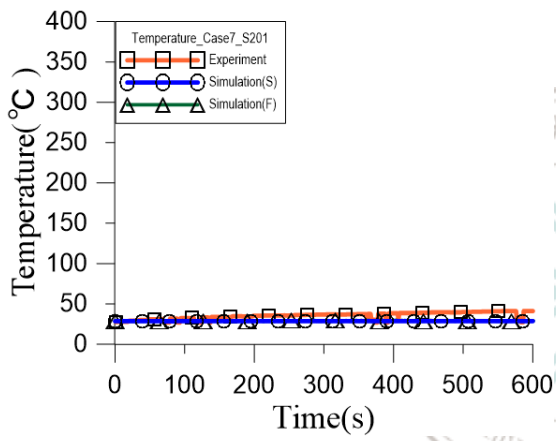
圖 4.25 Case7 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



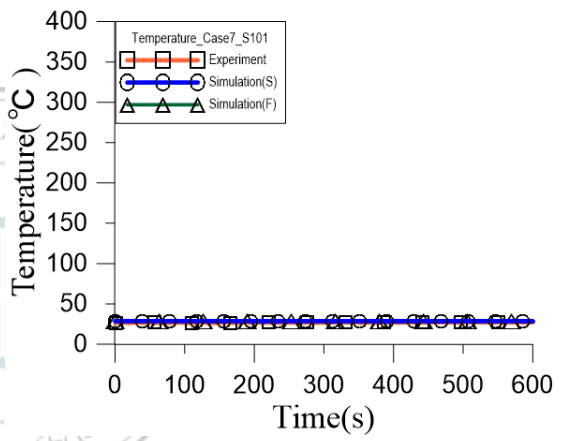
(a) S202



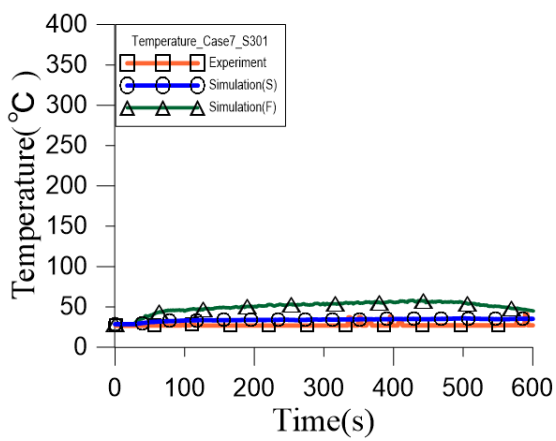
(b) S102



(c) S201

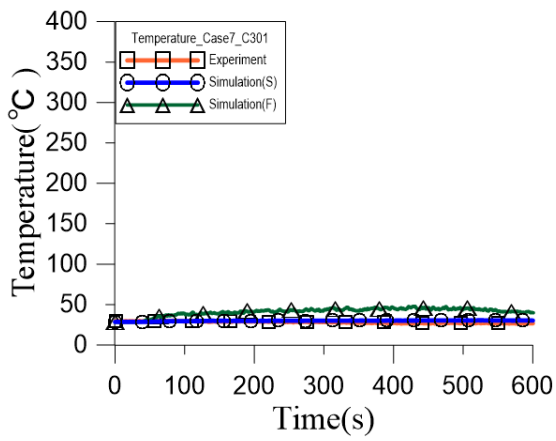


(d) S101

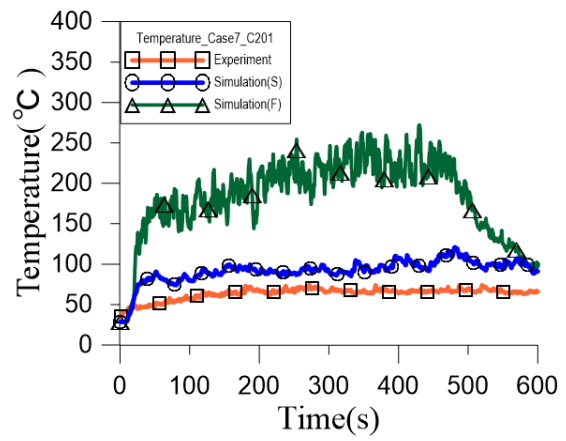


(e) S301

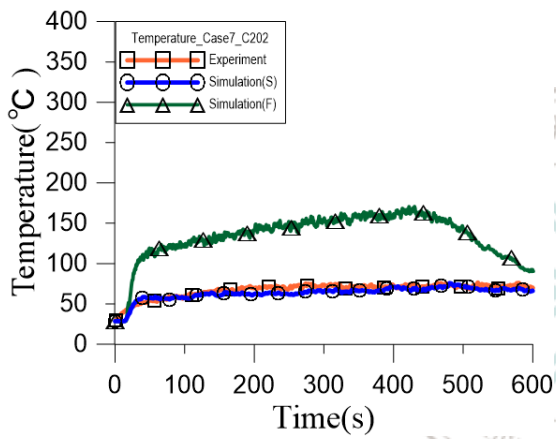
圖 4.26Case7 梯間溫度曲線圖



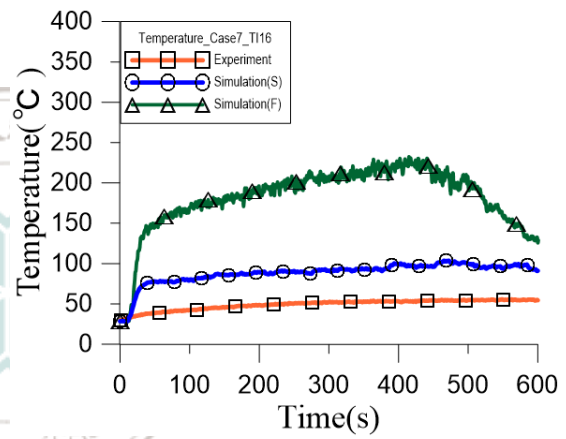
(f) C301



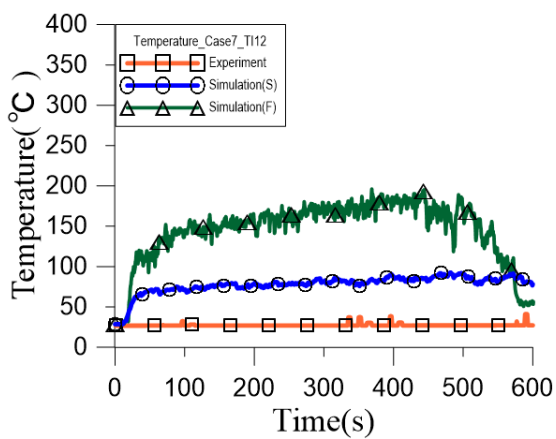
(g) C201



(h) C202

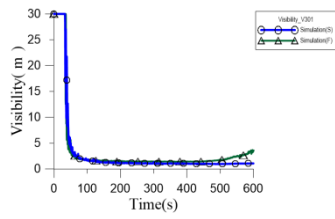


(i) TI16

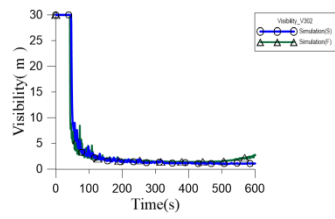


(j) TI12

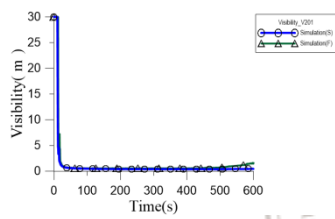
圖 4.27 Case7 走道溫度曲線圖



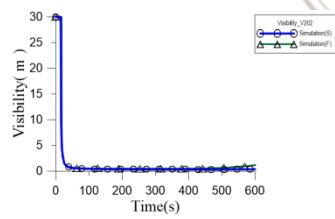
V301



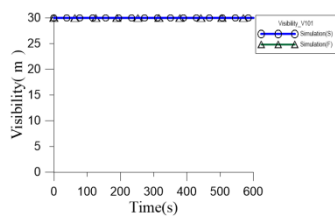
V302



V201

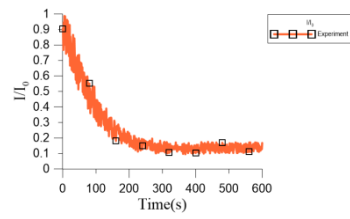


V202

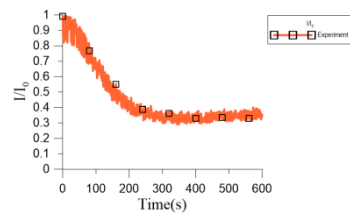


V101

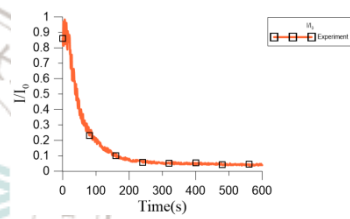
能見度(模擬)



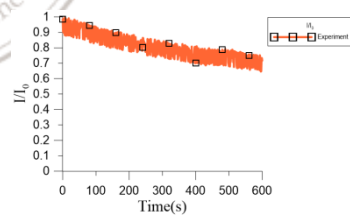
L301



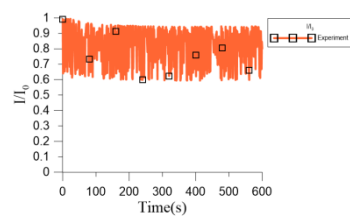
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.28 Case7 能見度與光強度對照圖

4.1.8 Case8 案例分析

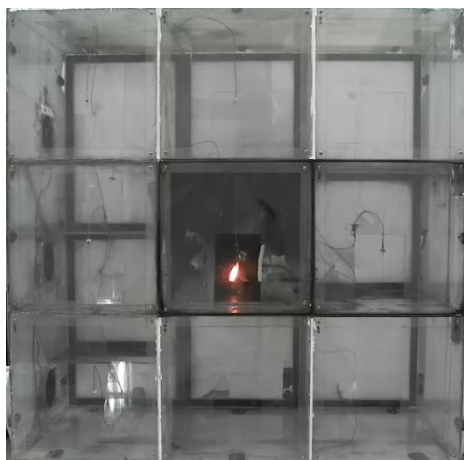
Case8 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為無加裝任何進排氣設備，進、排氣通風口一、二、三樓皆是開啟，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，氣簾排氣全尺度下速度為 17 m/s，小尺度下速度則為 5.375 m/s；排氣量則為全尺度為每秒 1.7 立方公尺，小尺度則為每秒 0.005 立方公尺並探討煙流擴散沉積的情形。

同樣在煙霧變化比較圖中，自然排煙下的 Case7 與加裝氣簾 Case8，在有氣簾情況下，在初期全尺度 30 秒時即受到氣簾氣流影響而擴散至梯間；在模擬及實驗來到 100 秒時，在有加裝氣簾情形下實驗無明顯煙氣進入至梯間，小尺度則是有少許煙霧擴散至梯間一樓至三樓間，全尺度則是氣簾已失效失去阻煙效果擴散至上下走道及梯間；在實驗 300 秒有部分煙氣進入至梯間相比較無加裝氣簾此時在三樓梯間進走道間皆明顯充滿煙霧，而隨著模擬進行在實驗及小尺度最後因為氣簾氣流干擾充滿上下樓層，與自然排煙 Case7 僅在二、三樓受到影響，但對比較煙霧濃淡，明顯在本案例中因煙層擴散開來，才有此現象，但是否會在溫度及能見度造成影響，下述將會分析。

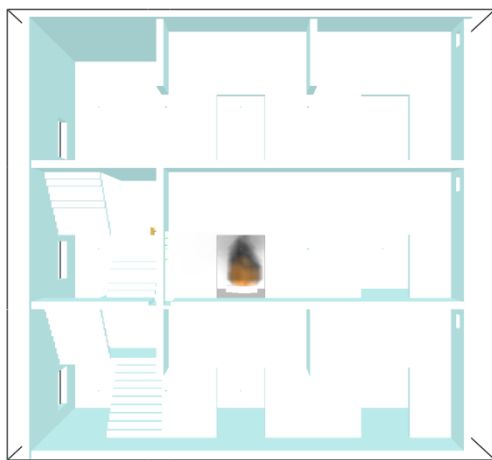
首先在溫度測點於梯間處，溫度測點也都有影響，因為有擴散至一樓梯間，也有微幅的上升，但整體無太大變化；走道間的溫度測點比較，同樣在 C201 及 C202 有明顯變化，只是煙層擴散開來，使得在本案例中小尺度及實驗有較大的吻合度，而在測點 C202 也較自然排煙較少的情形，推測與煙氣擴散至其他區間有關，而逃生門中間處測點 TI16 及 TI12 則是在本案例中與 Case7 比較整體都有溫度下降的情形，也說明煙霧無法在測點停留太久，而溫度才有下降現象。

能見上看到圖 4.32 中，左側為全尺度與小尺度能見度之比較，因為氣簾擴散至上下樓層，故在初始模擬即下降至最糟直至模擬結束；右側實驗光感度，同樣皆有光感度下降的趨勢，只是較不明顯，推測與煙層擴散至模型四周有關。

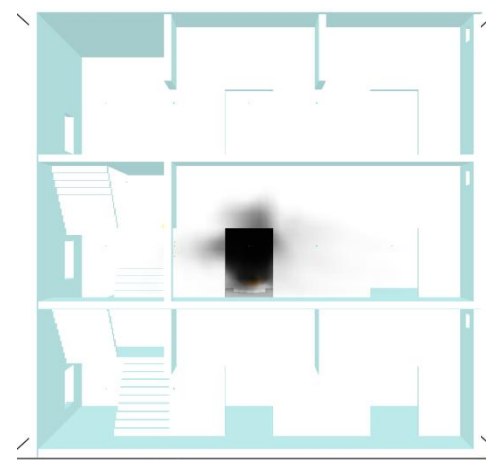




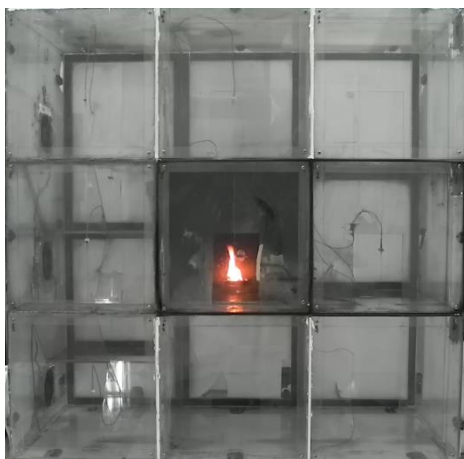
(a1) 實驗 5 秒



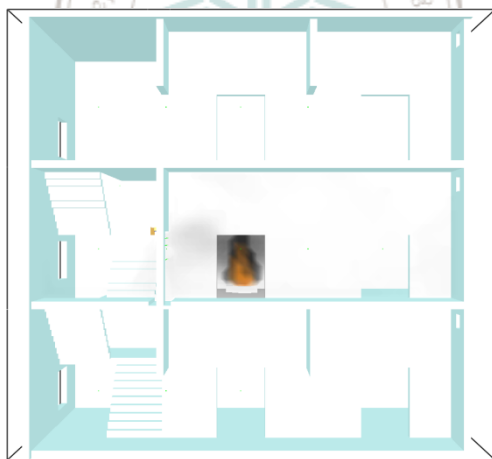
(b1) 小尺度 5 秒



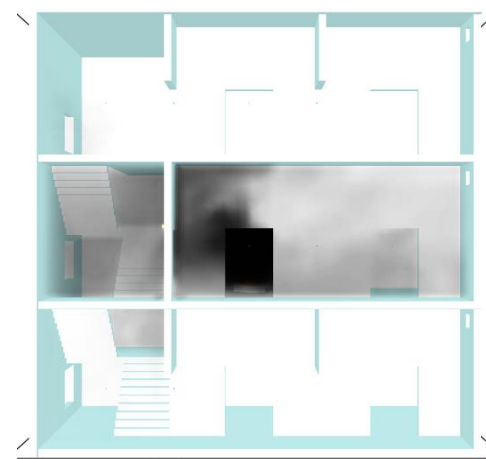
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

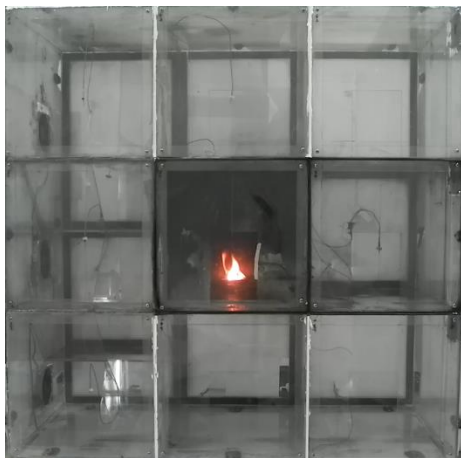


(b2) 小尺度 10 秒

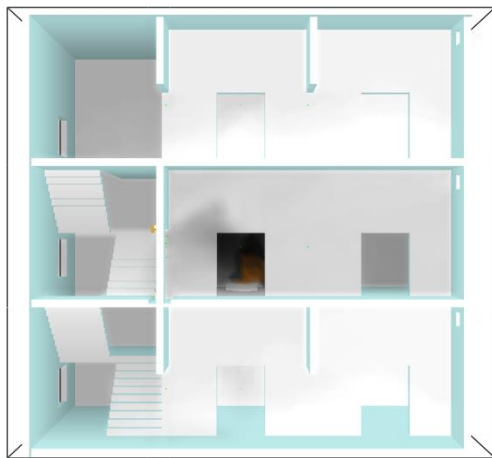


(c2) 全尺度 30 秒

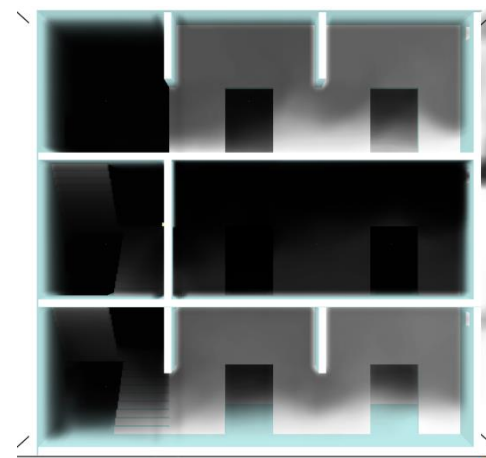
圖 4.29 Case8 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



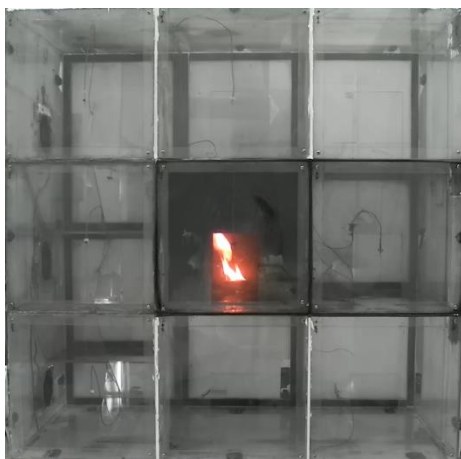
(a3) 實驗 100 秒



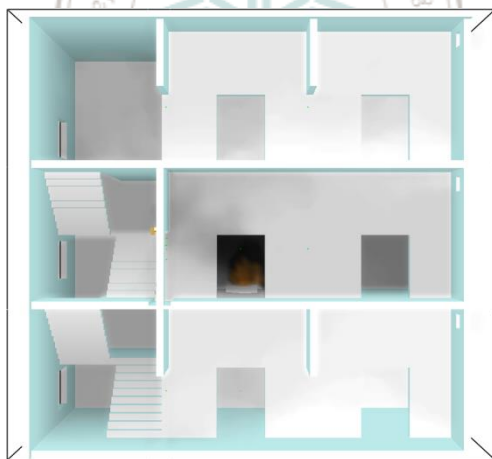
(b3) 小尺度 100 秒



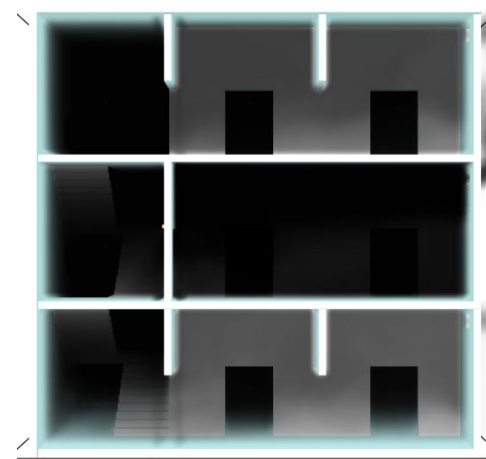
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒



(b4) 小尺度 200 秒

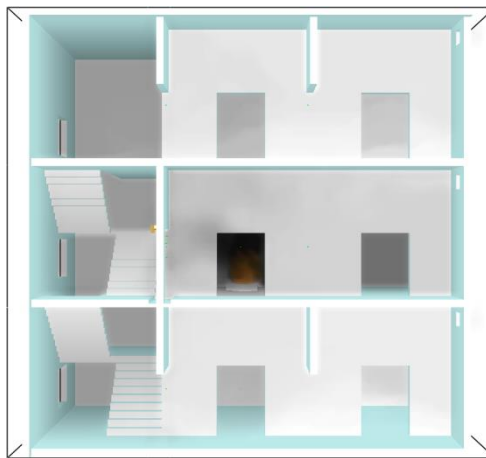


(c4) 全尺度 635 秒

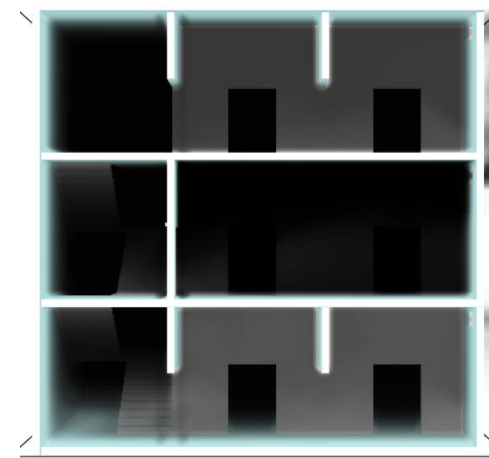
圖 4.29 Case8 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



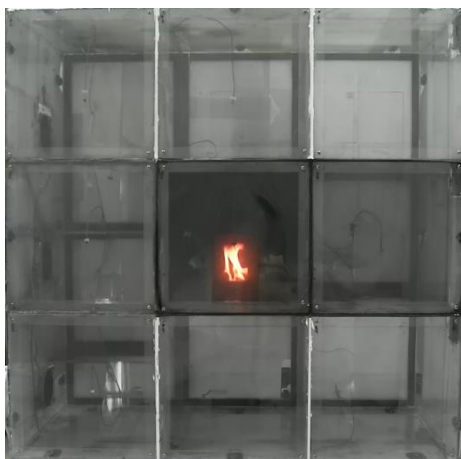
(a5) 實驗 300 秒



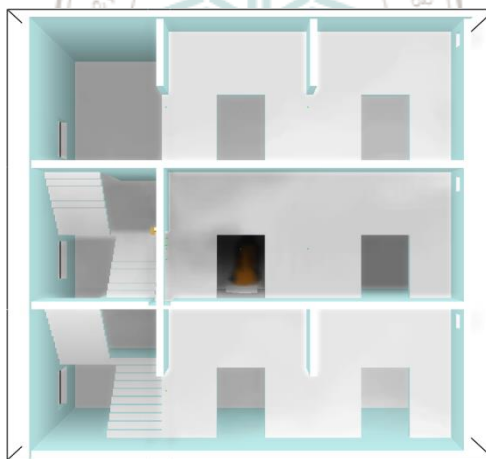
(b5) 小尺度 300 秒



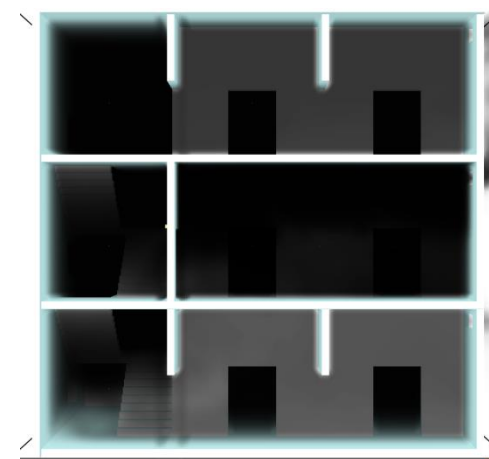
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

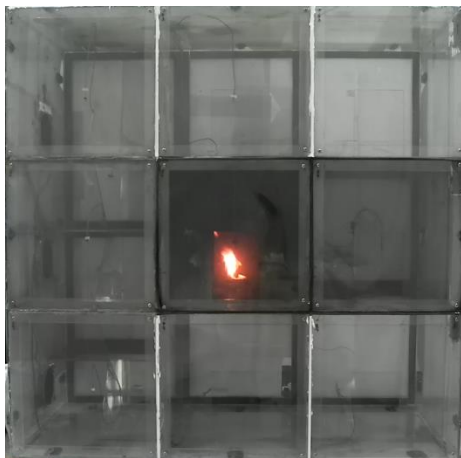


(b6) 小尺度 400 秒

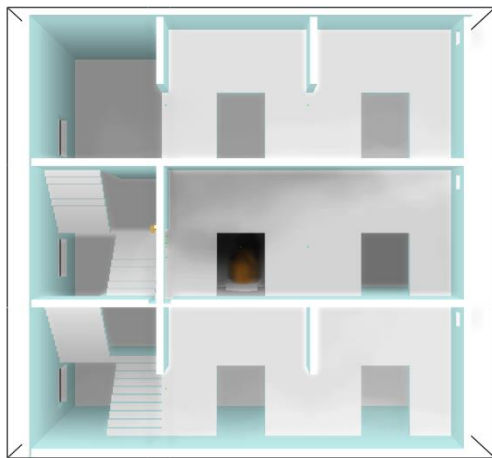


(c6) 全尺度 1265 秒

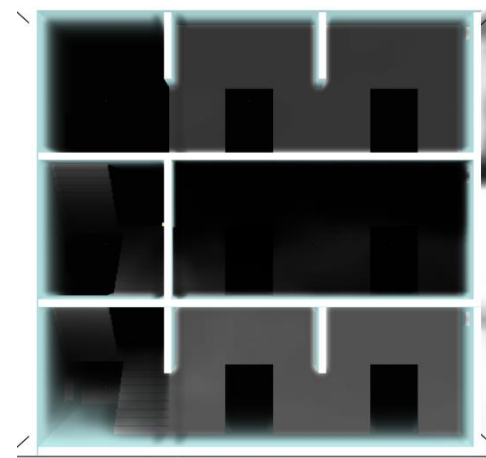
圖 4.29 Case8 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



(a7) 實驗 500 秒



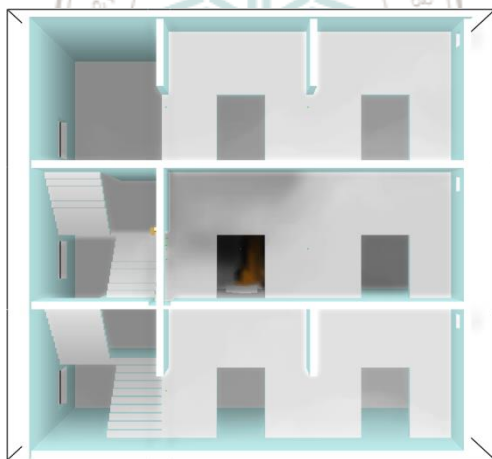
(b7) 小尺度 500 秒



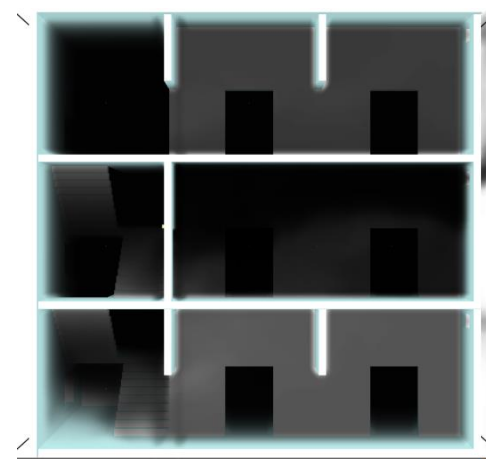
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

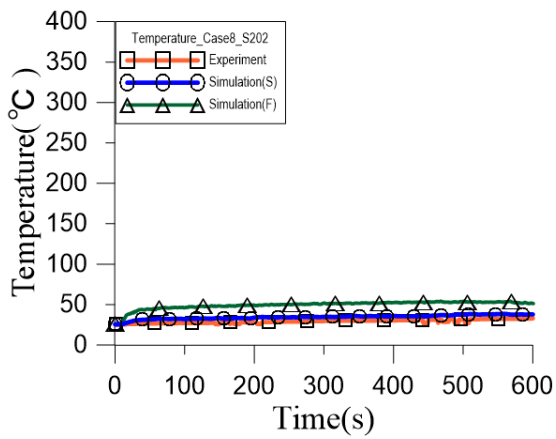


(b8) 小尺度 600 秒

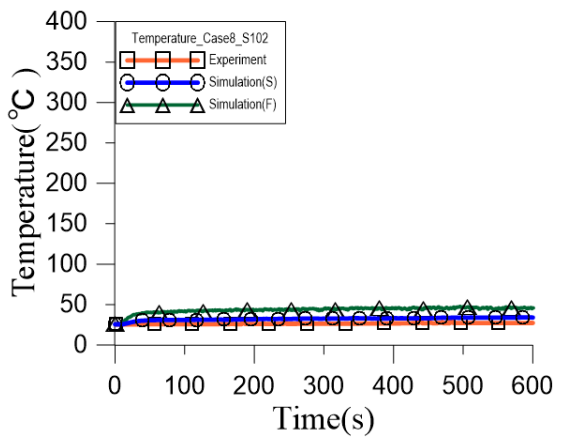


(c8) 全尺度 1900 秒

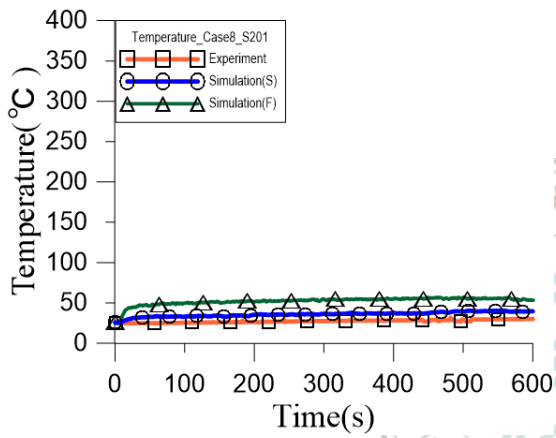
圖 4.29 Case8 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



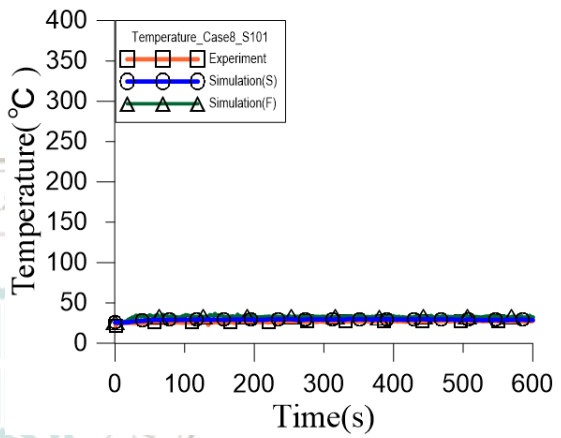
(a) S202



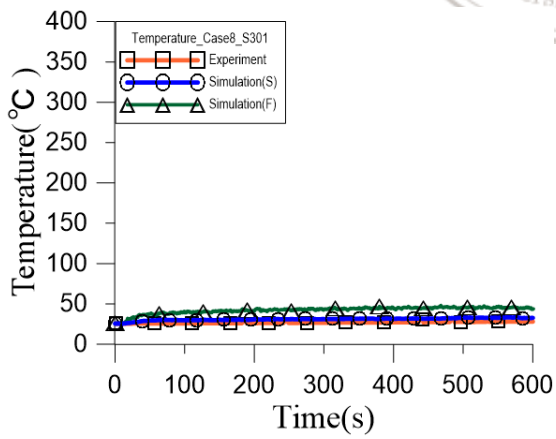
(b) S102



(c) S201

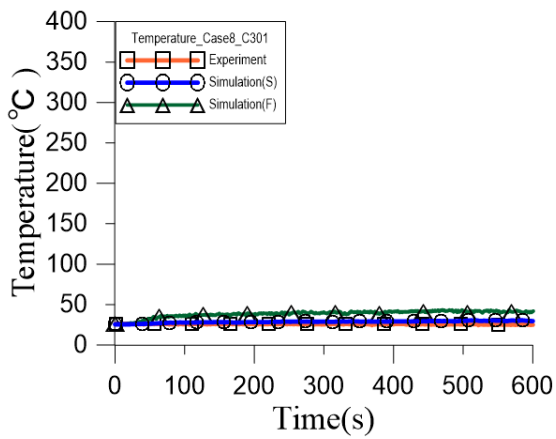


(d) S101

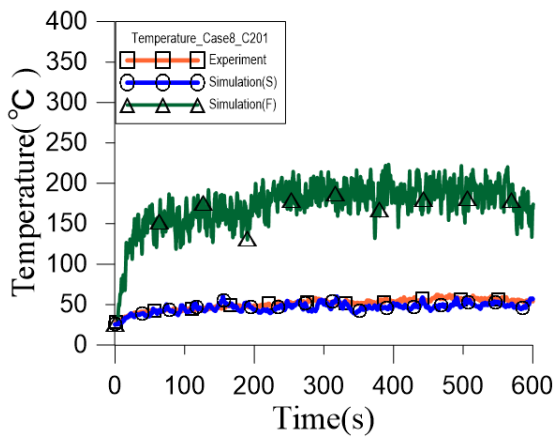


(e) S301

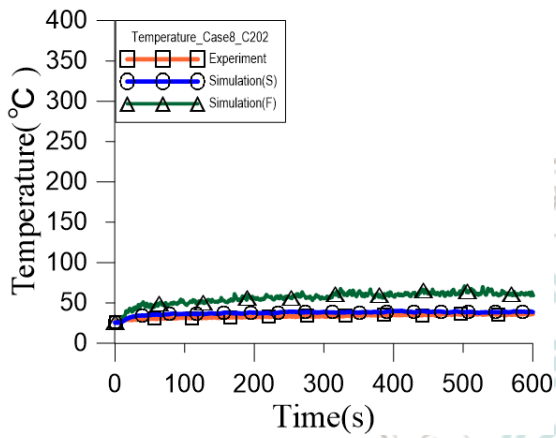
圖 4.30 Case8 梯間溫度曲線圖



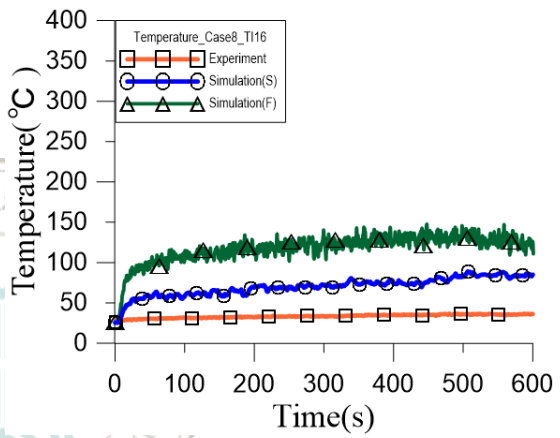
(f) C301



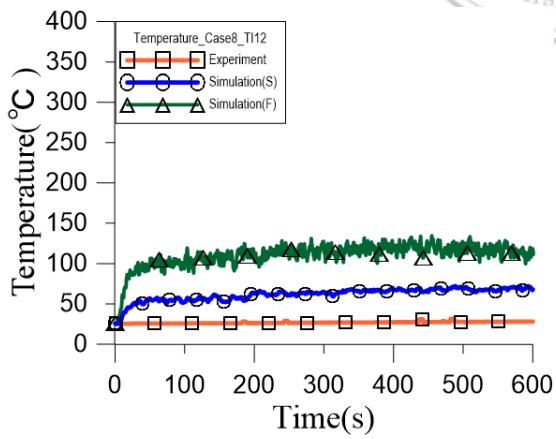
(g) C201



(h) C202

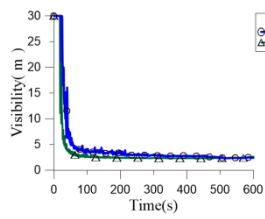


(i) TI16

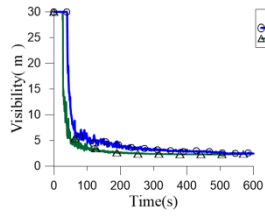


(j) TI12

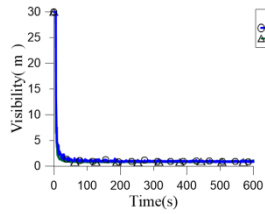
圖 4.31 Case8 走道溫度曲線圖



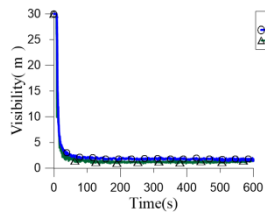
V301



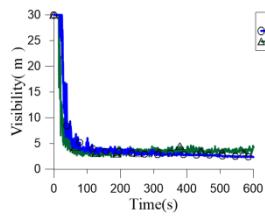
V302



V201

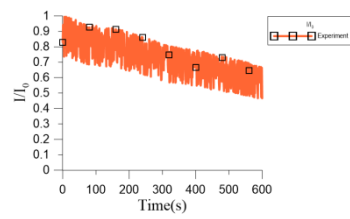


V202

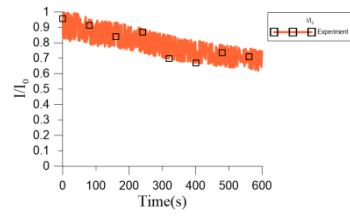


V101

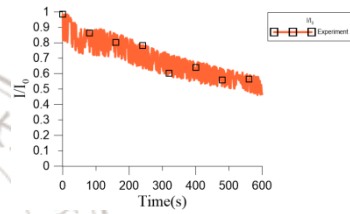
能見度(模擬)



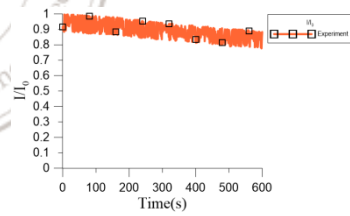
L301



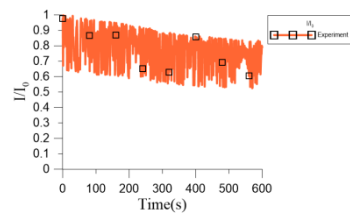
L302



L201



L202



L101

光強度(實驗)

圖 4.32 Case8 能見度與光強度對照圖

4.1.9 Case9 案例分析

Case9 案例為針對 Case8 案例情境設定，並設置雙氣簾(即梯間門內、外側)及在氣簾和火源處切細網格之模擬，使其更接近李訓谷學者提出之 D^* 網格計算大小，將原先 D^* 建議小尺度 0.007 m 及全尺度 0.07 m 切細至小尺度 0.001 m 及全尺度 0.01 m，因為 FDS 網格建議切細為 2^u 、 3^v 和 5^w 其中 u 、 v 、 w 需為整數，故設定切細網格使其接近 D^* 建議值。

Case9 以 FDS 針對小尺度 (1:10) 與全尺度 (1:1) 兩種不同大小之三層樓建築物進行火災煙流數值模擬並與 1:10 之實驗結果進行比較，三組測試之火場情境設定均為無加裝任何進排氣設備，進、排氣通風口一、二、三樓皆是開啟，根據進排氣口大小對照法規進氣量換算小尺度模型與實驗的進風量設置小尺度模型與實驗的進風量設置為每秒 0.012 立方公尺，排氣風量設置為每秒 0.006 立方公尺，全尺度進氣風量設置為每秒 4 立方公尺，排氣風量設置為每秒 2 立方公尺，氣簾排氣全尺度下速度為 17 m/s，小尺度下速度則為 5.375 m/s；排氣量則為全尺度為每秒 1.7 立方公尺，小尺度則為每秒 0.005 立方公尺並探討煙流擴散沉積的情形。

在煙霧變化比較圖中，Case9 與 Case8 做比較煙霧擴散情形，可以看到 Case9 在火源及氣簾處網格切細網格為 Case8 網格一半後，在模擬火源熱傳遞現象、煙霧的擴散及氣簾速度，都有明顯的重現包括煙霧的熱浮力使得走道上層煙霧較多情形，以及切細網格氣簾速度變大後，阻煙效果也更為明顯一些，看到圖 4.36 Case9 梯間溫度曲線圖以及圖 4.37 Case9 走道溫度曲線圖，模型中各案例溫度測點曲線圖變化，明顯的看到小尺度與實驗溫度曲線趨勢接近，而大尺度溫度跳動也無較大的上下跳動，看到圖 4.38 Case9 能見度與光強度對照圖，模擬能見度上小尺度與全尺度皆有相同趨勢實驗光強度亦同。

研究也發現除了先前修正吸收係數是針對小尺度放大至全尺度，需要將吸收係數微調從 5 調至 0.1，但此案例針對氣簾網格(0.6 m × 1.6 m × 3.8 m)及火源附近

網格(2.2 m × 2.2 m × 3.8 m)切細從 0.2 m 至 0.1 m 如(圖 4.33 所示)，上述為全尺度大小小尺度則縮小十分之一，並觀察熱釋放率圖發現未調整吸收係數僅切細網格大小後如(圖 4.34 中的 a)，看到原先用 0.2 m 的模擬雖然下修吸收係數為穩態火源，但與細網格 0.1 m 相比較熱釋放率較為不穩定上下震盪較大，切細網格後的 Case9 熱釋放率相對更加穩定燃燒現象較久，除了驗證了切細網格後在火源的熱回饋現象更加明顯，也對火源熱傳遞上還有煙霧的重現有進一步重現。

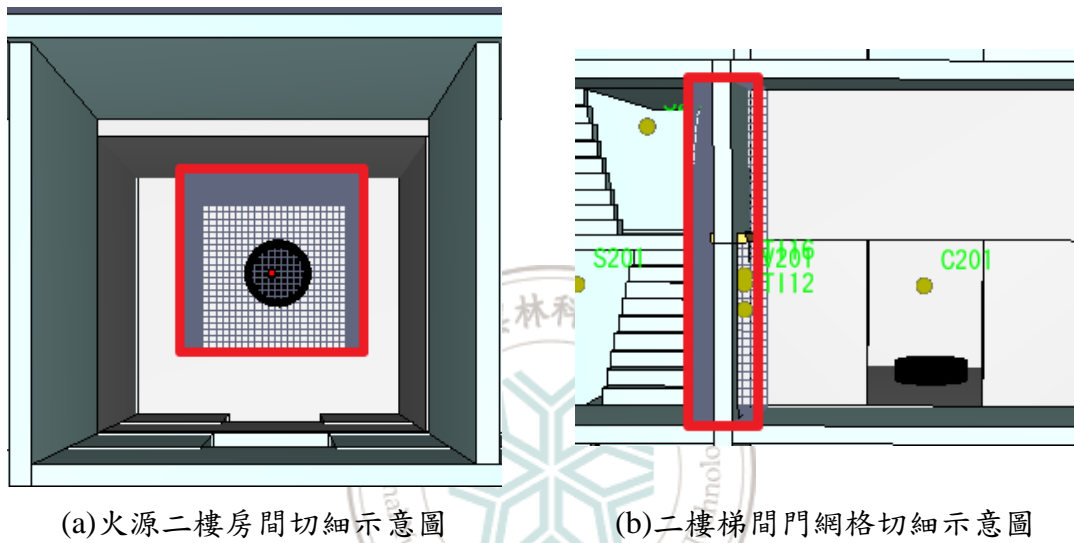


圖 4.33 Case9 氣簾及火源局部切細圖

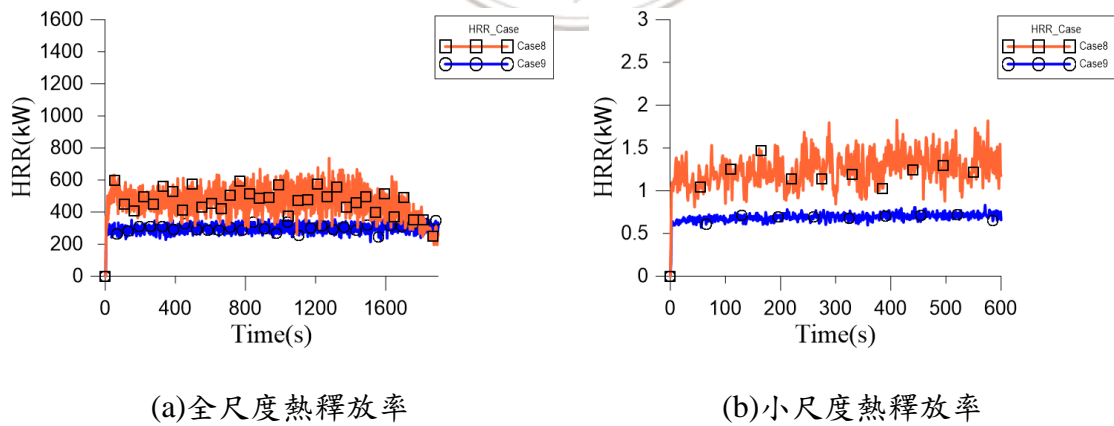
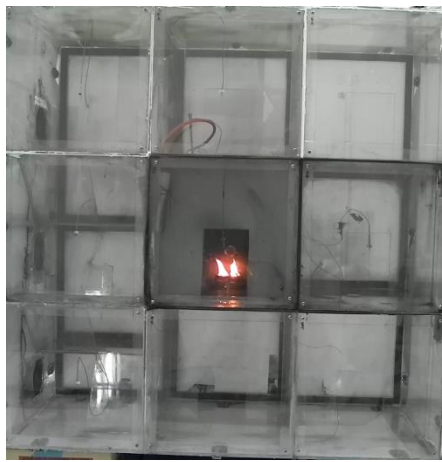


圖 4.34 Case8 及 Case9 熱釋放率比較圖



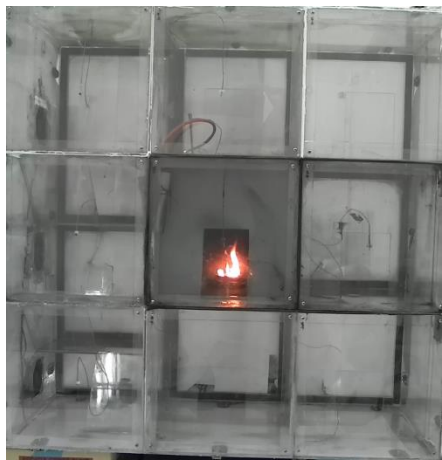
(a1) 實驗 5 秒



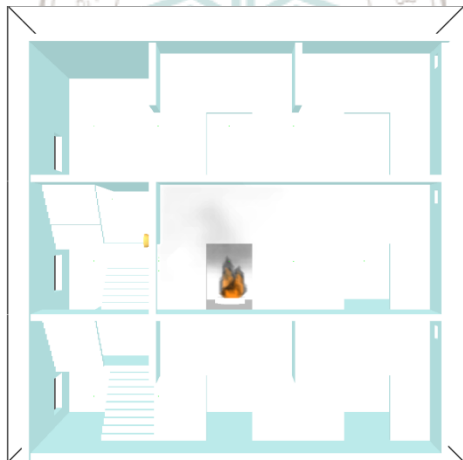
(b1) 小尺度 5 秒



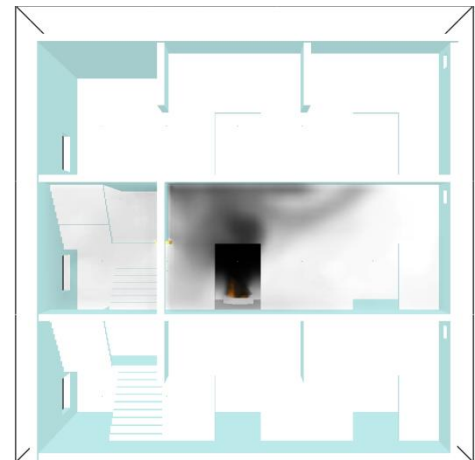
(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

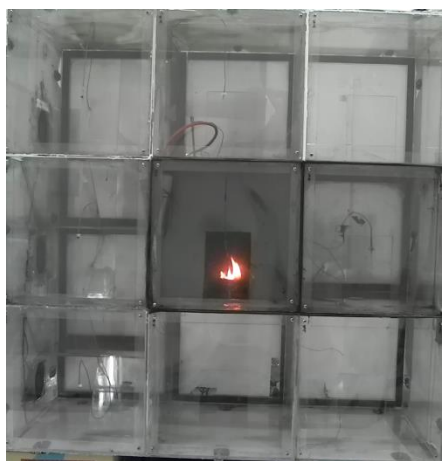


(b2) 小尺度 10 秒

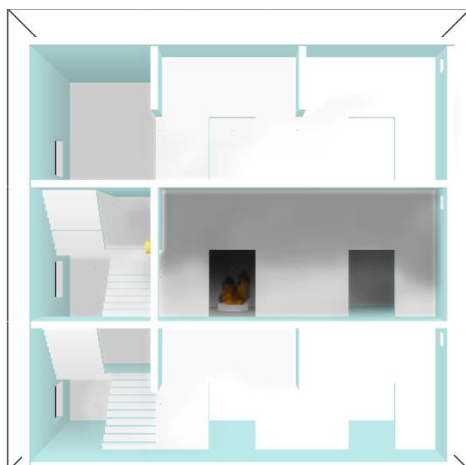


(c2) 全尺度 30 秒

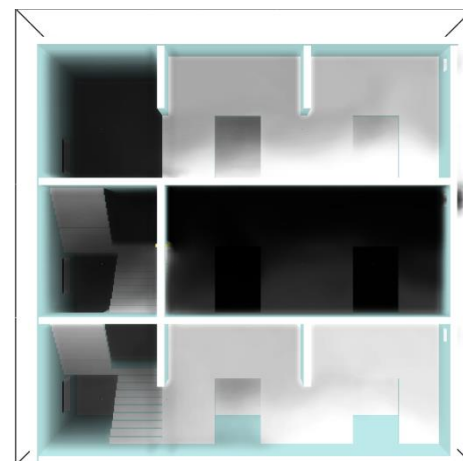
圖 4.35 Case9 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



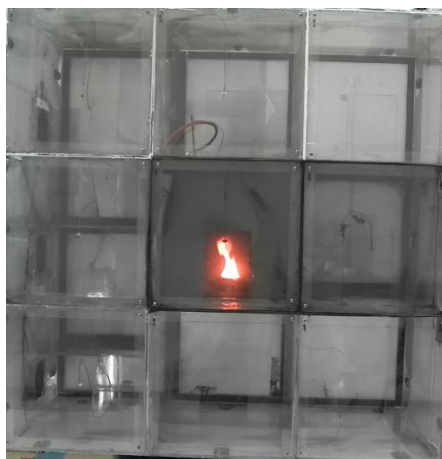
(a3) 實驗 100 秒



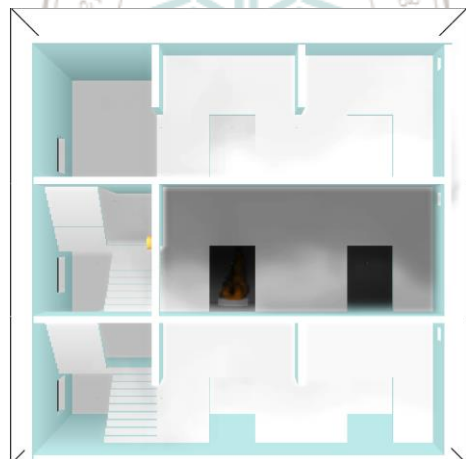
(b3) 小尺度 100 秒



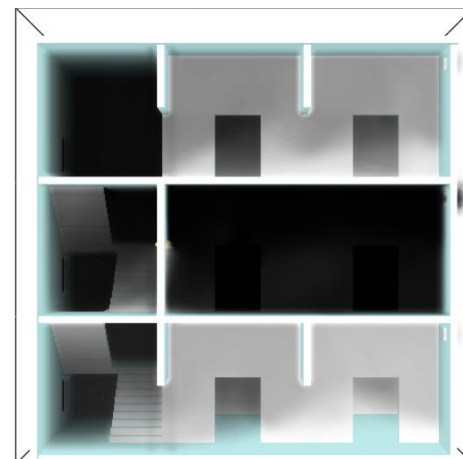
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

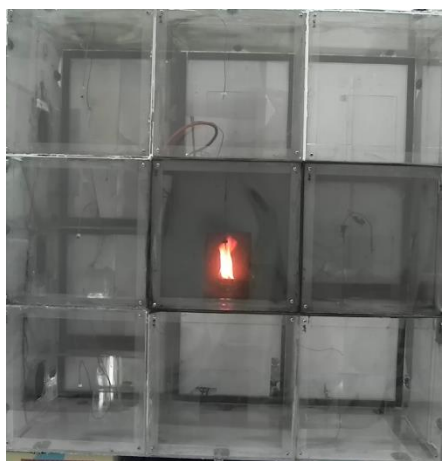


(b4) 小尺度 200 秒

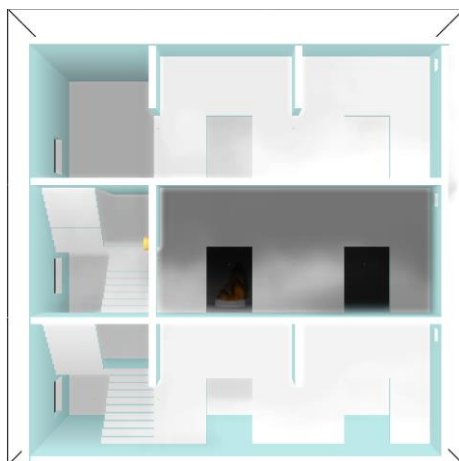


(c4) 全尺度 635 秒

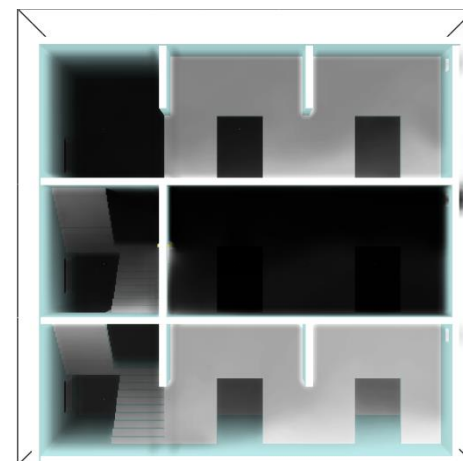
圖 4.35 Case9 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



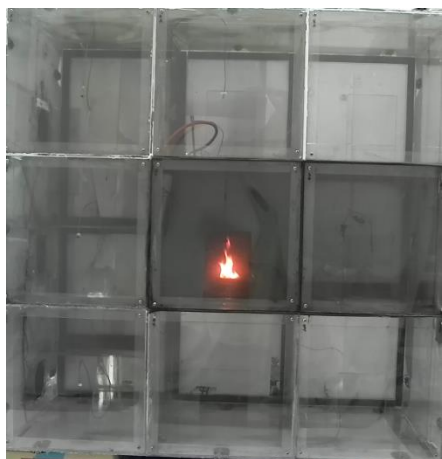
(a5) 實驗 300 秒



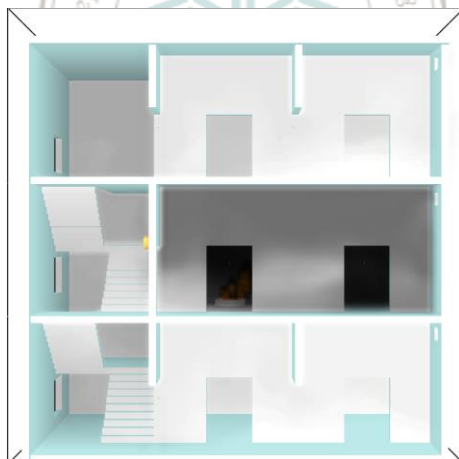
(b5) 小尺度 300 秒



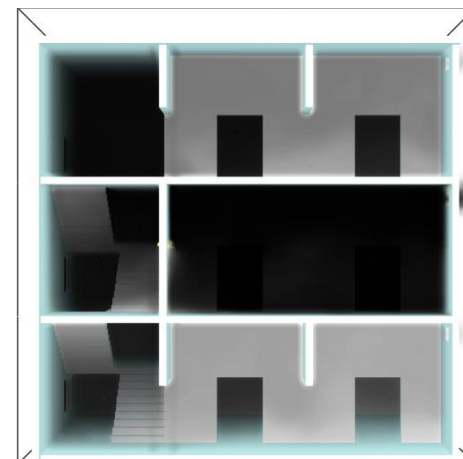
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

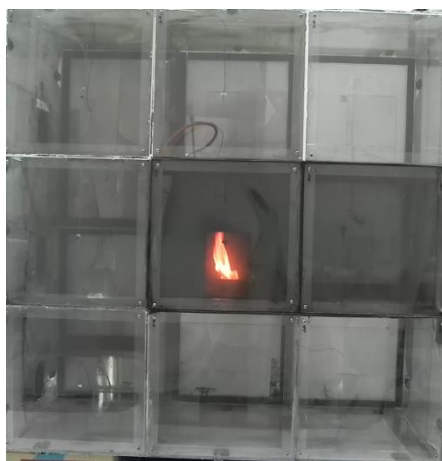


(b6) 小尺度 400 秒

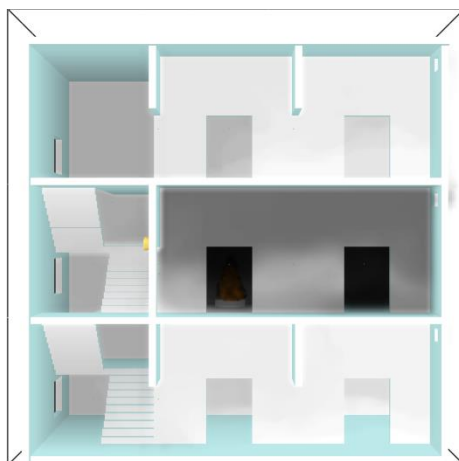


(c6) 全尺度 1265 秒

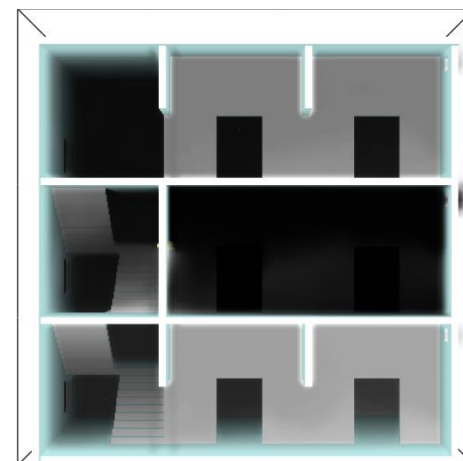
圖 4.35 Case9 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



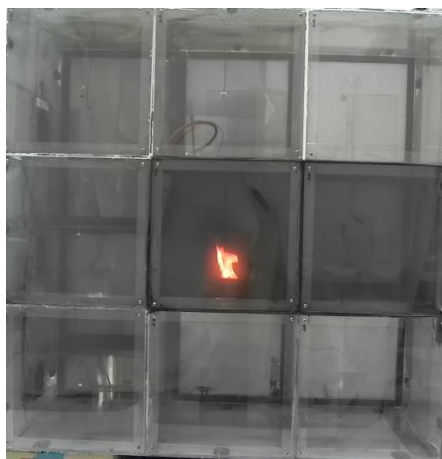
(a7) 實驗 500 秒



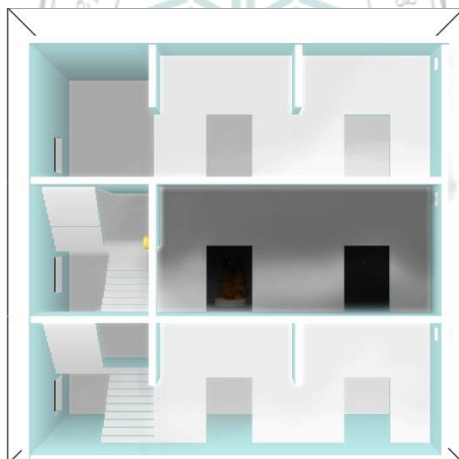
(b7) 小尺度 500 秒



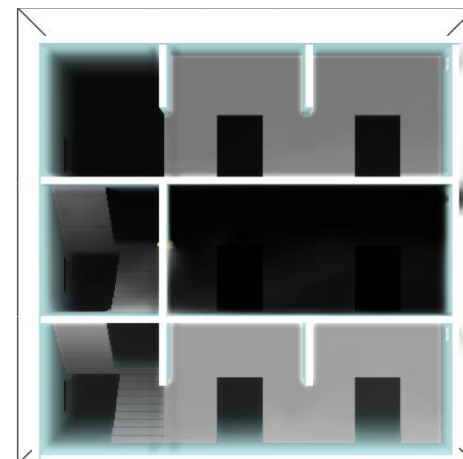
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

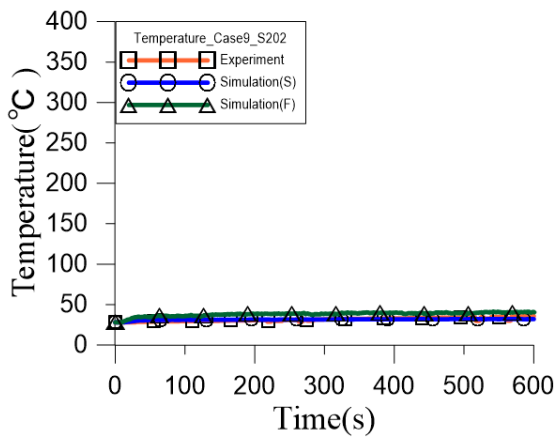


(b8) 小尺度 600 秒

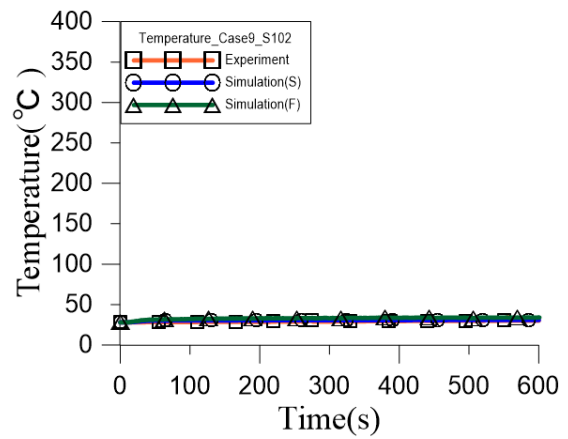


(c8) 全尺度 1900 秒

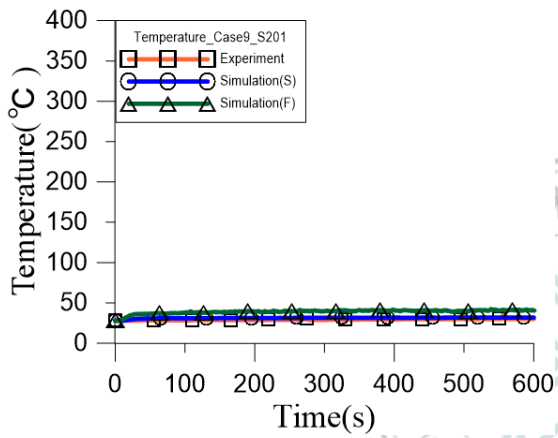
圖 4.35 Case9 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



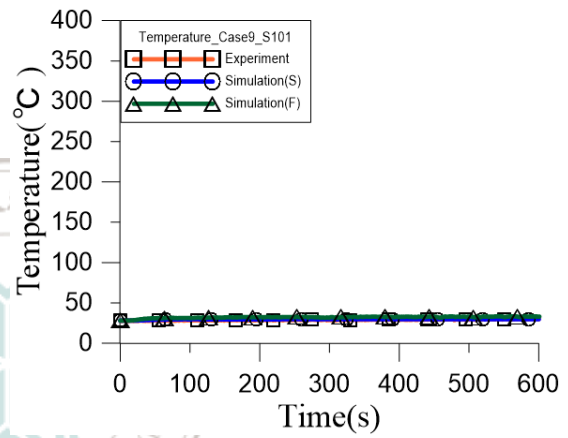
(k) S202



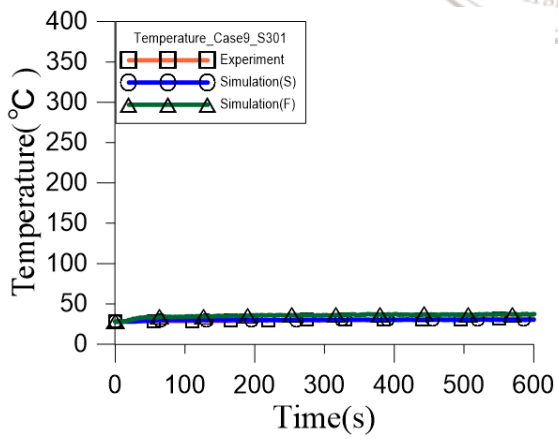
(l) S102



(m) S201

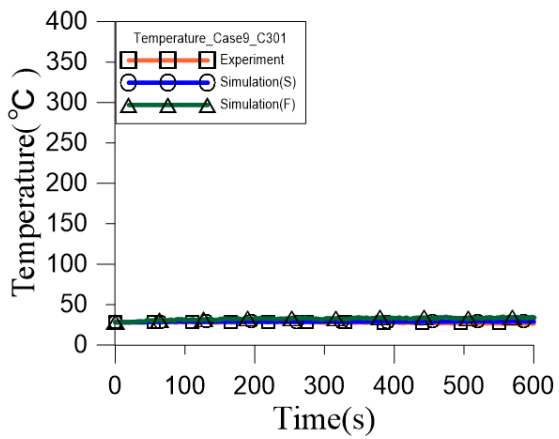


(n) S101

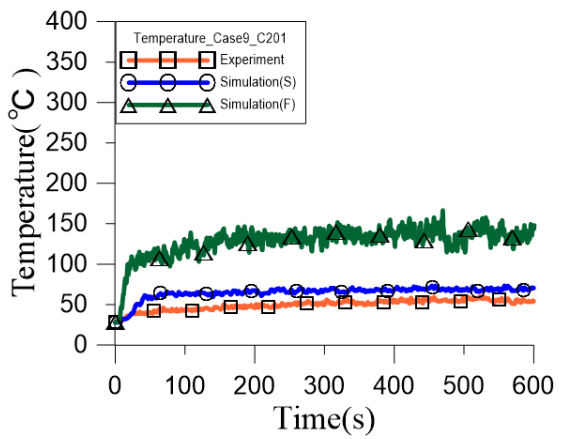


(o) S301

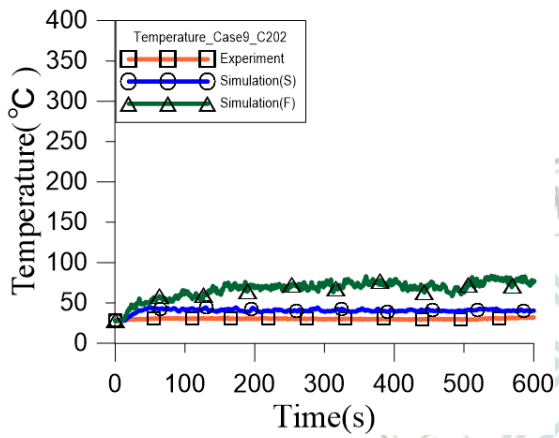
圖 4.36 Case9 梯間溫度曲線圖



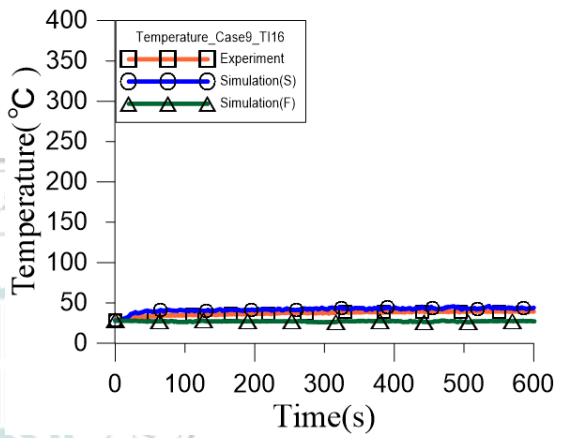
(p) C301



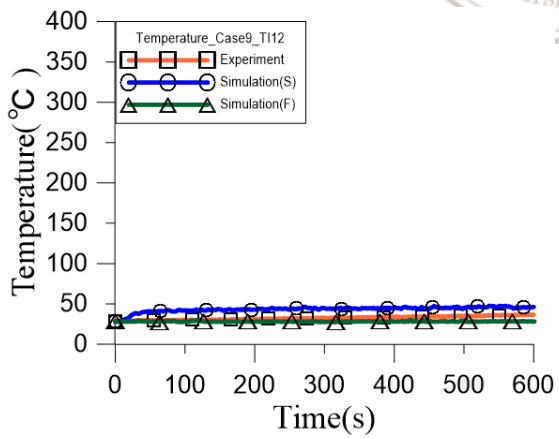
(q) C201



(r) C202

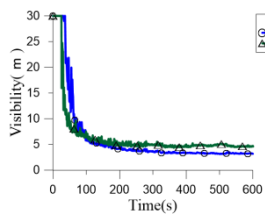


(s) TI16

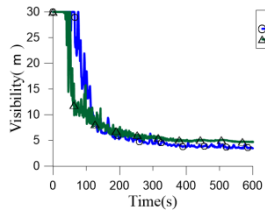


(t) TI12

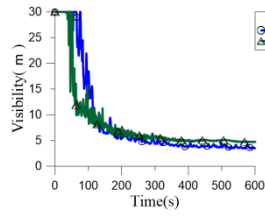
圖 4.37 Case9 走道溫度曲線圖



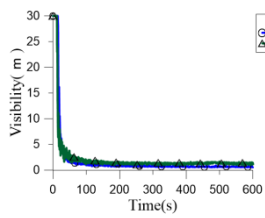
V301



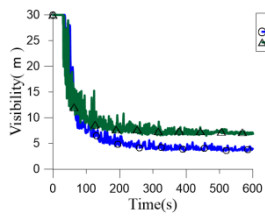
V302



V201

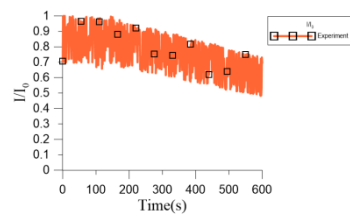


V202

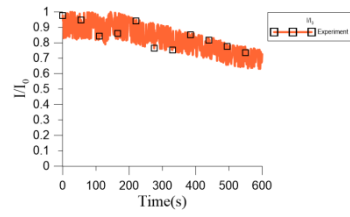


V101

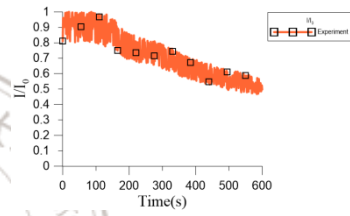
能見度(模擬)



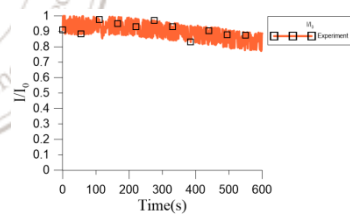
L301



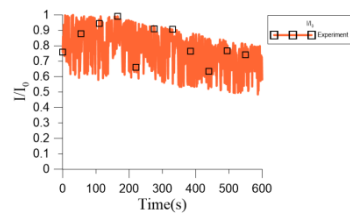
L302



L201



L202



L101

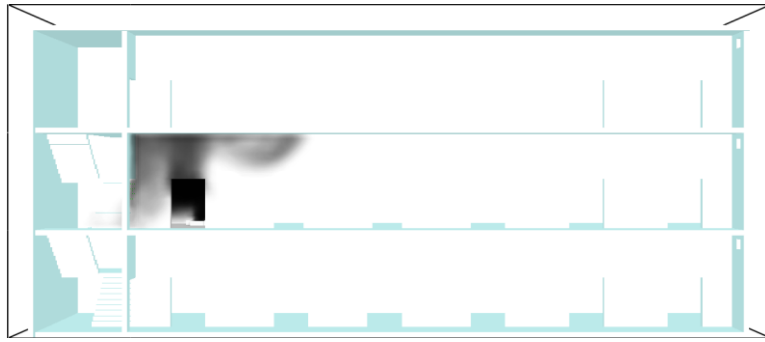
光強度(實驗)

圖 4.38 Case9 能見度與光強度對照圖

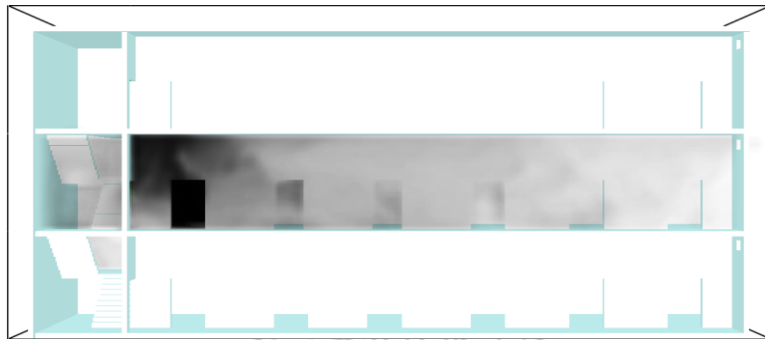
4.2 長走道氣簾阻煙探討

4.2.1 綜合煙流分析

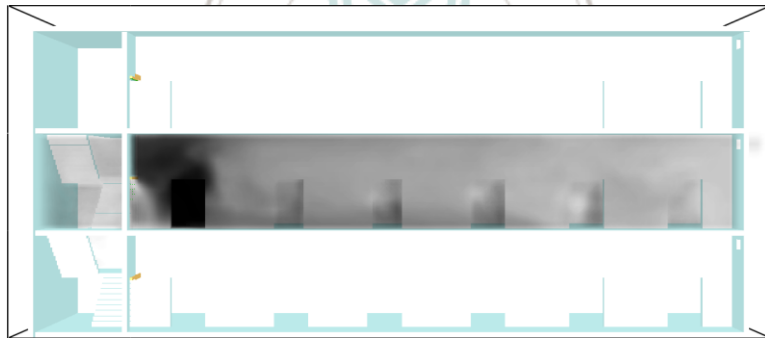
這裡我們將藉由後處理軟體 SmokeVIEW 動畫顯示案例之煙流圖同時,探討四種案例之煙流流動之情形,分別以煙流模擬秒數 40、120、200 及 600 秒下之煙流圖進行分析探討(見圖 4.34 至圖 4.37)。首先在模擬圖 4.34 時 40 秒看到自然排煙情形下的 Case1 煙流已從天花板蓄積沉降下來,並開始有煙流竄進梯間樓梯中,而 Case2、3 皆為單氣簾阻煙僅變換左、右側(梯間門內、外側)位置,我們看到兩個案例煙流擴散均,都為初期穩定煙層下沉並受到氣簾氣流影響而快速擴散開來,比自然排煙下的 Case1 煙流竄進梯間的情況稍微嚴重,而 Case4 雙邊氣簾皆開啟下,阻煙效果狀況好很多,且並無煙流竄進梯間;在模擬到 120 秒時,看到 Case1 自然排煙下煙流因為熱浮力關係,已經開始由梯間樓梯往上竄流且開始進入至三樓走道處,Case2、3 則是煙流持續竄流至梯間樓梯並往三樓流動,但是受到三樓梯間氣簾氣流阻擋而暫時無法擴散至三樓走道,同時也發現設置在梯間門左側(梯間門內側)的氣簾 Case2 基本上在二樓的阻煙功能已逐漸因為煙層的擴大而喪失,梯間門右側(梯間門外側)邊的氣簾則還看得到氣簾氣流的分層面且梯間煙霧也比 Case2 少許多,Case4 雙氣簾則維持良好的阻煙效果且無煙流進入至梯間;模擬在 200 秒時,Case1 煙流已充滿整個三樓走道並隨著模擬進行有往下沉積的情況,而在 Case2、3 煙霧充滿整個二、三樓梯間樓梯,Case2 煙流甚至蓄積並突破上下樓層氣簾阻煙氣流,而對比右側(梯間門外側)的 Case3 煙霧於梯間沒有比 Case2 來的多,且沒有明顯煙流流進至三樓走道;而在模擬秒數 600 時,Case1、2 明顯在二、三樓梯間及走道空間皆充滿煙氣,Case2 於三樓走道無 Case1 如此明顯,但一樓走道亦受到影響,Case3 走道煙氣仍然受到氣簾影響,有少許煙氣進入至三樓走道,Case4 仍維持良好阻煙效果。綜合以上我們看到 Case4 阻煙成效不錯且梯間都無煙流擴散進入,Case3 雖然有煙流進入梯間,但無明顯進一步擴散至上層走道,這對於高樓層且尚未逃生的人們去爭取部分逃生或等待救援時間。



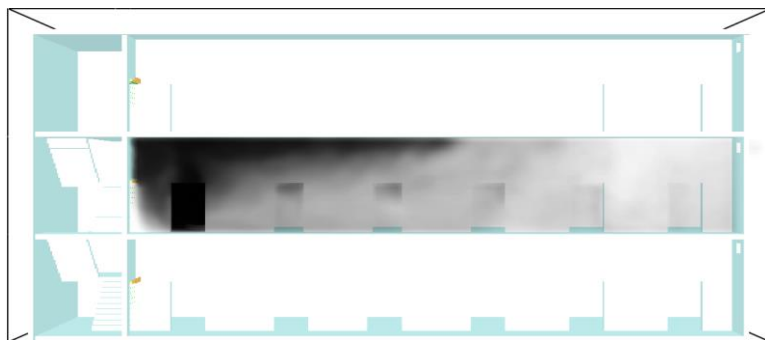
(a) Case1 無氣簾



(b) Case2 左側

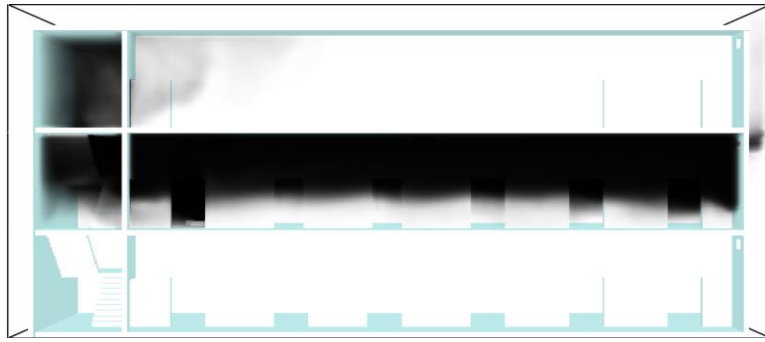


(c) Case3 右側

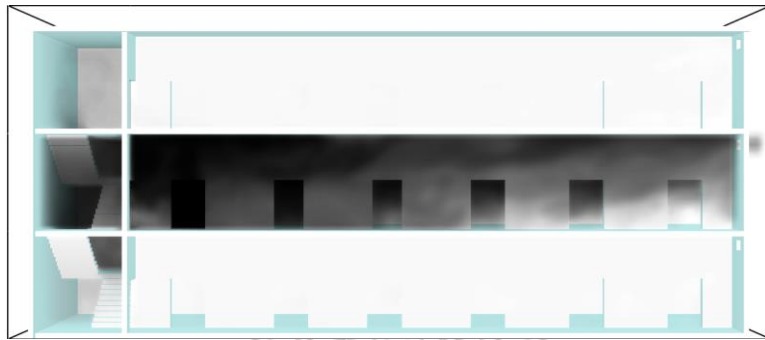


(d) Case4 雙氣簾

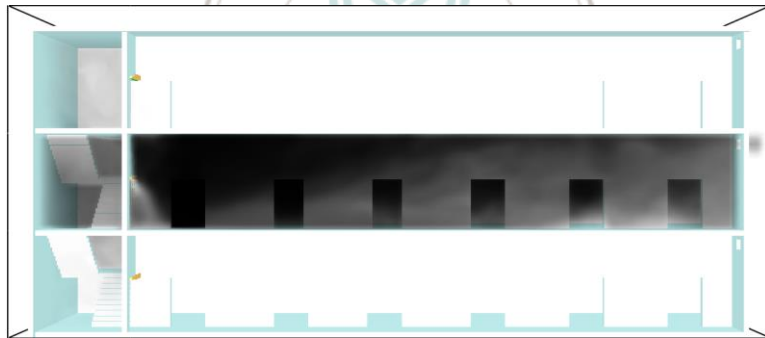
圖 4.39 各案例 40 秒時之煙流圖



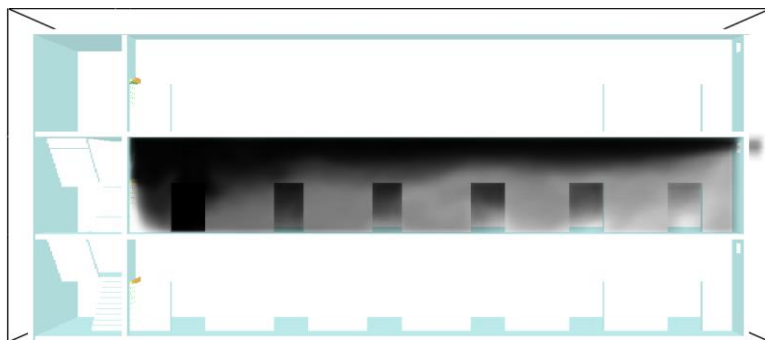
(a) Case1 無氣簾



(b) Case2 左側

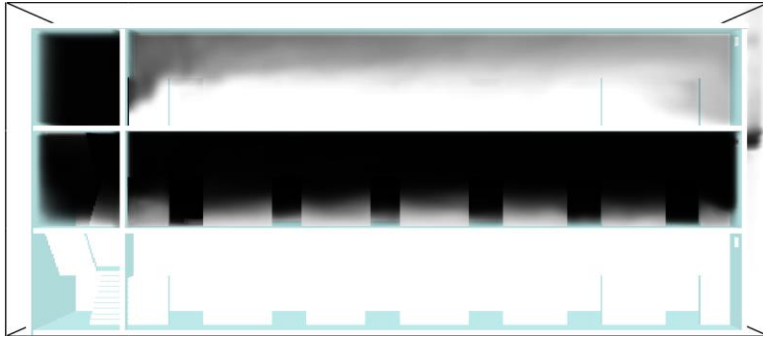


(c) Case3 右側



(d) Case4 雙氣簾

圖 4.40 各案例 120 秒時之煙流圖



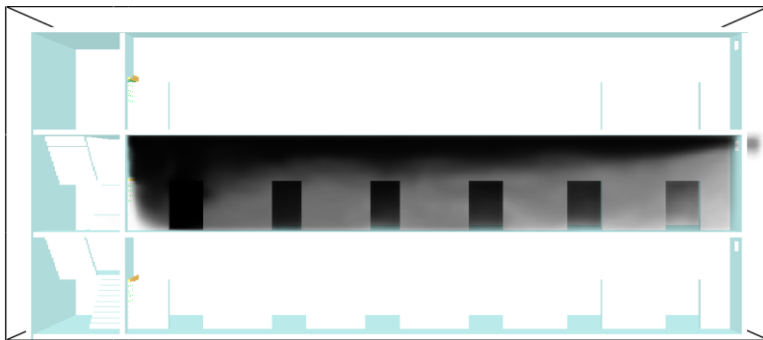
(a) Case1 無氣簾



(b) Case2 左側

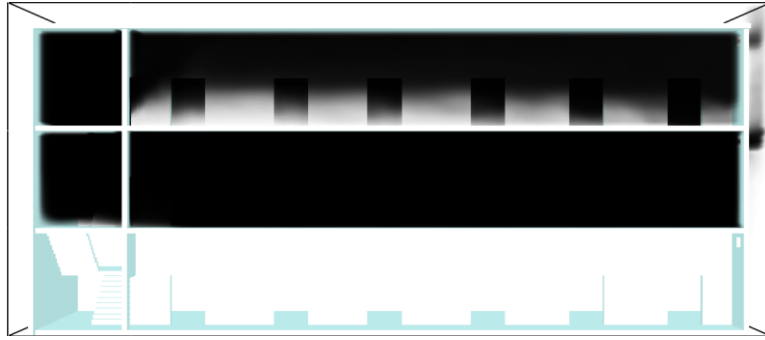


(c) Case3 右側



(d) Case4 雙氣簾

圖 4.41 各案例 200 秒時之煙流圖



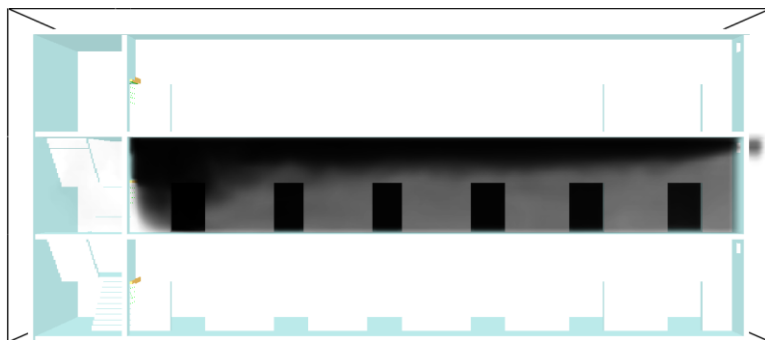
(a) Case1 無氣簾



(b) Case2 左側



(c) Case3 右側



(d) Case4 雙氣簾

圖 4.42 各案例 600 秒時之煙流圖

4.2.2 綜合溫度分析

依據前述章節 2.1.6 火災危害，說明火災場景各種危害因子的探討，其中較重要的因子之一即是溫度，一般人體皮膚若暴露在高於溫度 66°C (150°F) 的環境下或受到輻射熱 3 W/cm^2 以上時，僅須 1 秒即可造成燒傷，這裡我們將藉由 SmokeVIEW 後處理軟體，並由我們情境設定之溫度橫切面 ($Y=0.8\text{m}$)，因為溫度剖面圖於 100 秒後大似相同，所以此處吾人將針對火源初期燃燒第 100 秒和火災燃燒至 600 秒時做探討 (見圖 4.38 至圖 4.39)。

首先看到在溫度橫切面 ($Y=0.8\text{m}$) 上 (見圖 4.38)，初期濃煙從火源房間竄出使得房間外走道溫度很快超過人體所能忍受之 66°C ，而後續煙流便因為熱浮力往上衝隨即下沉，並於天花板左右延伸擴散開來，在燃燒第 100 秒時，Case1 煙層溫度因為濃煙已穿越梯間門並往樓梯上方擴散，而在溫度切面上看來若以基準線 66°C 來看，此時樓梯處已經超過危害溫度，再者以設置安裝單一氣簾的情況來看，同樣如前述煙流分析所述，初期高溫煙層受到氣樓影響在走道擴散開來，故在溫度於走廊上表現也是不甚理想，當然在梯間門口處也因為氣簾對於火場有供氣的現象，使得溫度變化上較大，但是此時溫度於梯間樓梯皆未超過危害溫度，因此對於開啟氣簾仍對於有延緩煙流進入至梯間樓梯，同時注意到在 Case3 氣簾設置在右側處(即梯間門內、外側)，明顯的因為氣簾氣流有一分界處，仍維持逃生門口處溫度不超過危害溫度，而 Case4 雙氣簾條件下，同樣可以維持逃生門口溫度並不超過危害溫度；在 600 秒時 (圖 4.39) 我們看到 Case1 基本上梯間樓梯煙流溫度皆超過 66°C ，而 Case2 雖未使梯間樓梯超過危害溫度，但是於逃生門因為氣簾阻煙失效而在人員高度 1.6 m 都超過危害溫度，Case3、4 則是相同在逃生門處維持一定溫度且並未超過危害溫度，幫助人員往梯間樓梯逃生，但是此案例火源房間是靠近梯間處，故在走道上溫度於此四個案例中都明顯較高，故人員若是在右邊房間可能往梯間逃生有一定困難。

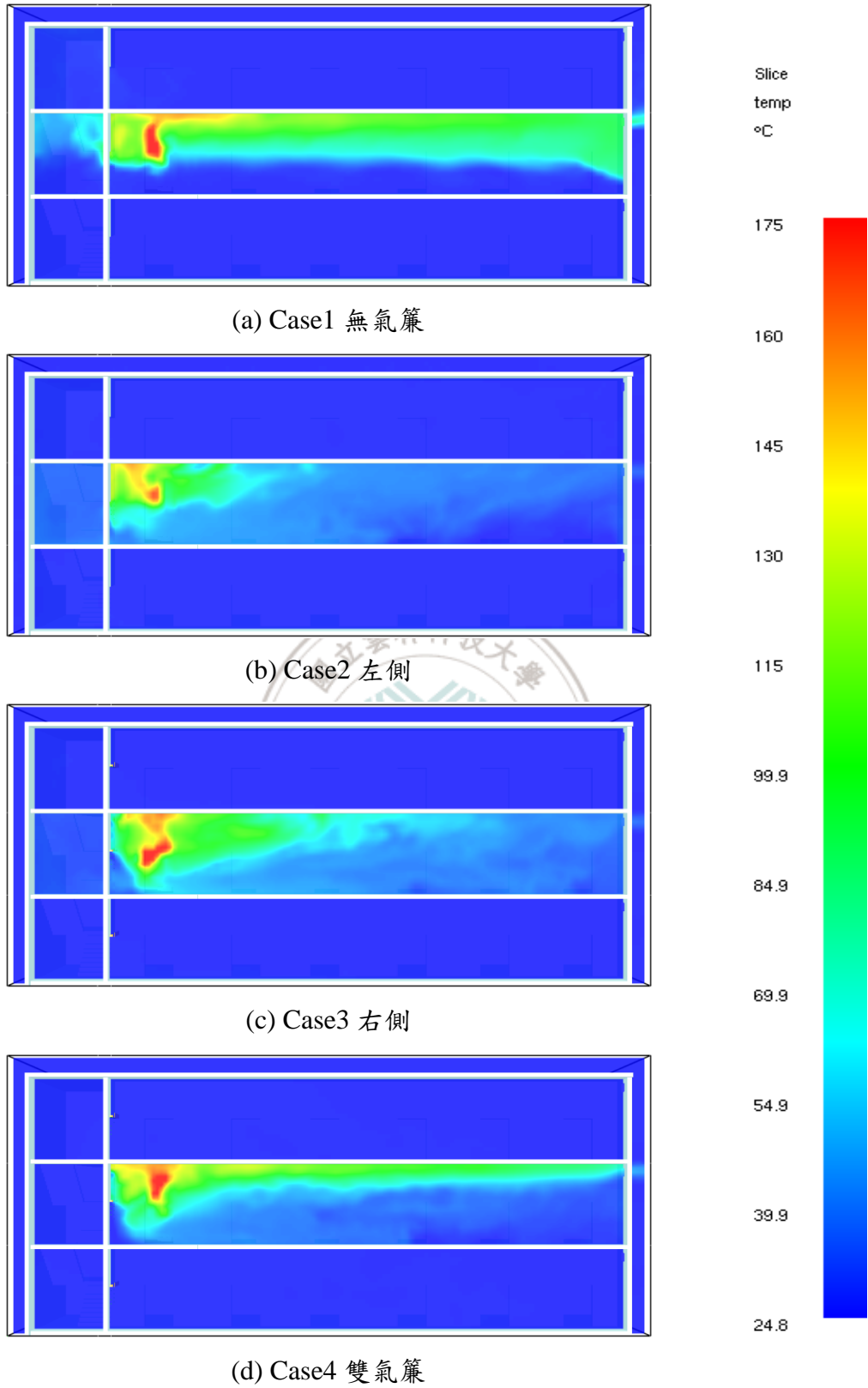


圖 4.43 燃燒 100 秒溫度切面 ($Y=0.8\text{m}$)

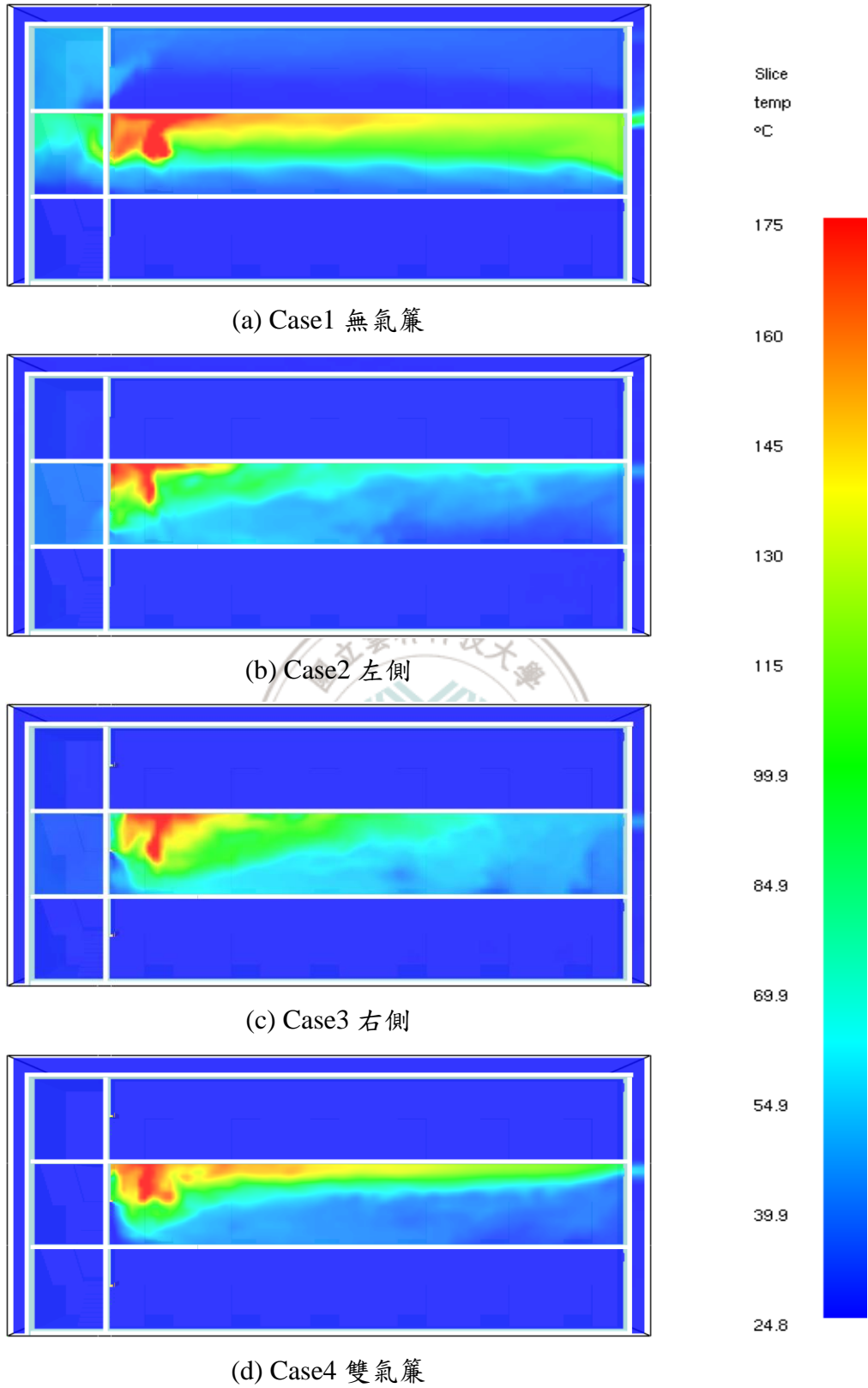


圖 4.44 燃燒 600 秒溫度切面 ($Y=0.8\text{m}$)

為了探討火災於門口之溫度是否在啟動阻煙氣簾後，有明顯降低溫度並且對於人員逃生是否有受到影響，將會在門口中間處高度在 120 cm 至 180 cm 每間隔 20 cm 設置一個測點，除於門口中間處設置一連串熱電偶，於其左右各 30cm 處也設置同樣熱電偶共 12 個，這裡我們將會從 12 個熱電偶選擇出現溫度最高之熱電偶數據，當做門口處出現最高溫度代號以 T_{ent} 來做後續探討。

T_{ent} 為二樓梯間門處測得溫度最高之測點，如圖 4.45 各案例測點最大溫度曲線圖 (T_{ent}) 中於燃燒 600 秒溫度曲線圖，若以火場危害溫度基準線 66°C 來看，明顯的在 Case1 及 Case2 都已經在火災初始階段就超過此基準，且在 30 至 50 秒內快速標高至上百度高溫，且隨著火源燃燒進行，有愈來愈高的趨勢，而在 Case3 氣簾設置在右側處，很明顯的比 Case2 同樣為單一氣簾僅安裝位置不同，在梯間門口處溫度落差很大，推測原因為左側氣簾因氣流無法第一時間就阻擋煙流擴散至梯間門口，而右側氣簾則是氣流與煙氣有明顯的分界線，阻止煙霧進一步擴散至梯間門口，而形成此溫度落差，Case4 雙氣簾於溫度梯間走道處其溫度幾乎沒什麼變化，多了一道氣簾更加阻止煙霧的擴散，這也是又優於 Case3 的原因之一。

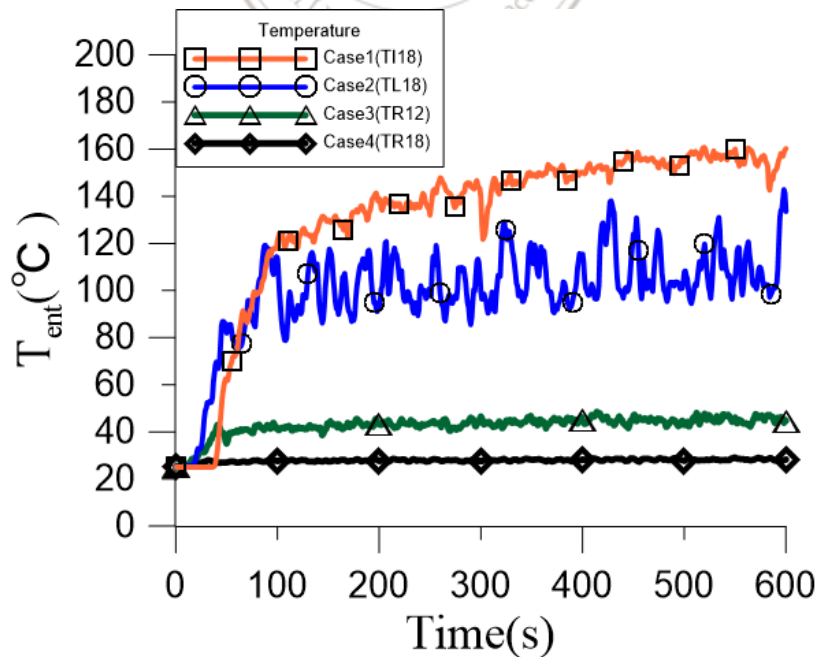


圖 4.45 各案例測點最大溫度曲線圖 (T_{ent})

4.2.3 綜合能見度分析

依據前述 2.1.6 介紹火災的危害，能見度為火場重要的指標之一，詳細能見度對於人員影響可參照表 2.5，表中提及在火場中人員能見度小於 3 m 時人員必須摸黑逃生，故本節將以能見度 3 m 為我們比較的基準值，並詳細探討四種不同模擬情境下，於橫切面 $Y=0.8\text{m}$ 處來綜合比較能見度之變化。

在模擬秒數第 100 秒時（見圖 4.41），Case1 自然排煙條件下，此時煙流已擴散至整個走道梯間，甚至開始往上竄升，此時在走道處於人員的特徵高度 1.5 m 處，其能見度基本已低於 3 m，走道上人員的起身逃身已看不清楚前方需匍匐逃生，而在二樓梯間走道也是低於 3 m，Case2 左側(梯間門內側)設置氣簾下，如前述所述穩定煙層受到氣簾氣流的影響，果然在於剖面圖上能見度於火源房間外走道能見度都小於 3 m，這對在火源房間右側的人員要往逃生梯，需要摸黑行動逃生，而梯間因為有氣簾阻擋部分煙霧，能見度在對於人員逃生無太大影響，Case3 及 Case4 能見度情況也與 Case2 相似，皆在走道上能見度不佳，人員無法清楚周邊狀況，而 Case4 於梯間能見度幾乎不受影響；在模擬第 600 秒時（見圖 4.42），Case1 已於濃煙擴散下，二、三樓走道及梯間幾乎都佈滿濃煙，且能見度皆低於基準值，Case2 及 Case3 則是在濃煙持續的擴大下，整個走道都低於基準值，而梯間則維持 5 至 7 m 之能見度，顯見氣簾開啟還是有對梯間能見度有幫助，使得人們在往下逃生可以不需摸黑逃生，同時在 Case2 設置在左側氣簾(梯間門內側)於逃生門能見度低於我們基準值，已無法分清逃生門方向，相對 Case3 設置在右側氣簾則能清晰分辨出逃生門位置，Case4 則是又比 Case3 改善許多，且在梯間能見度也無明顯減少。

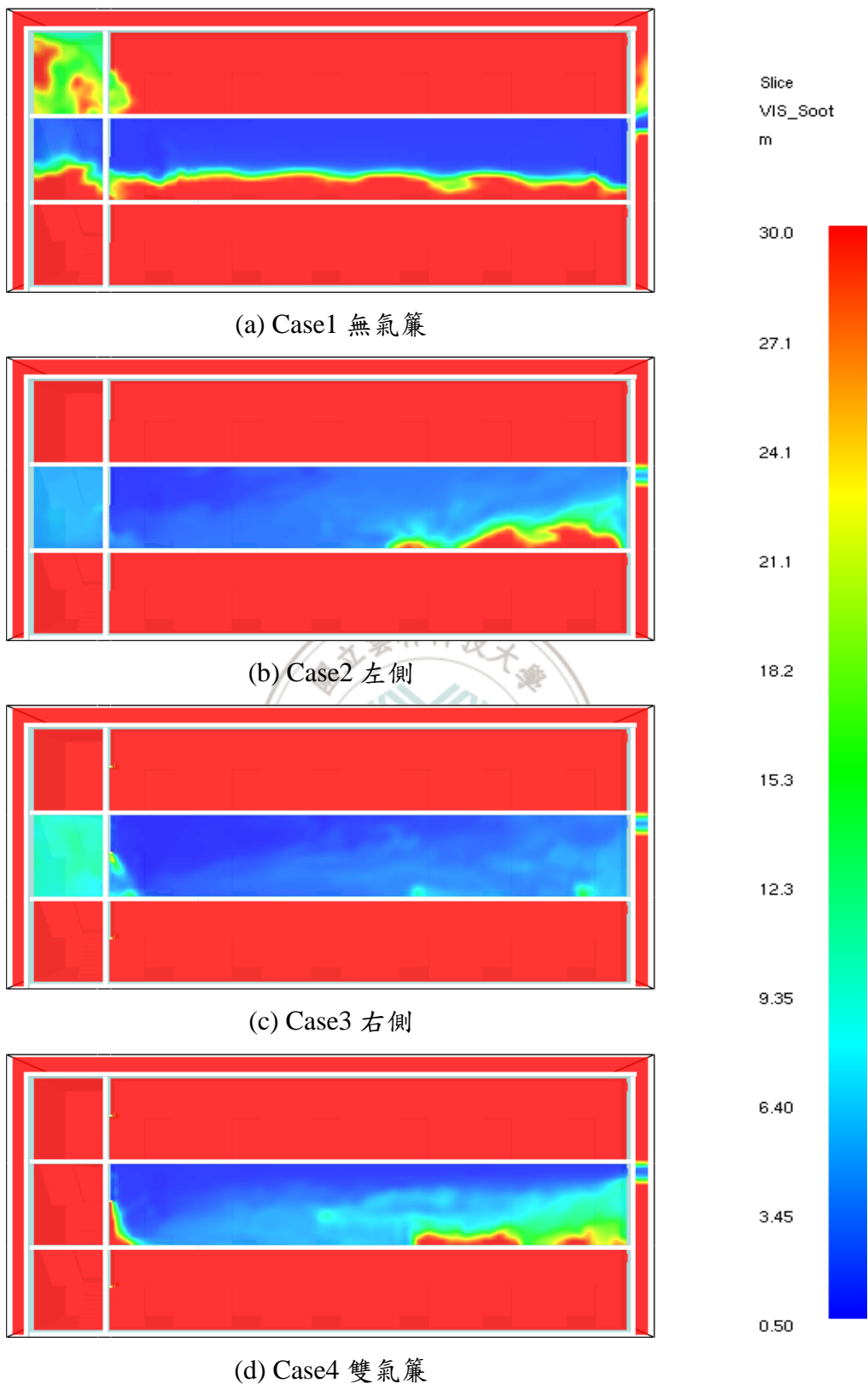


圖 4.46 燃燒 100 秒之溫度圖

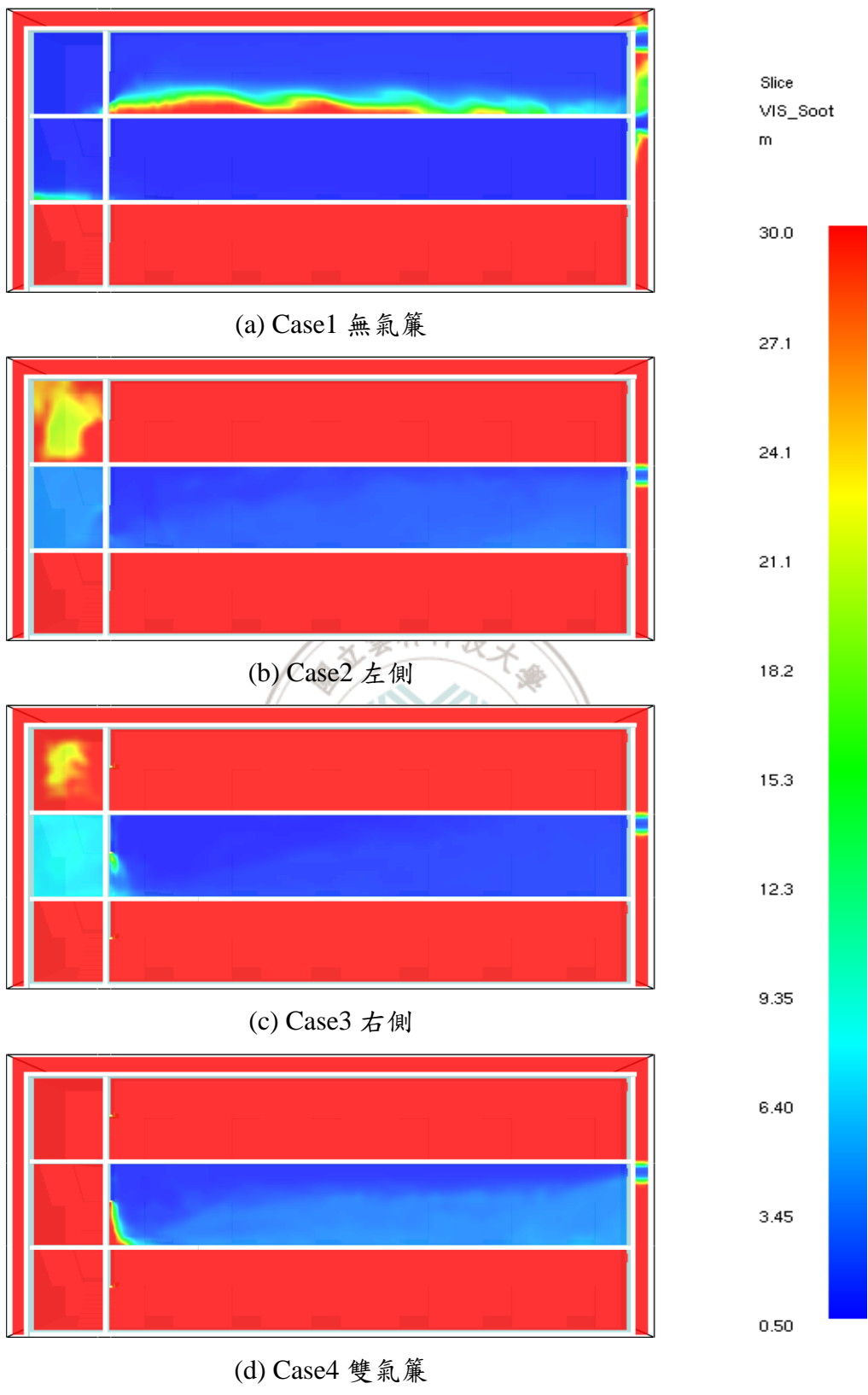


圖 4.47 燃燒 600 秒之溫度圖

下圖一樣針對逃生門之能見度分析能見度，測點設置於逃生門中間並於高度 1.5 m 處，可以清楚看到其結果基本與前述剖面圖說明一致，若以基準值 3 m 來比較，除了 Case4 雙氣簾案例下能見度初始至 600 秒無明顯變化，各案例皆在 30 至 50 秒有明顯的大幅下降，在約略 80 秒後 Case1 及 Case2 基本上已在分辨逃生門位置有問題，Case3 則是在逃生門的辨識上可以明顯知道位置，但因此案例為模擬最遭之狀況，因走道皆低於基準值故無太大幫助，若火源距離逃生門較遠且兩邊皆有逃生門並設置氣簾條件下，或許對於人們在尋找逃生門逃生進而有所幫助。

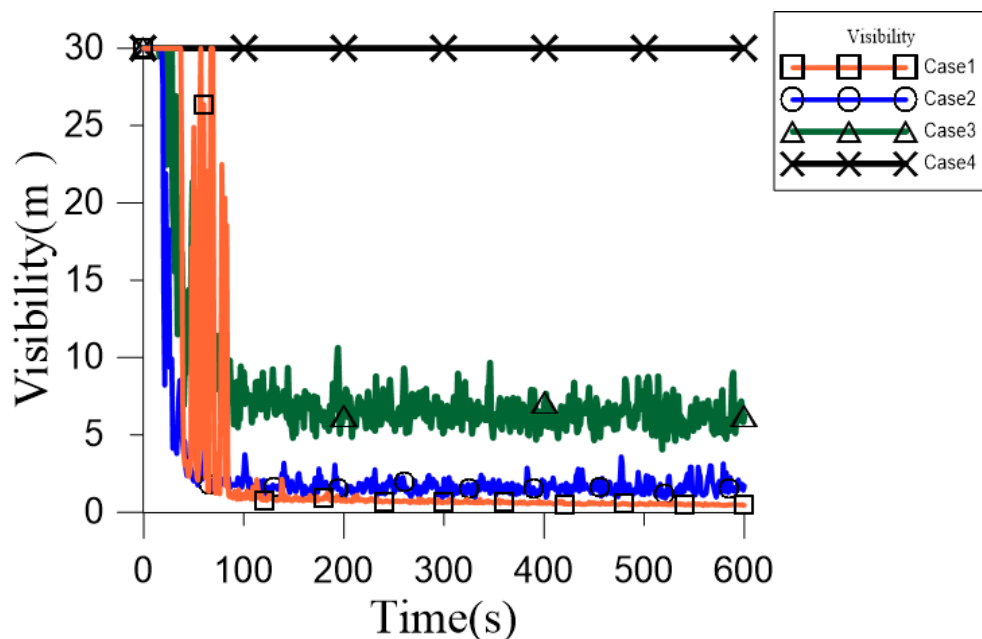


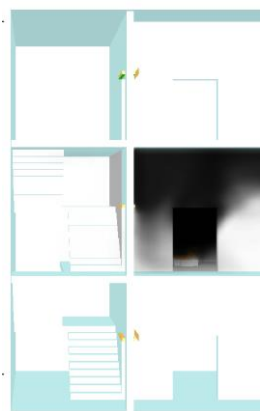
圖 4.48 各案例能見度曲線圖

4.2.4 氣簾臨界速度分析

將針對不同氣簾風速進行探討，前述案例中是以最大風速 17 m/s 進行氣簾風速設置，此為不會影響人員逃生之最大值，但是此風速並不符合操作成本且對老弱殘疾是否在逃生上有困難，因此將找尋一風速值設定區間，既能有效阻止煙流進入至梯間，且維持逃生梯的溫度及能見度在安全範圍內，以利人員逃生，並且在往後工程設計上能提供實際之參考，以兼具成本考量又達到實際阻煙之效果。

在實作時吾人以此長走道模型為案例模型，挑選上述四種案例中表現最佳的

雙氣簾案例 Case4 當做我們氣簾臨界風速之探討，經過多組的風速調整以及修正後發現，在氣簾風速為 4 m/s 時即對於梯間有良好阻煙效果，然而在氣簾速度下降至 3 m/s 時，則開始會有煙霧進入梯間，由於煙霧進入量不多，故此處僅比較煙流及能見度切面如圖 4.49 氣簾風速調整後煙流比較圖(左側為 3 m/s 右側為 4 m/s)及圖 4.45，明顯看出在 100 秒時 3 m/s 風速氣簾已有煙氣進入梯間，且隨時間進行有愈來愈多情況在 300 秒時擴散至三樓梯間處。至於能見度切面（見圖 4.45），此處這裡僅顯示速度 3 m/s 在 300 和 600 秒之情形，其餘秒數以及 4m/s 因為無明顯煙流進入梯間故 300 秒時能見度在二樓梯間有下降情形，在 600 秒模擬結束前仍維持相同能見度，雖不會造成人員逃生上問題，但保守起見本研究將採 4 m/s 當作後續高樓建築氣簾風速設置參數之參考。



(a)50 秒



(b)50 秒

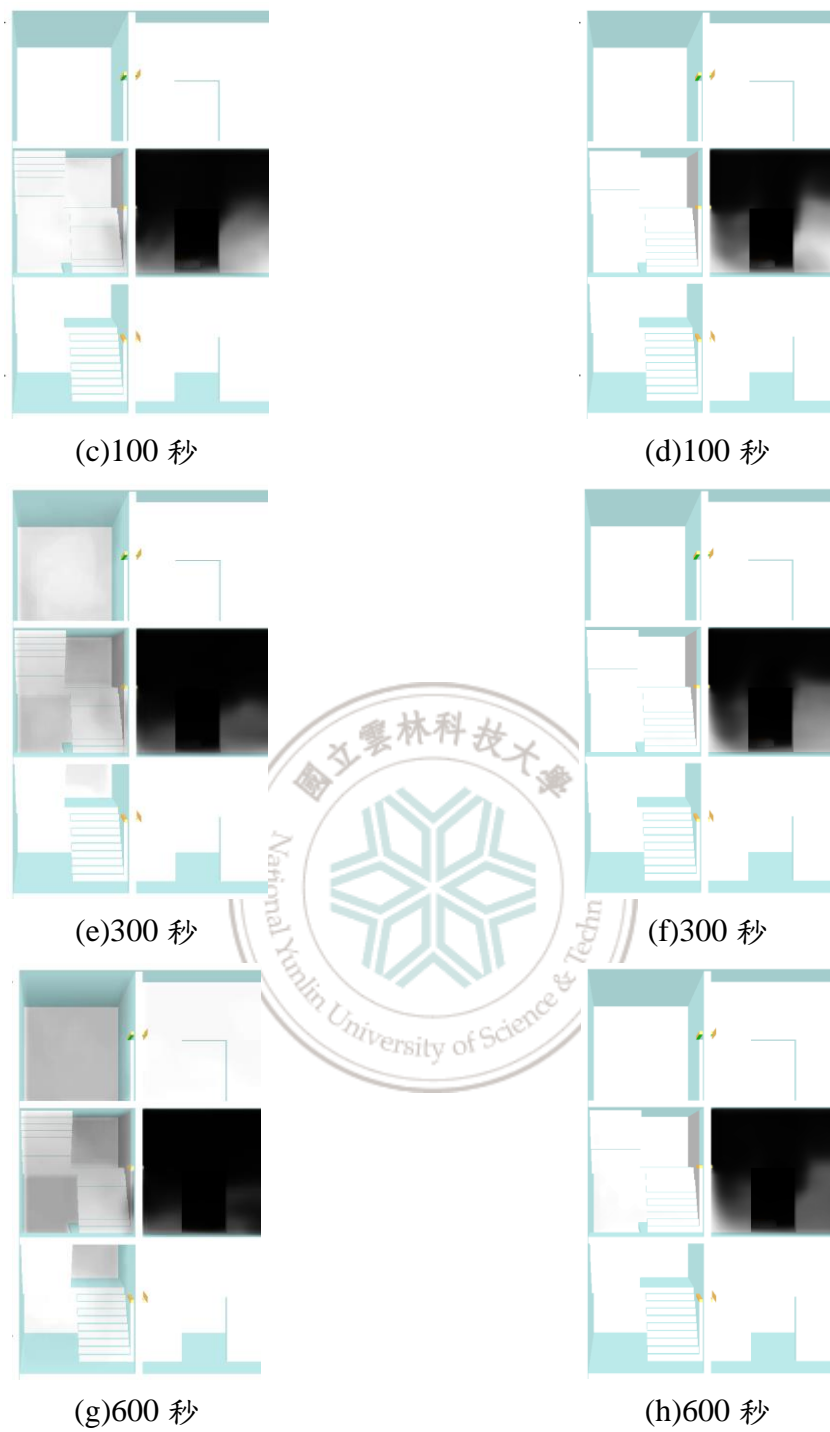


圖 4.49 氣簾風速調整後煙流比較圖(左側為 3 m/s 右側為 4 m/s)

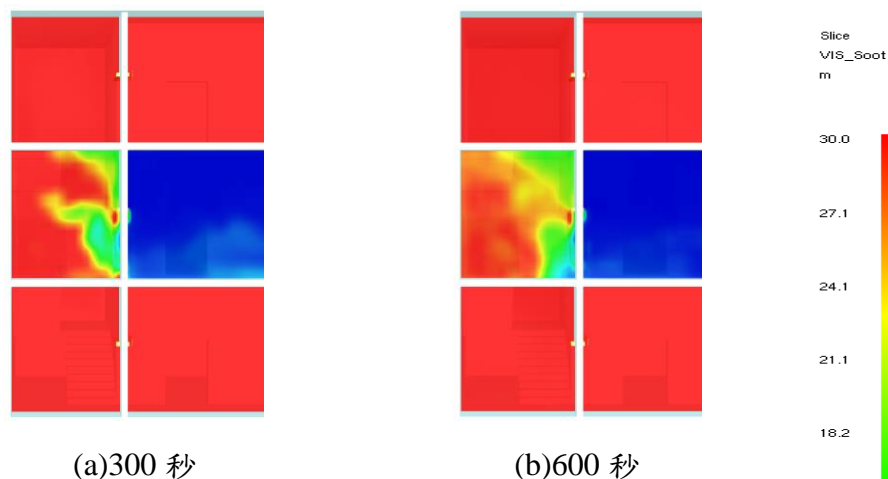


圖 4.50 氣簾速度 3 m/s 下梯間能見度切面圖



4.3 高樓層建築火災探討

本案例情境主要為針對高樓火災，起火層於七樓火源類型為油類火災，燃料為 10 公升煤油，於教學教室操縱火並延燒相關課桌椅，教學大樓房間內窗戶均未對外開啟，同時假設人員逃生時過於緊急故房門均為打開狀態，僅走道兩端窗戶開啟，詳細案例介紹如 3.5 節高樓建築案例情境介紹，將有介紹關於模型、火源設定及網格.....等之設定，如表 4.2 高樓建築情境設定，阻煙氣簾設置之條件將為前一小節對於長走道氣簾設置之最佳條件「雙氣簾」。為使於比較，Case1 為自然排煙且未設置阻煙策略，Case 2 及 Case 3 則是在整棟大樓往梯間之逃生門處設置雙氣簾，且每樓層逃生門皆設置，而兩個案例差別僅差別在於 Case 2 氣簾為實驗

模擬初期至結束皆為開啟狀態，Case 3 則較符合貼近真實情況下，並於各房間之中間點設置的偵煙器，因為火災燃燒產生之濃煙使得偵煙器作動，進而人員或防火系統啟動阻煙氣簾，延遲 5 秒則是保守估計其作動時間。

表 4.2 高樓建築情境設定

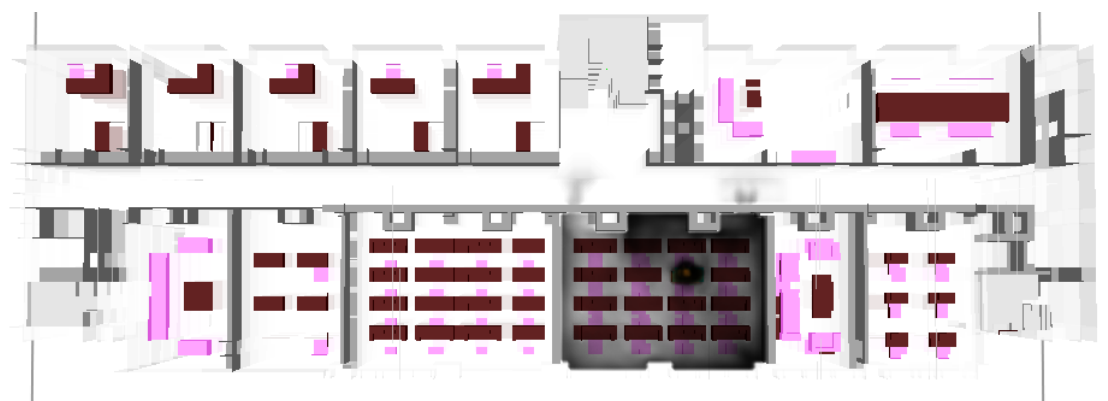
項目 案例	火源位置	氣簾速度	氣簾設置位置	附註
Case 1		無	無	自然排煙
Case 2	7 樓教學教室	17 m/s	走道兩旁(梯間門內、外側)	起火房間偵煙器作動，於五秒後開啟氣簾
Case 3		4 m/s	走道兩旁(梯間門內、外側)	起火房間偵煙器作動，於五秒後開啟氣簾，並於中間樓梯豎井頂樓打開排煙井

4.3.1 Case1 案例分析

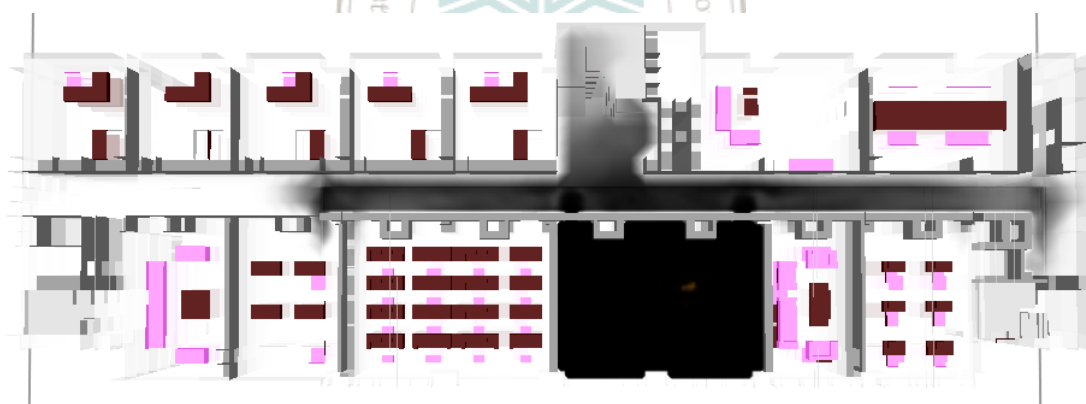
4.3.1.1 煙流分析

煙流模擬結果如圖 4.46 所示，當七樓教學教室煤油開始起火延燒，火勢的很快擴散開來，同時也伴隨濃煙的產生，在圖 4.46 (a)初期燃燒 50 秒情況，可看出煙霧擴散至整個教學教室，並開始往外擴散開來，圖 4.46 (b)燃燒 90 秒後煙流開始往右側梯間樓梯以及走道中間的樓梯豎井竄升，當火災模擬至 280 秒時情況如圖 4.46 (c)此時七樓左側逃生梯開始有煙流進入，而在煙流觀察中也發現到煙霧的流動主要並不是沿著兩旁梯間樓梯往上竄升，主要為走道中間樓梯豎井，因為高溫煙霧的熱浮力以及煙囪效應的助長下，煙霧迅速的往豎井上竄，並由各樓層間

走道擴散至梯間，而推測起火層煙霧未想像快速的往梯間樓梯竄升，主要原因也是中間樓梯豎井，提供了更好的擴散條件，使的起火層煙層沒有蓄積的這麼快，圖 4.52 Case1 模擬至 600 秒之模型前視圖，看到基本在模擬起火 10 分鐘後起火層七樓上方樓層，基本上都已經佈滿煙霧，對於無任何防煙策略下，在有限的逃生時間內對於人員的逃生是相當不利。



(a)50 秒



(b)90 秒



(c) 280 秒

圖 4.51 Case1 七樓起火層燃燒情況

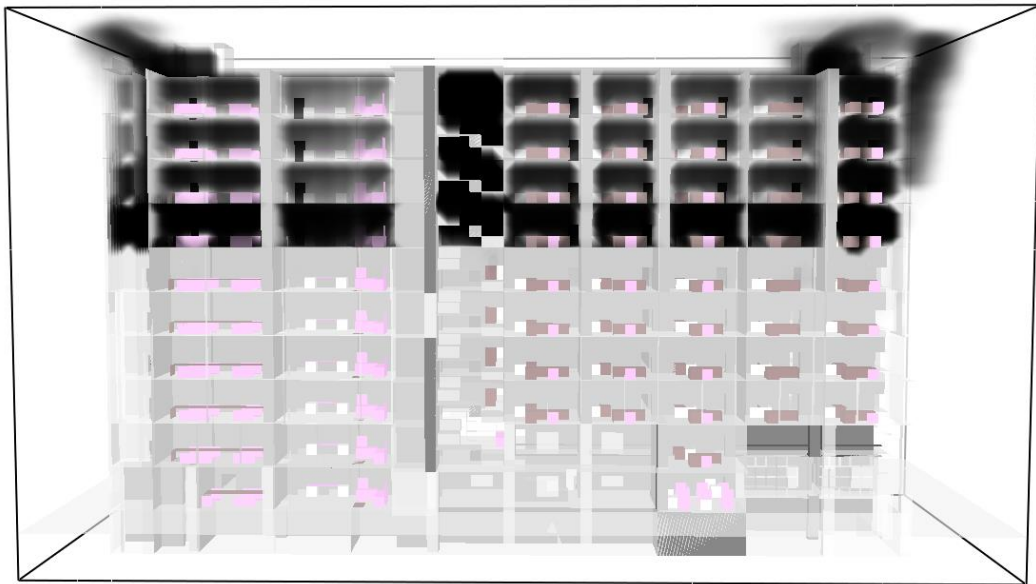
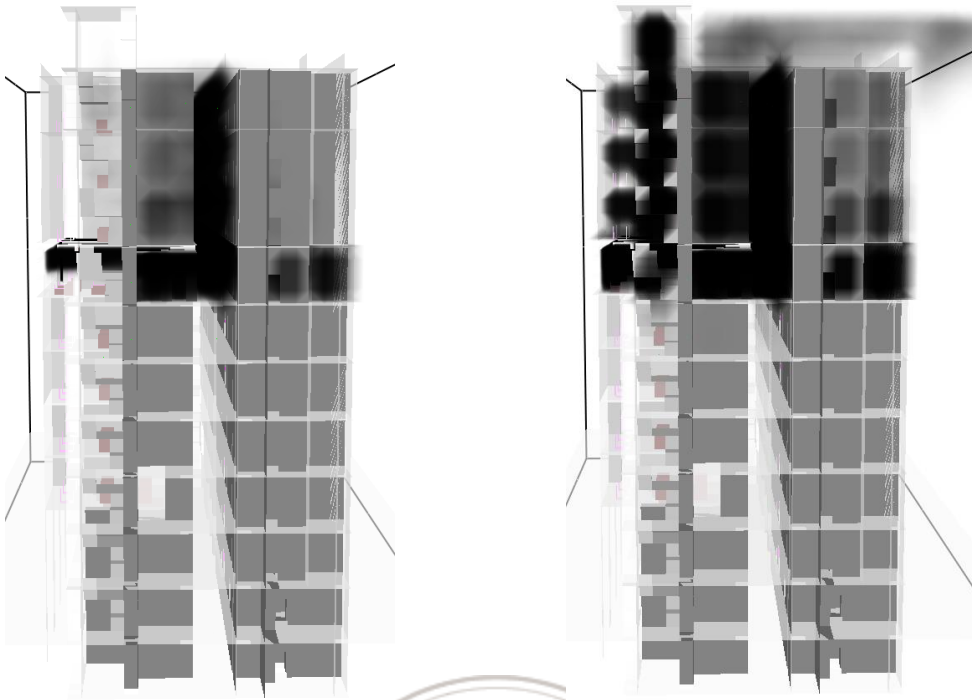
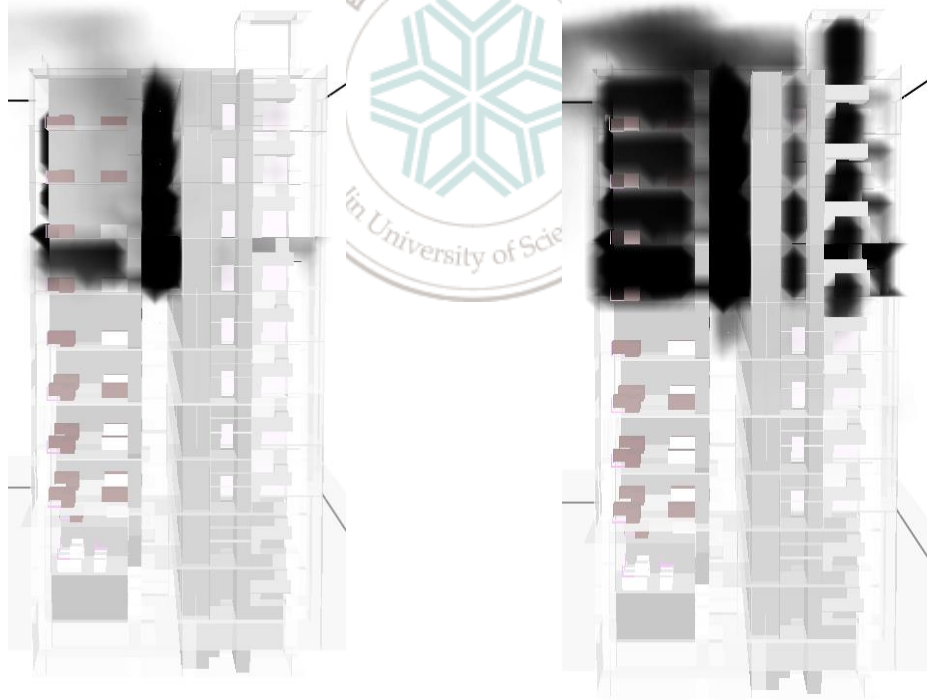


圖 4.52 Case1 模擬至 600 秒之模型前視圖



(a)左側樓梯於 230 秒情況 (b)左側樓梯於 600 秒情況



(c)右側樓梯於 210 秒情況

(d)右側樓梯於 600 秒情況

圖 4.53 兩側樓梯煙流側視圖

4.3.1.2 溫度分析

在 2.1.6 火災的危害中有提到，人體皮膚若暴露於溫度 66°C 以上會造成皮膚燒傷甚至死亡，故在此以 66°C 為一標準值，並於各溫度曲線圖上標上標準線以利討論。透過觀測點觀察個樓層之溫度，各側點高度皆在該樓層地板高度在 1.5 m 處設置。首先於七樓起火房間的對外逃生門處溫度測點量點之曲線圖如圖 4.54 可以看到在燃燒初期，50 秒前兩側房間門口溫度皆無明顯變化，直至高溫煙層於天花板蓄積至一定高度下，開始往下沉降而往兩側門口竄出煙霧，此時的高溫煙層使得在兩門口之溫度測點於時間 70 秒時皆突破人體溫度標準線，並隨著火災的發展有愈來愈高的傾向。

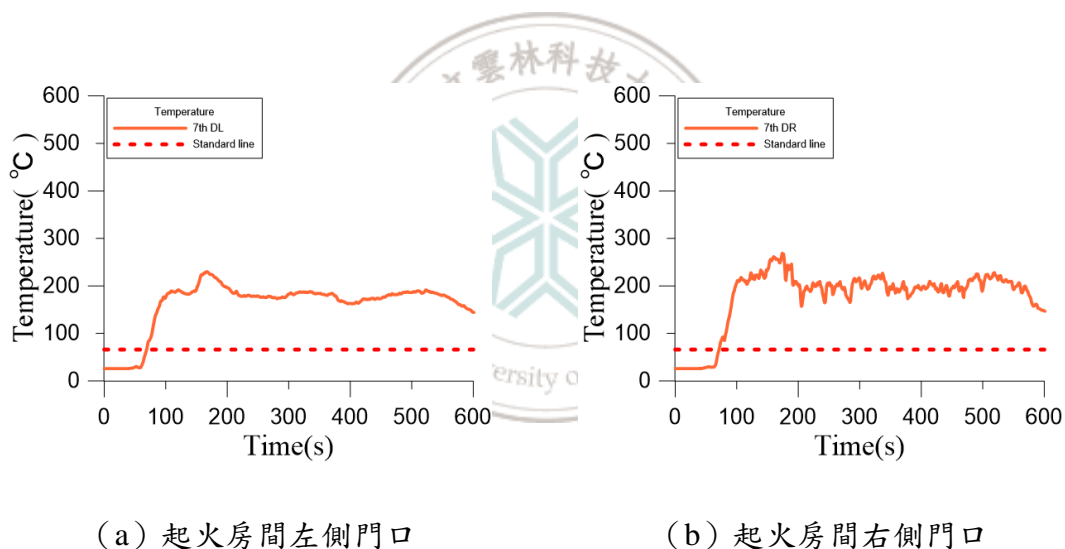
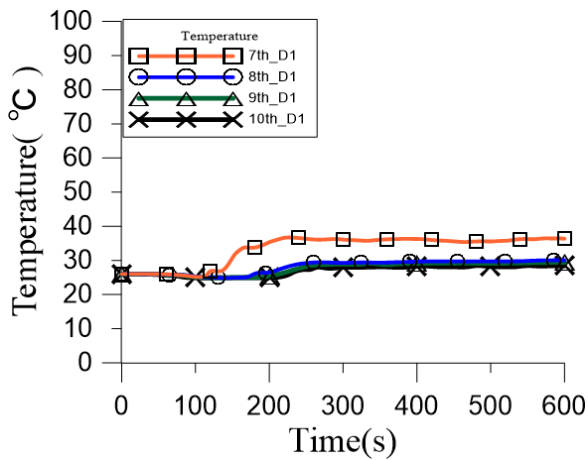
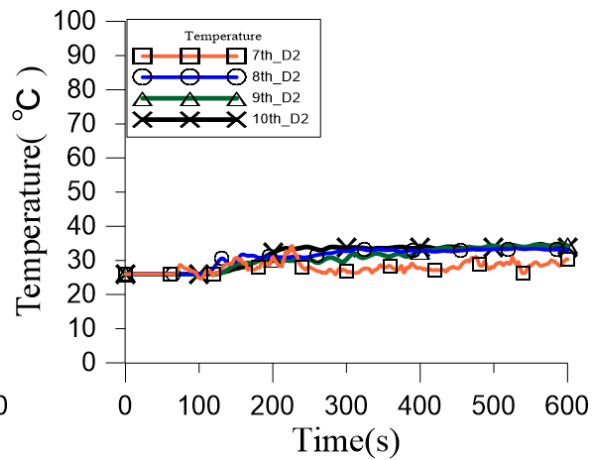


圖 4.54 七樓起火房間之兩側門口之溫度曲線圖

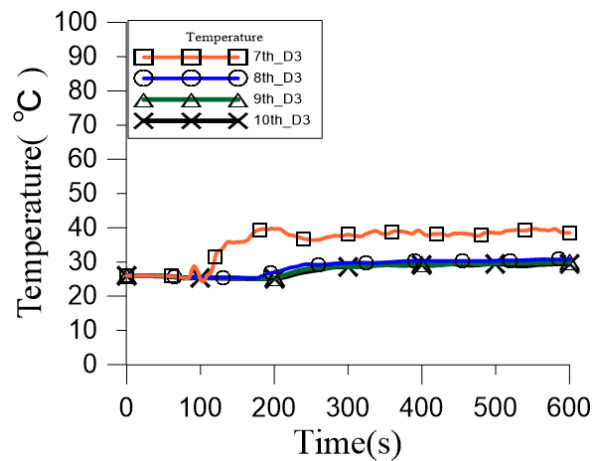
接著針對在起火層以上樓層走道之溫度測點分析，各樓層走道皆放置三個溫度測點且高度都在 1.5 m 處，並設置在各逃生梯處分別在往右側逃生梯走道處的測點 D3、靠近中間逃生梯走道處的 D2 以及靠近左側逃生梯走道處的 D1，而測點前面加上樓層代號，如下圖 4.55 各樓層走道處之溫度測點曲線圖，從曲線圖上看到走道上皆未超過溫度標準值 66°C ，研判與火源設置有關，因為設置燃料少加上整個樓層擴散面積大，使得整體溫度相對較低。



(a) 左側逃生梯走道處測點



(b) 中間逃生梯走道處測點



(c) 右側逃生梯走道處測點

圖 4.55 各樓層走道處之溫度測點曲線圖

4.3.1.3 能見度分析

依據前述 2.1.6 節介紹火災的危害，能見度為火場重要的指標之一，詳細能見度對於人員影響可參照中提及在火場中人員能見度小於 3 m 時人員必須摸黑逃生，故本節將以能見度 3 m 做為比較的基準值，於能見度橫切面來綜合比較能見度之變化。

在圖 4.56 為起火層七樓之能見度切面圖，看到在 70 秒時房間充滿煙霧，使

得房內能見度下降，在 120 秒時房內空間基本上已經低於安全的能見度值 3 m，而隨著煙霧擴散在 160 秒時走道中間能見度和兩旁逃生樓梯都已低於能見度安全值，意味著人員若在 160 秒以後未逃至逃生梯，將無法分辨出確切的逃生出口，甚至過程中還吸入過多的有毒氣體，導致逃生更加嚴峻；而不止七樓起火層能見度下降，如前述煙流會往中間豎井逃生梯往上竄流，進而樓頂上將受到更大的影響，故這裡將探討 8、9、10 樓層能見度低於安全值的出現秒數拿來探討，首先看到圖 4.57 八樓能見度之切面圖 ($Z=30\text{ m}$)，在 200 秒時，由中間豎井竄升的煙流，已造成走道中間處能見度下降至安全值，而隨著時間的擴散在 364 秒時於兩旁梯間樓梯能見度也下降至安全值，並有煙霧竄進梯間而往上擴散的跡象；由圖 4.58 九樓能見度之切面圖 ($Z=34\text{ m}$) 看出，在秒數 284 秒在走道中間處以及秒數 445 秒在兩旁之逃生梯，能見度皆下降至安全值；圖 4.59 十樓能見度之切面圖 ($Z=38\text{ m}$) 看到，在 250 秒時就在走道中間以及 427 秒時在兩旁逃生梯處，其能見度也同樣來到低於安全值，而且梯間處也都佈滿了煙霧。

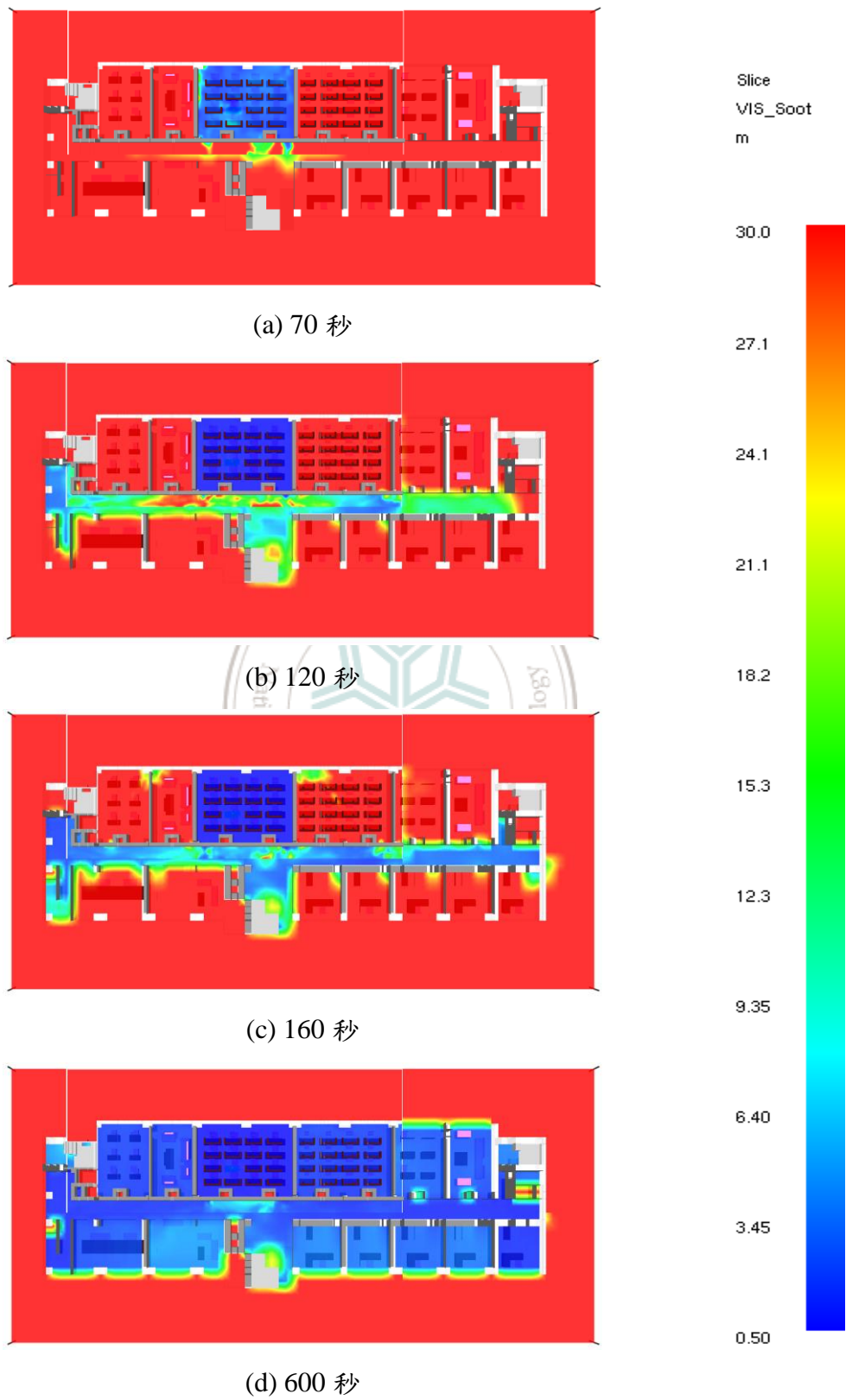
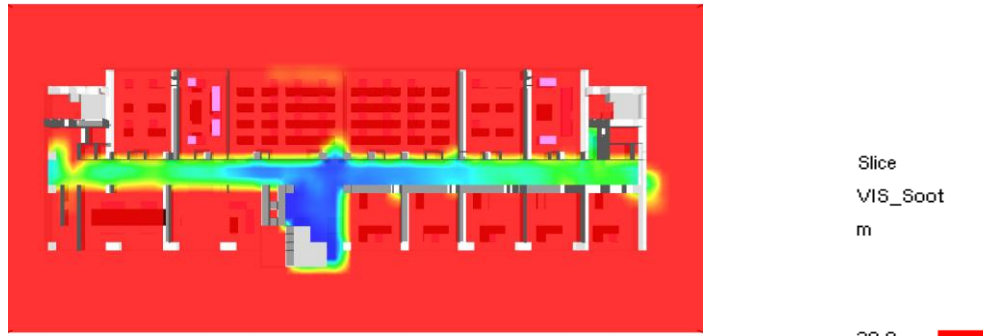


圖 4.56 起火層七樓能見度之切面圖 (Z=26 m)

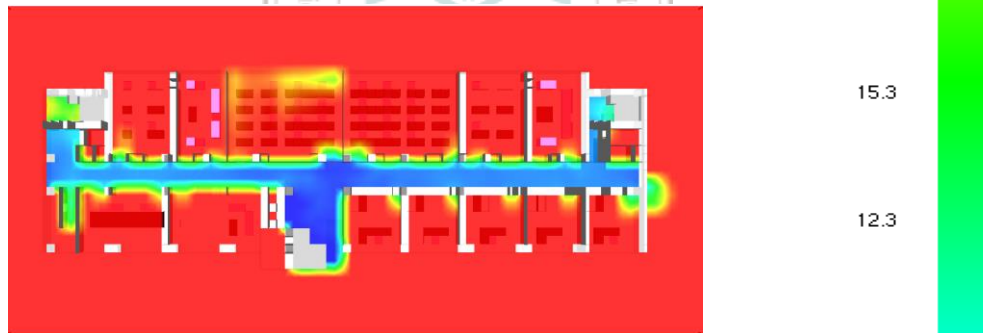


(a) 200 秒

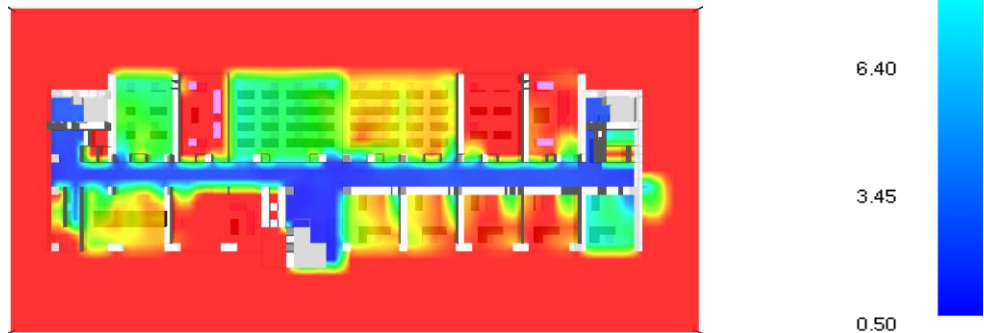


(b) 364 秒

圖 4.57 八樓能見度之切面圖 (Z=30 m)

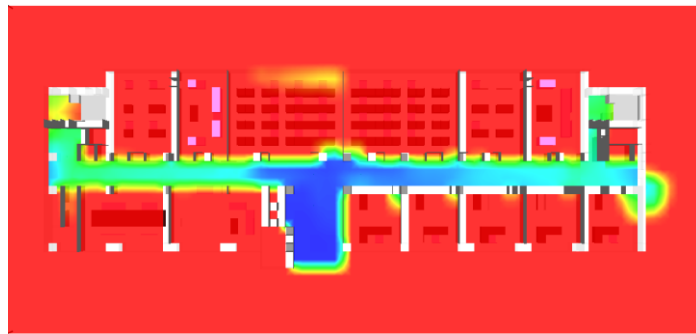


(a) 284 秒

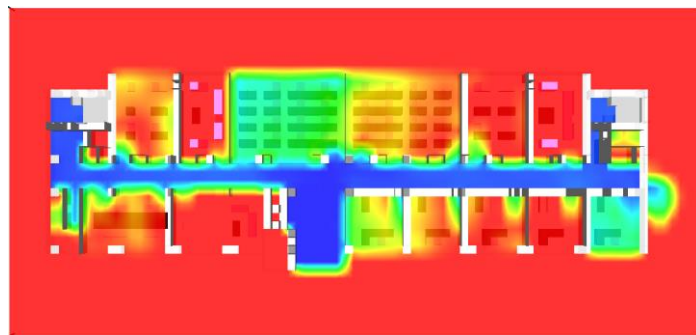


(b) 445 秒

圖 4.58 九樓能見度之切面圖 (Z=34 m)



(a) 250 秒



(b) 427 秒

圖 4.59 十樓能见度之切面圖 (Z=38 m)

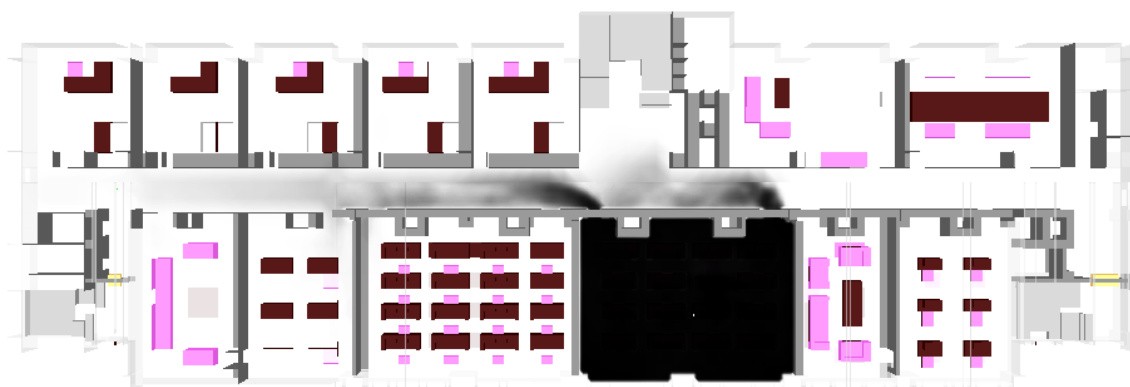


4.3.2 Case2 案例分析

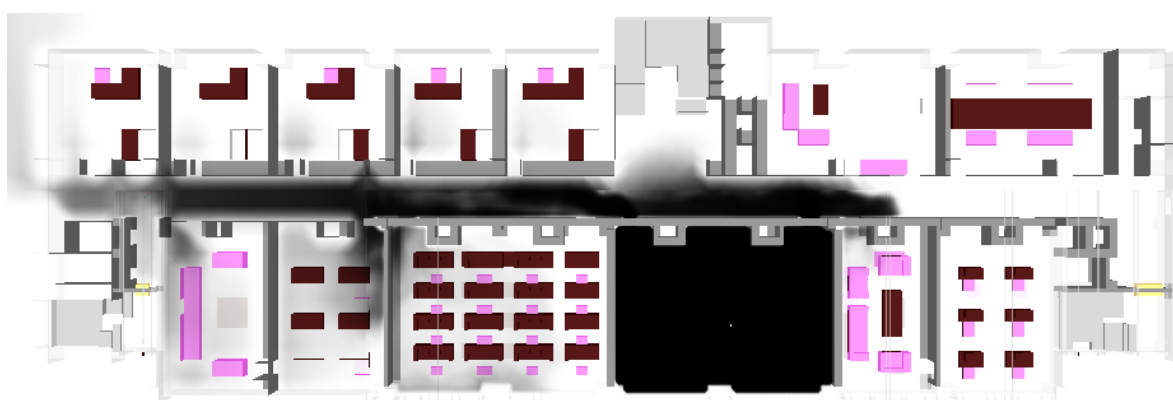
4.3.2.1 煙流分析

煙流模擬結果圖，Case2 情況為起火教室中間處加裝偵煙器，當火源開始燃燒煙流往天花板蓄積，偵煙器便開始作動並延遲五秒後開始啟動大樓兩旁氣簾，氣簾速度為 17 m/s，下列為起火層七樓煙流於各時間的煙流俯視圖，首先在燃燒 50 秒時，起火房間隨即充滿煙霧並往走道處擴散，同時也因為此時氣簾已經作動，右側氣簾吹出的氣流，使得走道煙霧往左側方向吹去；在起火時間至 90 秒時，煙流的擴大，走道上煙流也愈來愈大，但值得注意的是也因為右側氣簾的氣流干擾，阻止了煙流的煙囪效應，並開始往左側走道的窗戶開口擴散出去，而原本應該如 Case1 會從中間樓梯豎井往上竄升，在這裡如前述原因沒有發生；燃燒至 280 秒時，可以看到起火房間左側房間皆煙流擴散而有煙流的進入，而右側氣簾影響比左側來的明顯，也是因為在門口的寬度為左側門口寬度的兩倍，因為我們設置氣簾是根據門口寬度去設置，加上設置雙氣簾故進氣量右側為左側 4 倍，才有此較好的阻煙效果；而在 600 秒時的模型側視圖，也看到煙流並未如 Case1 往中間豎井處竄升，僅在起火層 7 樓有影響。

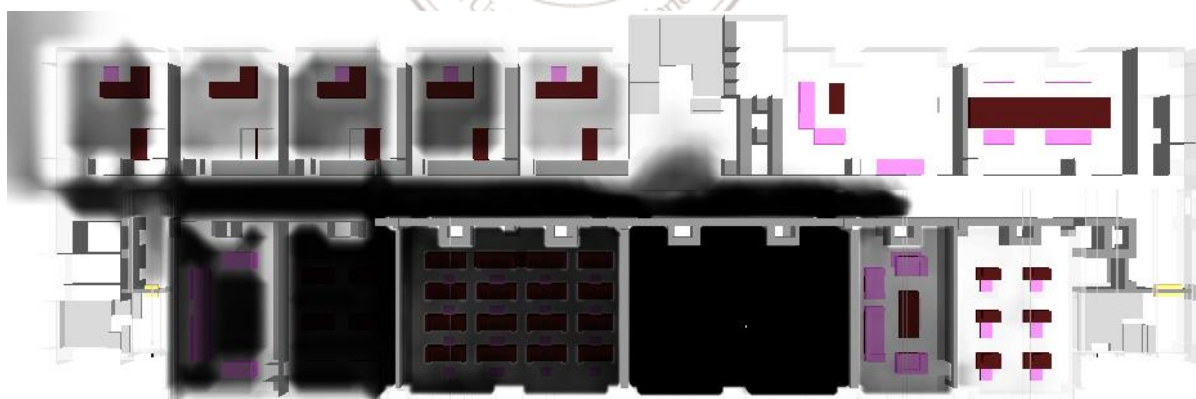
圖 4.62 兩側樓梯煙流側視圖(a)、(b)為模型大樓左側視圖，看到左側樓梯在開啟雙氣簾下，有明顯的阻止煙氣進入至左側梯間，直到模擬至最後 600 秒依然就維持較好的阻煙能力，再來看到(c)為模型大樓右側視圖，因為進氣量為左側氣簾的 4 倍，到模擬結束前都維持相同情況，無煙流進入。



(a)50 秒



(b)90 秒



(c)280 秒

圖 4.60 Case2 七樓起火層燃燒情況

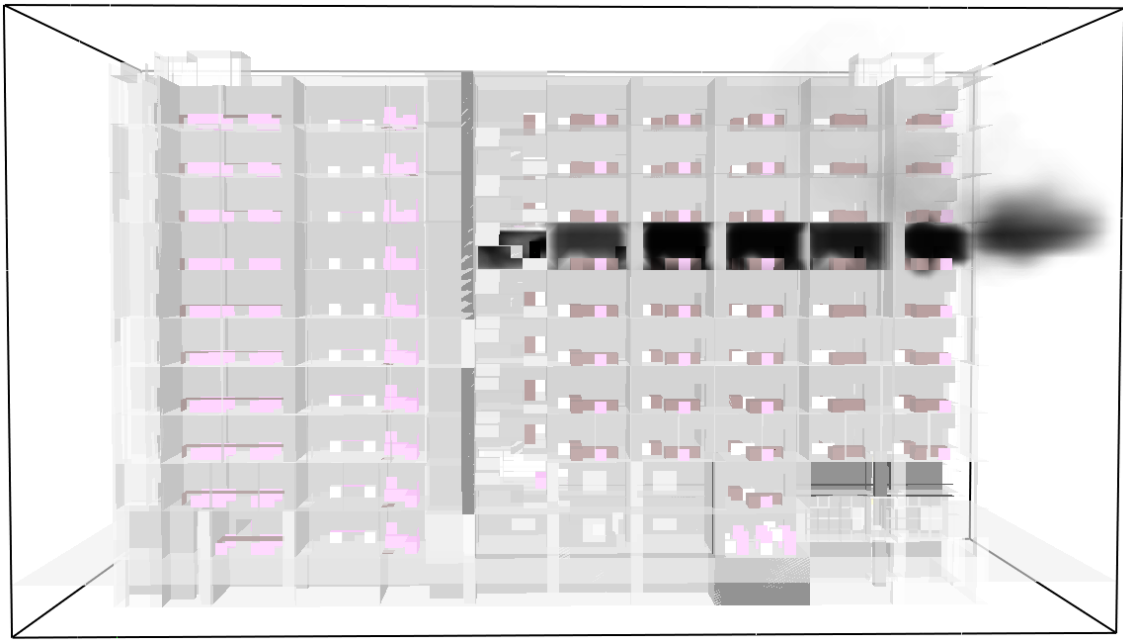
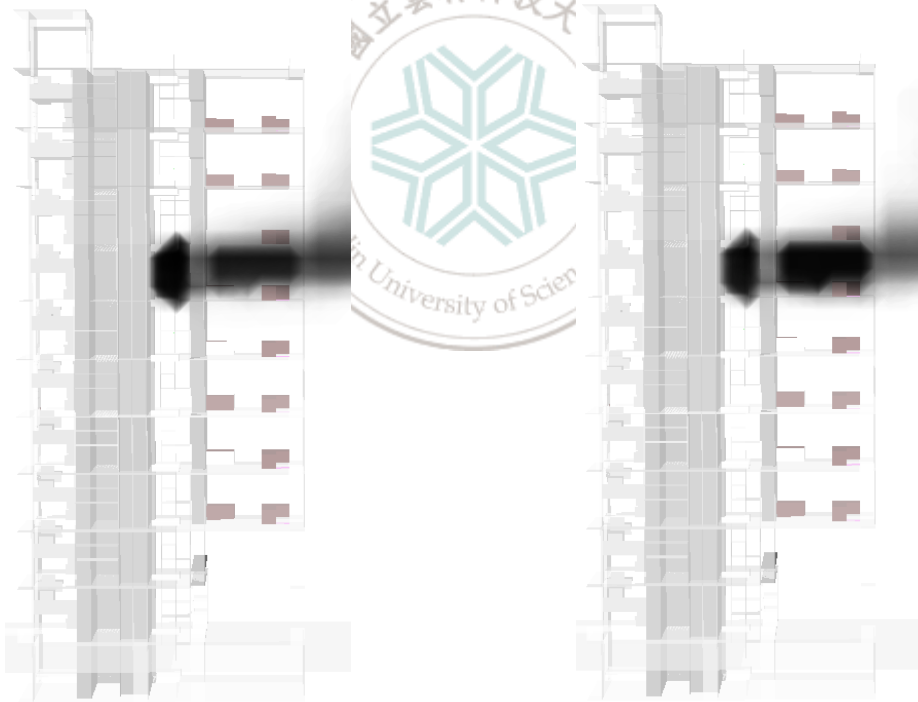


圖 4.61 Case1 七樓起火層燃燒 600 秒情況



(a)左側樓梯於 230 秒情況

(b)左側樓梯於 600 秒情況



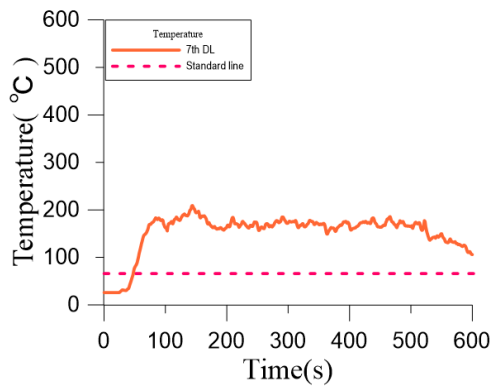
(c)右側樓梯於 600 秒情況

圖 4.62 兩側樓梯煙流側視圖

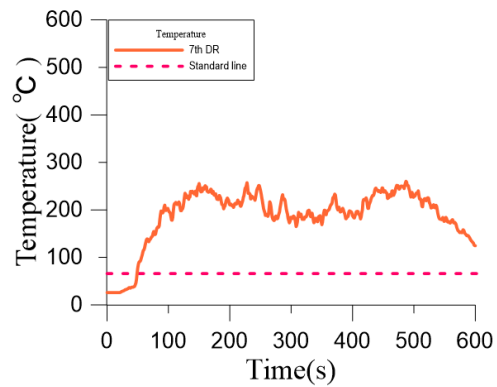
4.3.2.2 溫度分析

同樣以 66°C 為一標準值，並於各溫度曲線圖上標上標準線以利討論。透過觀測點觀察個樓層之溫度，各側點高度皆在該樓層高度之人員高度在 1.5 m 處設置，首先於七樓起火房間的對外逃生門處溫度測點量點之曲線圖，如圖 4.63 可以看到在燃燒初期，50 秒前兩側房間門口溫度皆無明顯變化，直至高溫煙層於天花板蓄積至一定高度下，開始往下沉降而往兩側門口竄出煙霧，此時的高溫煙層使得在兩門口之溫度測點於時間 70 秒時皆突破人體溫度標準線，並隨著火災的發展有愈來愈高的傾向，與 Case1 無明顯差別，僅因為氣簾氣樓影響相較為不穩定。

而走道並設置在各逃生梯處分別在往右側逃生梯走道處的測點 D3、靠近中間逃生梯走道處的 D2 以及靠近左側逃生梯走道處的 D1，而測點前面加上樓層代號，如圖 4.64 所示，右側測點因為氣簾氣流幾乎無變化，而變化較大的中監測點 D2 因為一方面靠近火源房間另一方面受到氣流吹至左側，才有溫度曲線忽高忽低的情況。

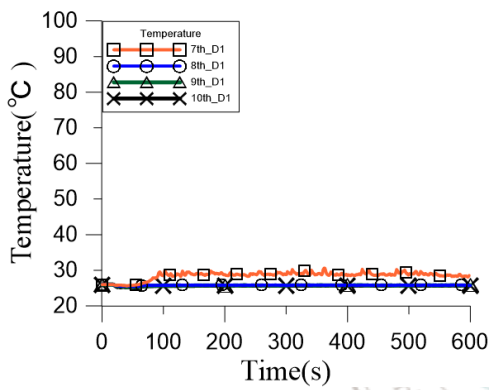


(a) 起火房間左側門口

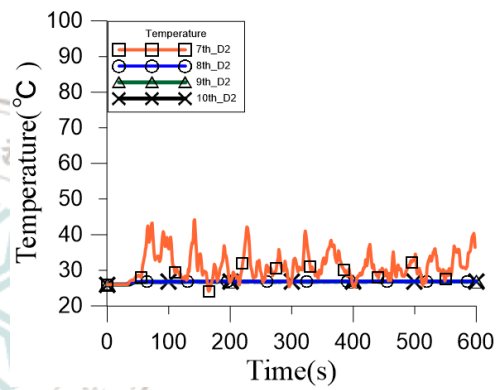


(b) 起火房間右側門口

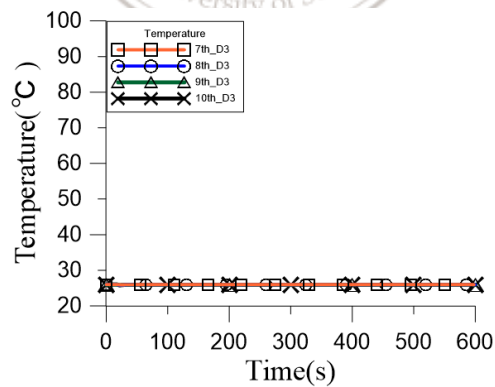
圖 4.63 七樓起火房間之兩側門口之溫度曲線圖



(a) 左側逃生梯走道處測點



(b) 中間逃生梯走道處測點



(c) 右側逃生梯走道處測點

圖 4.64 個樓層走道處之溫度測點曲線圖

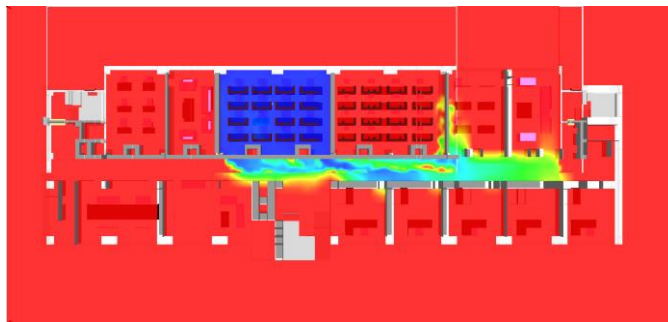
4.3.2.3 能見度分析

依據前述 2.1.6 介紹火災的危害，能見度為火場重要的指標之一，詳細能見度

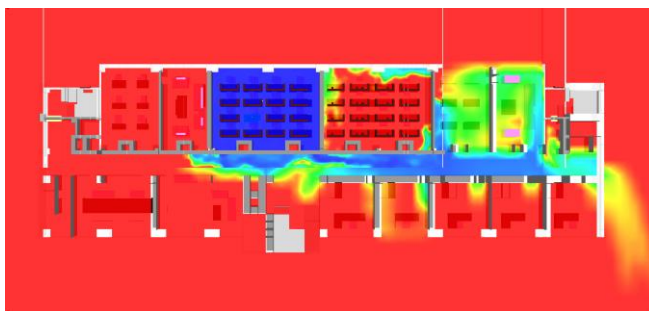
對於人員影響可參照表 2.5，表中提及在火場中人員能見度小於 3 m 時人員必須摸黑行動逃生，故這裡將以能見度 3 m 為我們比較的基準值，於能見度橫切面來綜合比較能見度之變化。

在圖 4.65 為起火層七樓之能見度切面圖，看到在 70 秒的時候房間充滿煙霧，使得房內能見度下降，在 120 秒時房內空間基本上已經低於安全的能見度值 3 m，且走道上因為煙霧無擴散至中間豎井，故在走道上有部分煙流能見度低於安全值，隨著煙霧擴散在 160 秒時，蓄積在七樓走道左側的煙霧，明顯的使走道上的能見度下降許多，甚至低於安全值，當然對於右側人員逃生沒問題因為煙流主要侷限在左側走道上，因此左側人員在找尋逃生梯可能需依賴指示燈找尋方向逃生；在模擬最後於火源熄滅後煙流的擴散，依舊僅針對在走道處左側造成影響。

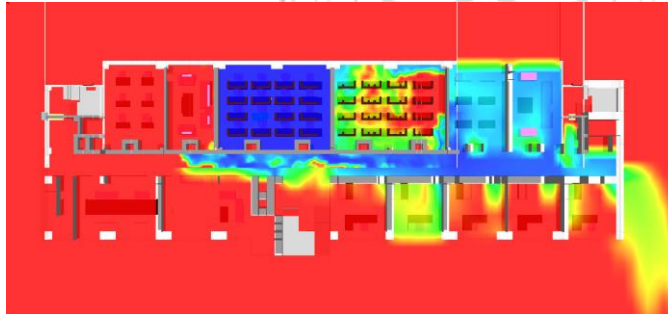




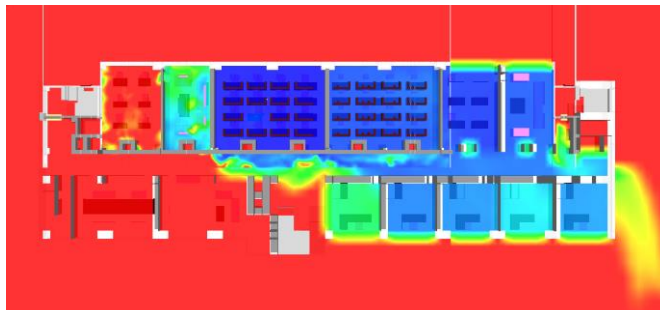
(a) 70 秒



(b) 120 秒



(c) 160 秒



(d) 600 秒

Slice
VIS_Soot
m

30.0

27.1

24.1

21.1

18.2

15.3

12.3

9.35

6.40

3.45

0.50

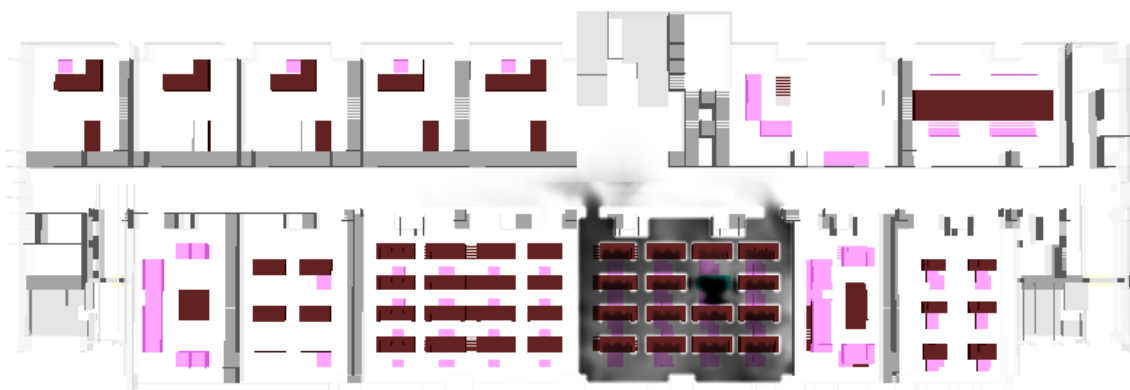
圖 4.65 起火層七樓能見度之切面圖 (Z=26 m)

4.3.3 Case3 案例分析

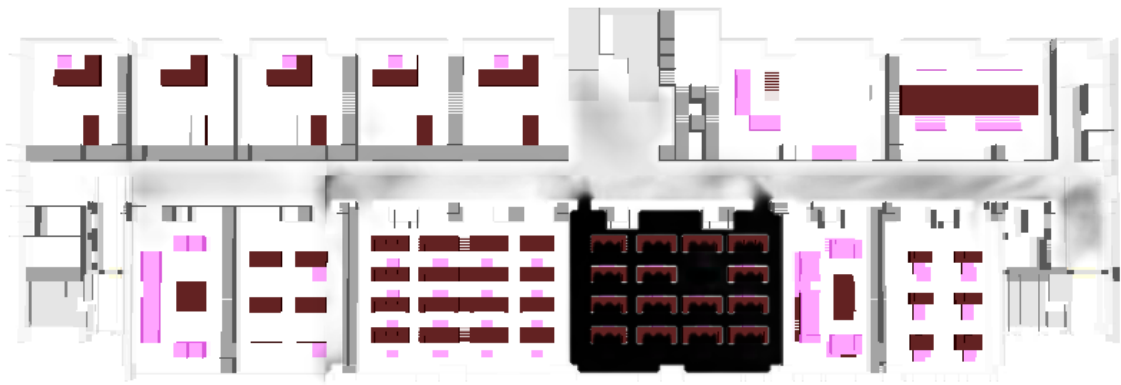
本案例為修正氣簾速度如前述 4.2.4 氣簾速度分析，採用最佳排氣速度 4 m/s 當作氣簾排氣速度，另外如自然排煙 Case1 中主要因為樓層頂部無排煙口，加上高樓模型走道中間處有樓梯豎井，這將會加快煙流因為煙囪效應快速往上竄升，快速於頂部蓄積至各走道及梯間中，加上氣簾排氣速度調整變小，可能無法如像是 Case2 那種用最大限排氣速度來設置氣簾排氣速度，強制煙流從走道窗戶開口排出，同時考慮到實際成本考量及應用的可能性，故在頂部樓梯豎井加裝排煙口，當作此次模擬 Case3 之情境設定。

4.3.3.1 煙流分析

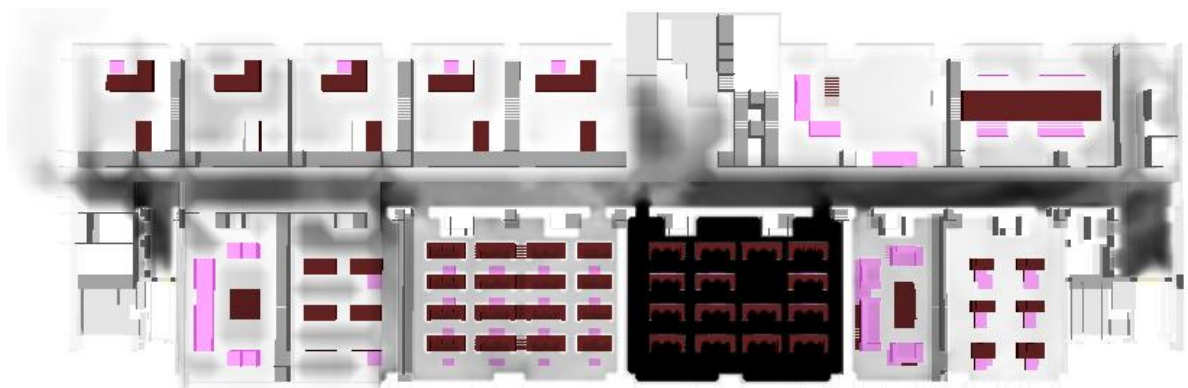
模擬結果煙流圖中，當七樓教學教室開始起火延燒，從圖 4.61 (a)中看到初期燃燒 50 秒煙流擴散情況，迅速充滿整個起火房間，並往走道外擴散開來，而在圖 4.61 (b) 90 秒煙流很快的擴散至整個七樓走道，而少許煙流也沿著中間的樓梯豎井向上竄升，看到在圖 4.61 (c) 280 秒時，明顯在雙氣簾作動下，走道兩旁往逃生梯無煙霧進入至梯間，並在模擬最後仍無明顯煙氣進入梯間，詳細參考圖 4.68 兩側樓梯煙流側視圖，明顯看到在雙氣簾阻煙下，並無煙霧的進入，說明著雙氣簾在速度 4 m/s 時仍有很好的阻煙效果。



(a)50 秒



(b)90 秒



(c)280 秒

圖 4.66 Case3 七樓起火層燃燒情況

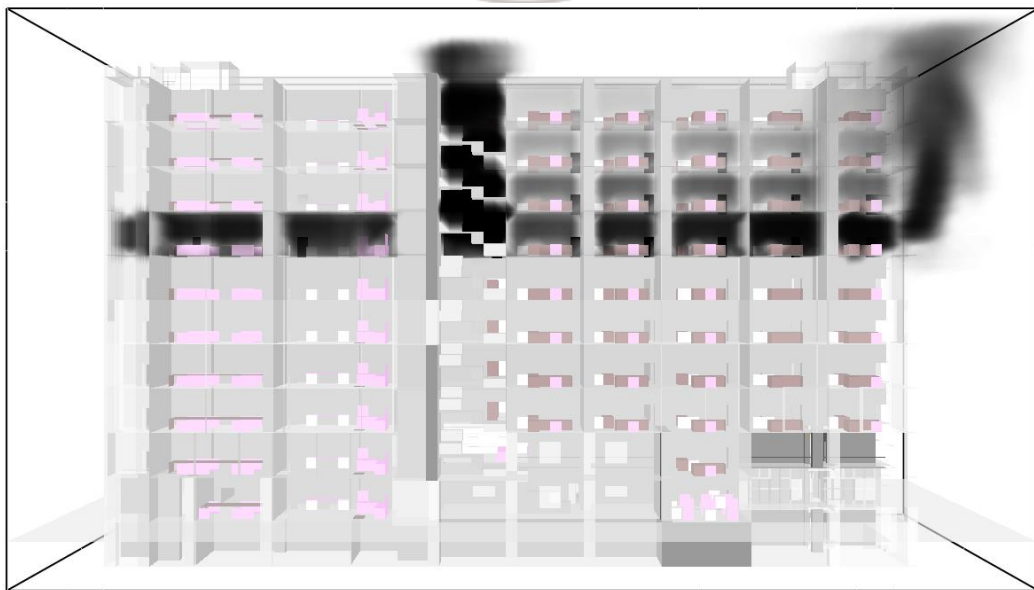
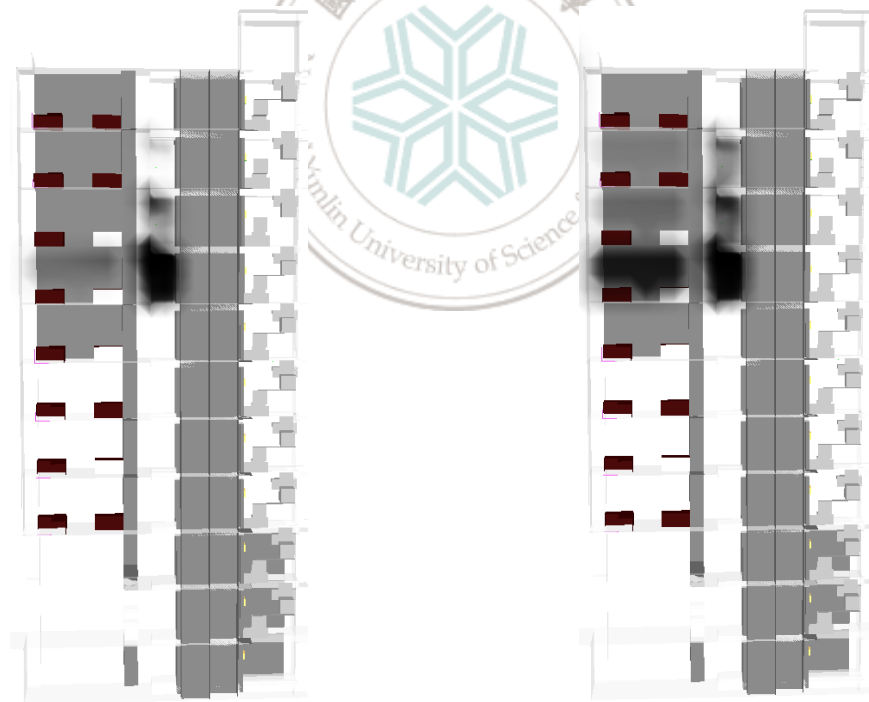


圖 4.67 Case3 模擬至 600 秒之模型前視圖



(a)右側樓梯於 230 秒情況 (b)右側樓梯於 600 秒情況



(c)左側樓梯於 210 秒情況 (d)左側樓梯於 600 秒情況

圖 4.68 兩側樓梯煙流側視圖

4.3.3.2 溫度分析

同樣以先前討論之火災危害溫度以 66°C 為一標準值，首先看到圖 4.69 為針對起火房間兩側門口之溫度，各測點高度皆在該樓層高度之人員高度 1.5 m 處設置，溫度同樣在初期 40 幾秒即立刻飆升並來到 200 多度高溫，說明若受困在起火房間的人們若不盡快往外逃生，將會有生命上的危害。

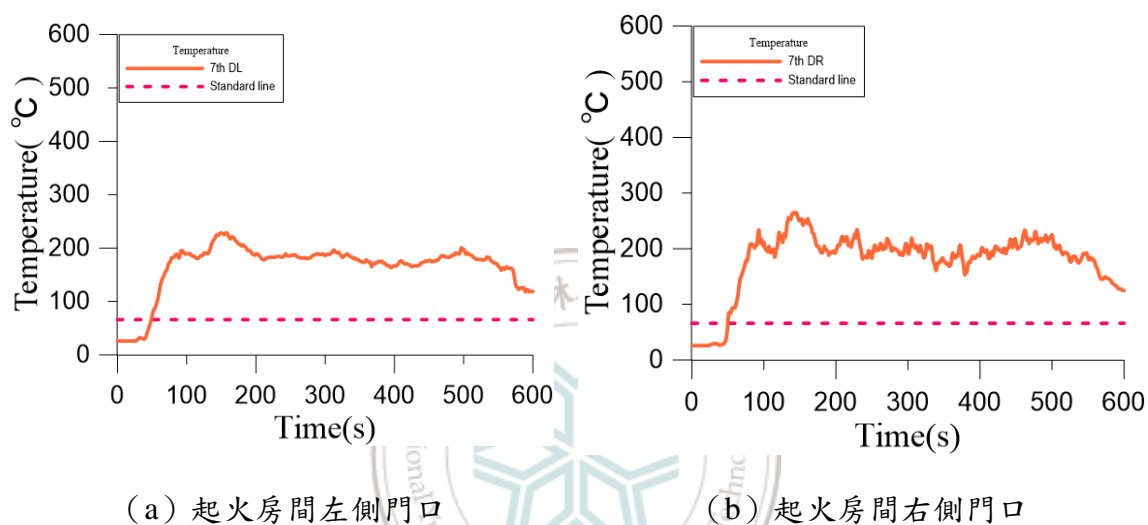
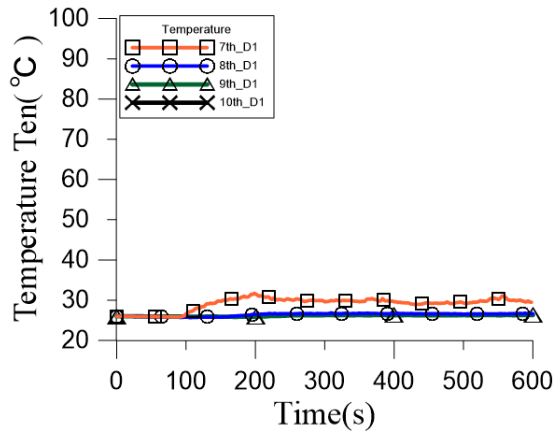
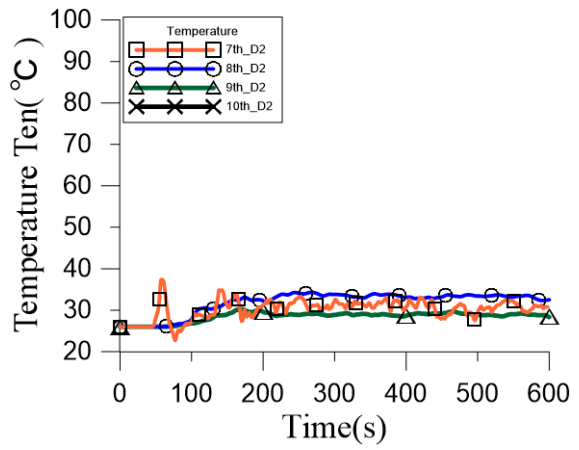


圖 4.69 七樓起火房間之兩側門口之溫度曲線圖

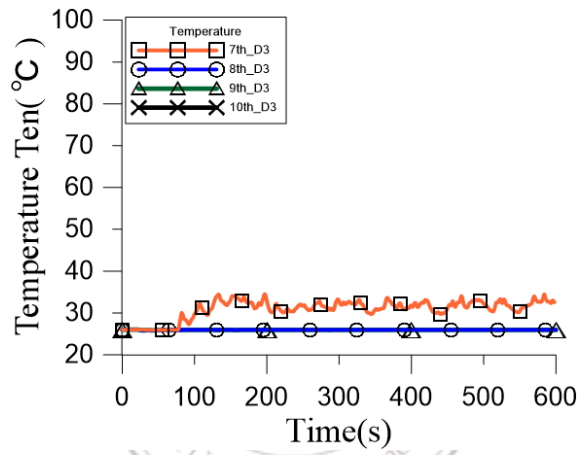
再來針對起火層走道處的溫度測點分析，各樓層走道皆放置三個溫度測點且都在高度 1.5 m 處，並設置在靠近右側逃生梯走道處的測點 D3、靠近中間逃生梯走道處的 D2 以及靠近左側逃生走道處的測點 D1，雖然各樓層走道處皆無明顯的溫度高於 66°C ，不過可以從中發現煙氣有無擴散至該樓層走道，如中間樓梯豎井在此案例有明顯的往上竄升，並在八樓沿著豎井擴散至走道，故在八樓走道走道中間測點 D2 溫度上升情況。



(a) 左側逃生梯走道處測點



(b) 中間逃生梯走道處測點



(c) 右側逃生梯走道處測點

圖 4.70 個樓層走道處之溫度測點曲線圖

4.3.3.3 能見度分析

依據前述 2.1.6 介紹火災的危害，能見度為火場重要的指標之一，詳細能見度對於人員影響可參照表 2.5，表中提及在火場中人員能見度小於 3 m 時人員必須摸黑行動逃生，故這裡將以能見度 3 m 為我們比較的基準值，於能見度橫切面來綜合比較能見度之變化。

在圖 4.71 為起火層七樓之能見度切面圖，看到在 70 秒的時候房間充滿煙霧，使得房內能見度下降，在 120 秒時房內空間基本上已經低於安全的能見度值 3 m，且走道煙霧擴散至中間豎井，走道上有部分煙流能見度低於安全值，隨著煙霧擴散在 160 秒時，蓄積在七樓走道的煙霧，明顯的使走道上的能見度下降許多，甚至低於安全值，值得注意在兩旁逃生梯設置氣簾情況下，均有較佳的能見度；而在模擬最後逃生梯的氣簾仍舊維持很好的阻煙效果且無煙氣進入梯間。

看到圖 4.72、圖 4.73、圖 4.74 分別為針對起火層樓層以上之能見度切面，分別樓層為八樓、九樓及十樓，可以看到在各樓層下的能見度，基本上在中間豎井樓梯處均能見度受到影響，主因為煙流沿著豎井竄升擴散，八、九樓比較明顯在走道處受到煙氣擴散而降低能見度，而十樓主要因為中間樓梯豎井設置一排氣口，故無較多的煙氣擴散至走道。

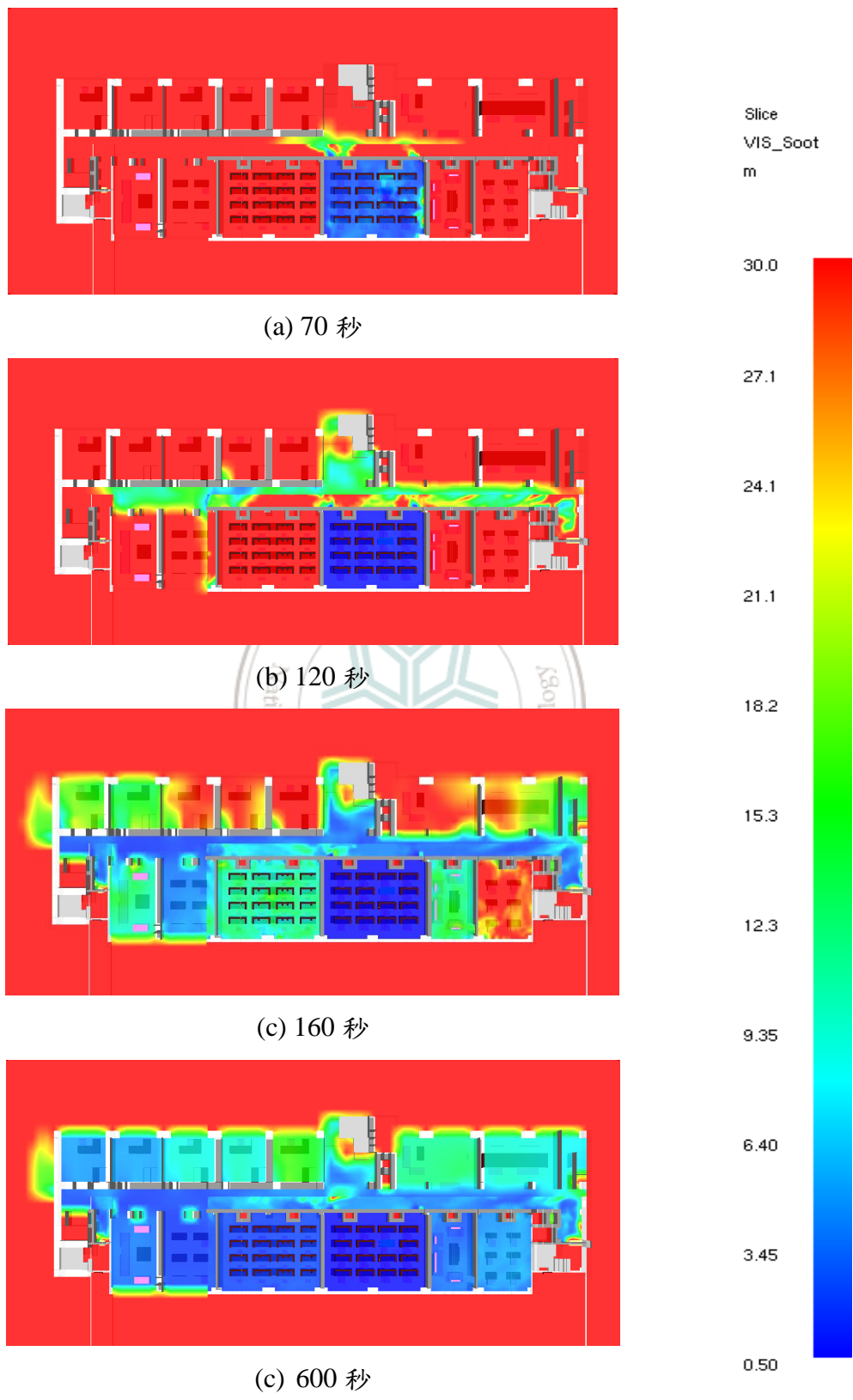
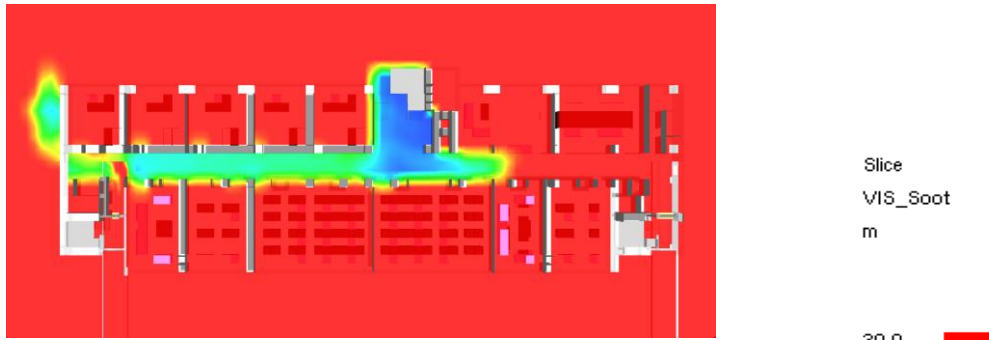
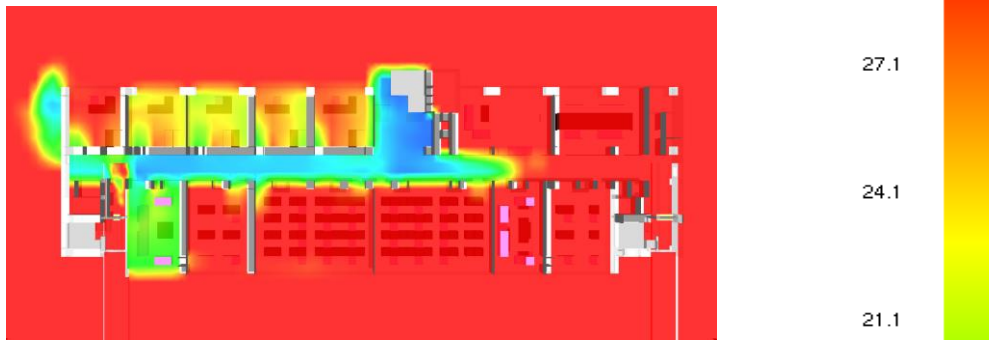


圖 4.71 起火層七樓能見度之切面圖 ($Z=26\text{ m}$)



(a) 225 秒

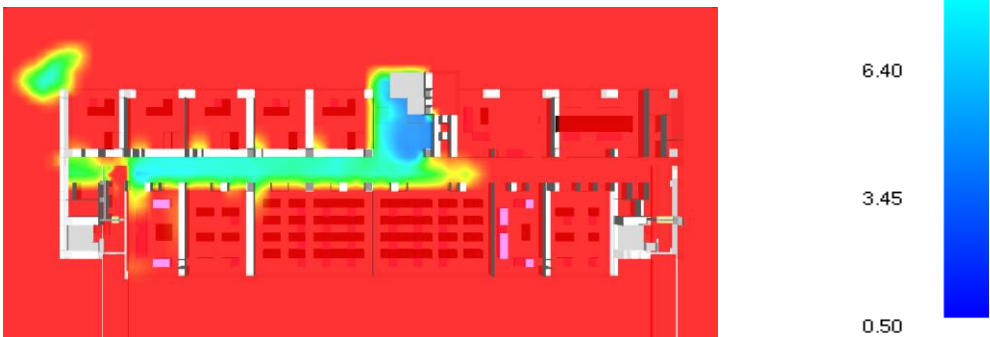


(b) 600 秒

圖 4.72 八樓能見度之切面圖 (Z=30 m)

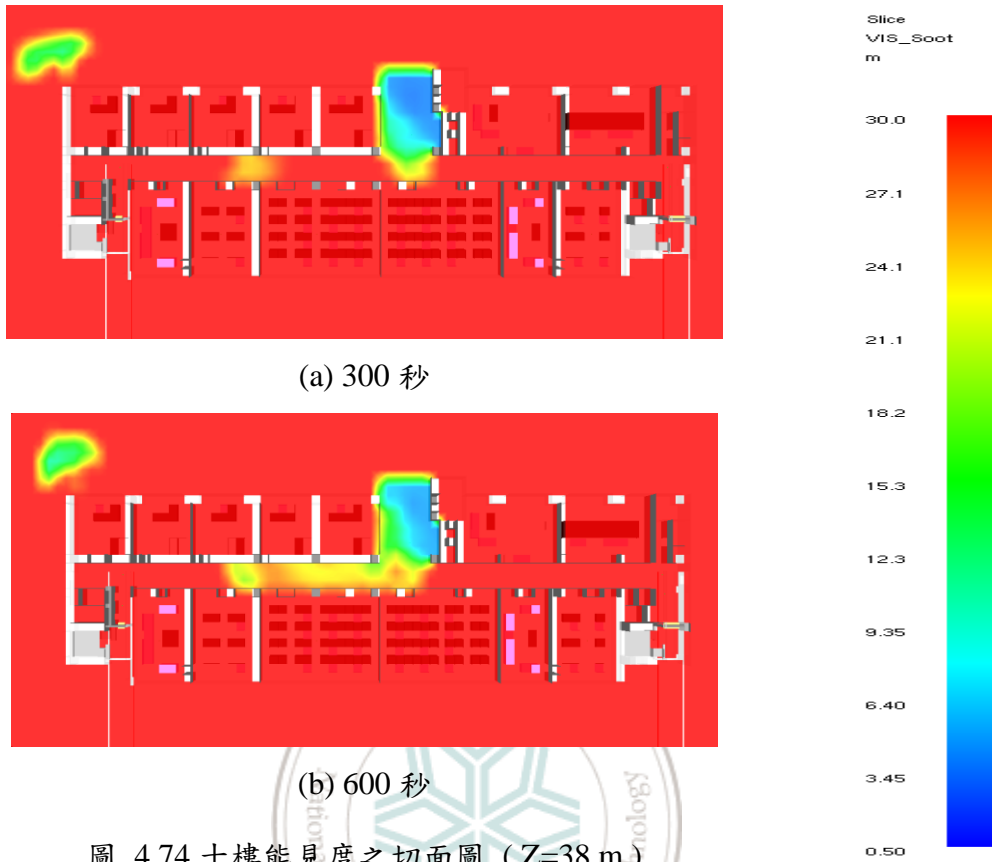


(a) 300 秒



(d) 600 秒

圖 4.73 九樓能見度之切面圖 (Z=34 m)



(a) 300 秒

(b) 600 秒

圖 4.74 十樓能見度之切面圖 (Z=38 m)

第五章、結論與未來展望

5.1 結論

本研究參考學者汪宣宏及陳聖澤之文獻及研究，建構一縮小尺度模型來進行火災模擬，再藉由相關氣簾之參考文獻，探討如何藉由縮小尺度實驗來修正火災模擬軟體 FDS 之參數設定，同時也修正以往研究因為風速未依法規規定之進排氣量換算之差異。透過修正過後以及修改縮小尺度模型移走中間走道障礙物後，探討原先三明治加壓、正壓排煙及負壓排煙三種煙控系統對於煙霧流動的影響，同時也針對於模型內設置阻煙氣簾，與原先未設置氣簾進行比較探討，以及無進、排氣風機影響煙流的自然排煙的探討。

本研究同時也進一步探討在高樓層建築設置氣簾的數量、方向及風速之影響，並找尋氣簾最佳設置條件，並應用於某一教學大樓上。綜合以上模擬結果藉由模擬及實驗的溫度測點、光感度及能見度等歸納出以下幾點結論：

1. FDS 在設置風速的參數設定上，會與設置風速大小不同，若要維持法規要求規定之風速，需局部去切細網格才能達成實際風速要求值。
2. 由實驗與模擬結果顯示，福勞德模型能有效的模擬縮小尺度與全尺度間之煙流運動關係，但對於模擬複雜的火場與縮小模型上的熱輻射及熱對流現象，卻無法精確的重現，若要進一步重現小尺度與全尺度火場間的熱流關係，需尋找其他的無因次縮小尺度模型。
3. 在實驗前使用噴火槍對油盆點火，會消耗房間內部氧氣使得二氧化碳於點火房間增加，導致後續補足氧氣不足造成實驗比小尺度火源較早熄滅。
4. 在修正過後的模型中使用整流風扇並修正內部實際風速值後，在模擬全尺度三明治加壓與正壓排煙都有良好的阻煙效果。
5. 在加長走道模型中氣簾的位置及數量測試實驗中，發現設置在梯間外側氣簾

比設置梯間內側氣簾有較好的阻煙效果，能見度與逃生門處溫度都有較好的情況，若與雙氣簾比較則為雙氣簾為最佳的設置條件。

6. 在加長走道模型中雙氣簾的速度綜合測試實驗中，保持良好阻煙效果臨界風速為為 4 m/s。
7. 採用細網格並在火源及氣簾處應用，看到在火源的熱傳遞、熱回饋及煙霧的熱浮力現象皆有更加貼近實驗，且在小尺度與實驗溫度曲線更加吻合。

5.2 未來展望

1. 使用氣簾阻煙仍有發展空間，甚至可以應用在其他場所如：地鐵站、半導體廠及其他人員出入之場所，它不僅可以有阻煙的效果，甚至對於未來毒氣的洩漏也有阻止擴散的功能。
2. 氣簾阻煙若是在面對較大熱釋放率的火災，可能設置條件也有所不同，未來也可以針對這些部分去探討；另一方面對於氣簾阻煙僅在初期有較好阻煙效果，至於後期仍須與排煙設施配合，否則最終仍然會突破氣簾阻煙的功能。
3. 福勞德模型在能量守恆方程式上將無因次數 π_5 及 π_9 設為固定，且忽略雷諾數，故無法正確描述熱傳現象，也無法正確預測全尺度與縮小尺度間之溫度關係，未來在縮小尺度之火場研究，需在溫度預測上需找尋不同尺度間的新關係式，以利在溫度場上預測得更為正確。
4. 本研究受限於硬體設備的運算能力限制，因此將網格變大，未來若運算設備有所提升，採用較精細的網格，將可模擬出更精確的結果。
5. 對於實驗光敏電阻使用環境外部光源，未來可在模型添加 LED 燈源當作對照光強度值。
6. 對於真實情況火場可能遇到停電的狀況，氣簾供電與否影響還需進一步探討甚至考慮備用電力...等改善方案。

7. 本研究僅探討空氣幕氣簾阻煙，未來甚至可以變更角度、位置及數量，甚至考慮添加水霧。



參考文獻

1. 最高行政法院政風專刊，高樓建築火災之特性
tpa.judicial.gov.tw/?struID=4&navID=49&contentID=129
2. Etoday 新聞網杜拜哈里發塔火災
www.ettoday.net/news/20160101/622989.htm
3. 維基百科 11.15 重大火災
[zh.wikipedia.org/wiki/上海 “11·15”特别重大火災](http://zh.wikipedia.org/wiki/上海_“11·15”特别重大火災)
4. 內政部統計月報消防月報。
5. 陳聖澤，2015，火災監控系統之開發，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士論文。
6. 何嘉鵬、王東方等，2002，高層建築火災防煙空氣幕的實驗研究，南京工業大學城建學院，中國安全科學期刊。
7. 黃冬梅、朱杰等，2008，防煙空氣幕防煙有效性模擬實驗研究，西南交通大學消防工程系，碩士論文。
8. 陳弘毅，2010，火災學，鼎茂圖書出版公司，臺灣
9. 內政部統計處之「內政統計月報」
10. 陳建忠，2005，高層建築物火災特性與中間層避難空間設置原則，建築研究簡訊，59 期。
11. 陳建忠、張寬勇，2003，高層建築營運時防火管理機制之研究，內政部建築研究所，研究報告。
12. 鍾基強，2006，性能式煙控系統設計與檢證規範之研究-高層建築自然排煙之可行性分析，內政部建築研究所，研究報告。
13. 國立臺灣師範大學物理討論區
www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/phpBB/viewtopic.php?topic=19753
14. 議晟國際空氣門
www.air-curtain.com.tw/technology.asp

15. 台灣颱風資訊中心
typhoon.ws/learn/reference/beaufort_scale
16. 謝蕙如，2006，地下通道煙流現象之縮小模型實驗探討，國立高雄第一科技大學環境與安全衛生工程系，碩士論文
17. 陳呂洲，2014，Arduino 程式設計基礎，北京航空航天大學出版社，北京。
18. 彭勇、潘曉華、謝龍漢，2011，LabVIEW 虛擬儀器設計及分析，北京清華大學出版社，北京。
19. 沈金鑫，2013，基於 Arduino 與 LabVIEW 的溫度監測系統，人民電郵出版社，北京。
20. Center for Energy Studies, 2001, “A Study Report on Efficiency Measurement of Biogas, Kerosene and LPG Stoves”, Biogas Support Program.
21. 內政部消防署，2011 年，內政部火災災害防救業務計畫。
22. 林靜、林振宇、鄭福仁，2010，LabVIEW 虛擬儀器程式設計從入門到精通，人民電郵出版社，北京。
23. 章佳榮、王燦、趙國宇，2013，精通 LabVIEW 虛擬儀器程式設計與案例實作，人民電郵出版社，北京。
24. 劉普霞、胡仁喜、康士廷，2012，LabVIEW2012 中文版虛擬儀器程式設計從入門到精通，機械工業出版社，北京。
25. 汪宣宏，2014，利用縮小模型進行封閉式建築火災煙流探討，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系，碩士論文。
26. Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, 2010, “Thermodynamics: An Engineering Approach“, McGraw Hill Higher Education.
27. Rama Corporation, 1947, “Engineering Guide“, p11.
28. G.E. Andrews, J. Ledger and H.N. Phylaktou, 2000, “Enclosed Pool Fires in Low Ventilation Enclosures: Flame Temperatures and Global Heat Loss Using Gas Analysis“, Fire Safety Science 6: 591-602.
29. U.S.Coast Guard, 1999, “Chemical Hazards Response Information System: Hazardous Chemical Data Manual“, U.S. G.P.O.
30. Hill K, Dreisbach J, Joglar F, Najafi B, McGrattan K, Peacock R, Hamins A., 2007,

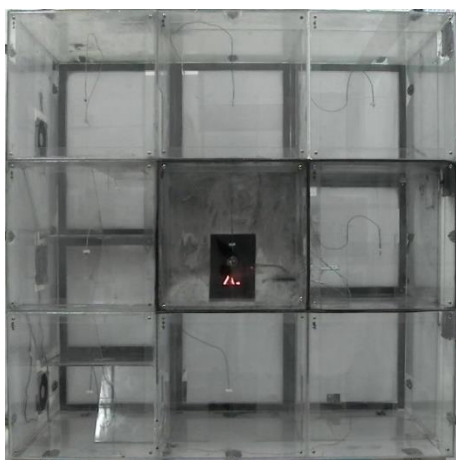
- “Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications”, NUREG 1824, Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission.
31. Jen-Hao Chi, 2012, “Using thermal analysis experiment and Fire Dynamics Simulator (FDS) to reconstruct an arson fire scene”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, DOI 10.1007/s10973-012-2764-x, Vol. 113, 641-648.
 32. Quintiere, J.G., McCaffery, B.J., and Kashiwagi, T., 1977, “A Scaling Study of a Corridor Subject to a Room Fire” The 17th National Heat Transfer Conference.
 33. Allison C. Carey, Quintiere, J.G., 2010, “Scale Modeling of Static Fires in a Complex Geometry for Forensic Fire Applications”, Thesis of the Graduate School of the University of Maryland.
 34. 陳欣怡，2012，環境因子對於建築物火場中煙流行為之初探，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程所，碩士論文。
 35. 蔡尤溪等人，2009，建築物正負壓區劃性能式煙控設計之研究，內政部建築研究所，研究報告。
 36. 內政部建築研究所，2009，大空間建築火災性能式煙控系統設計與應用手冊，內政部建築研究所出版，臺灣。
 37. 內政部建築研究所，2007，高層建築物排煙系統與人員避難關聯性之研究，內政部建築研究所研究報告，臺灣。
 38. John H. Klote, James A. Milke., 1992, “Design of smoke management systems”,ASHRAE.
 39. NFPA, 2006, “NFPA 92A: Standard for Smoke-Control Systems Utilizing Barriers and Pressure Differences”, National Fire Protection Association.
 40. 楊冠雄，1996，建築物防火之煙控設計分析，高雄復文圖書。
 41. James G. Quintiere, 1989, “Scaling Applications in Fire Research”, Fire Safety Journal, vol. 15, 3-29.
 42. John H. Klote, 1994, “Method of Predicting Smoke Movement in Atria With Application to Smoke Management”, NISTIR 5516
 43. Thomas M. Kisko, Richard L. Francis, 1985, “EVACNET+: A computer program to determine optimal building evacuation plans”, Fire Safety Journal.

44. Gunnar Heskestad, 1984, "Engineering relations for fire plumes", Fire Safety Journal.
45. NFPA, 2004, "NFPA 92B Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas", National Fire Protection Association.
46. NFPA, 2008, "Fire protection handbook", National Fire Protection Association, / 20th Edition.
47. 廖志偉, 2008, 通風效應對煙控影響評估之數值模擬, 國立雲林科技大學機械工程所, 碩士論文。
48. Baum H.R., McGrattan K.B. and Rehm R.G., 1997, "Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics", Fire Safety Science-proceedings of the fifth international symposium, pp.511-522.
49. McCaffrey, K.B., 1979, "Purly buoyant diffusion flames-some experimental results", National Bureau of Standards.
50. 李訓谷, 2001, 大空間中庭建築性能式煙控系統設計分析, 國立中山大學機械工程系, 博士論文。
51. Mammoser, J.H., Battaglia, F., 2004, "A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires", Fire Safety Journal, vol. 39, pp.277-296.
52. Suzuki T, S.A., Yamada T, Yanai E, Satoh H, Kurioka H, Kimura Y., 2001, "An experimental study of ejected flames of a high-rise buildings", National Research Institute of Fire and Disaster, pp.363-373.
53. 蔡尤溪等人, 2009, 建築物正負壓區劃性能式煙控設計之研究, 內政部建築研究所, 研究報告。

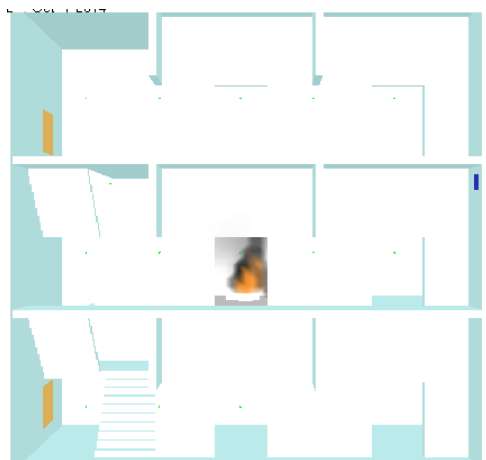
附錄

附表 5.1 未移除構造物之先前案例情境表

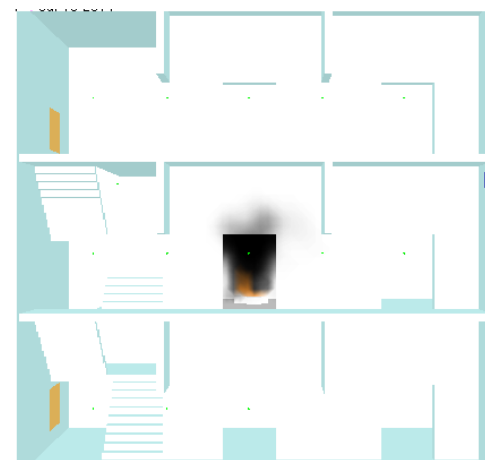
項目 案例	左側風扇 通風口	中央左側門	中央右側門	右側風扇 通風口	防煙策略
Case 1	啟動風扇	開	開	封閉	三明治系統
	封閉	開	開	啟動風扇	
	啟動風扇	開	開	封閉	
Case 2	封閉	開	開	封閉	正壓排煙
	啟動風扇	開	開	開啟通風口	
	封閉	開	開	封閉	
Case 3	封閉	開	開	封閉	富壓排煙
	開啟通風口	開	開	啟動風扇	
	封閉	開	開	封閉	



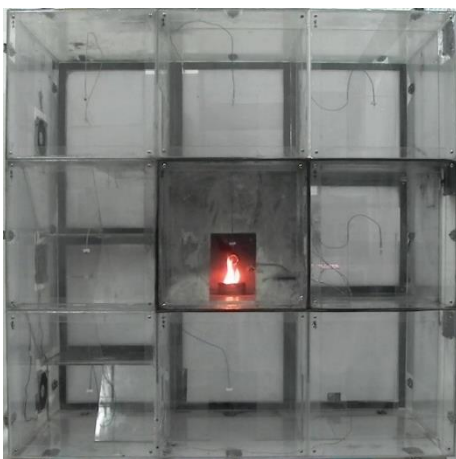
(a1) 實驗 5 秒



(b1) 小尺度 5 秒



(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

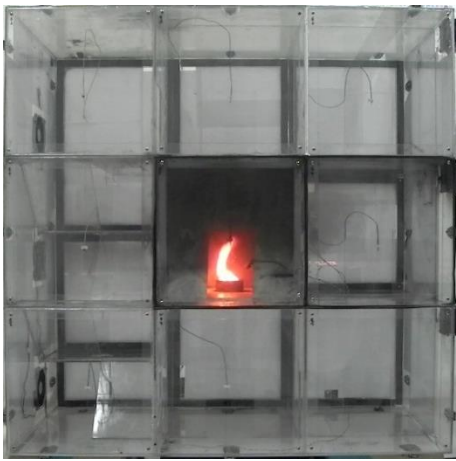


(b2) 小尺度 10 秒



(c2) 全尺度 32 秒

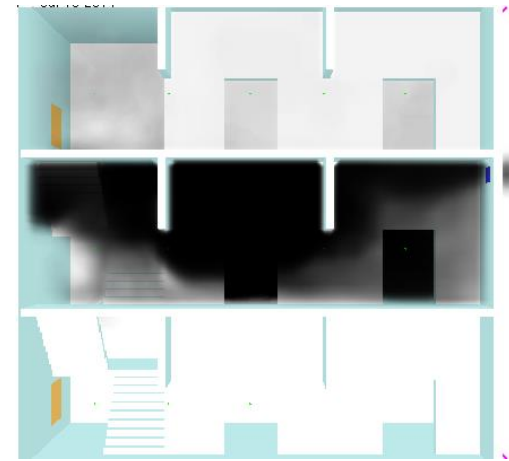
附圖 5.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



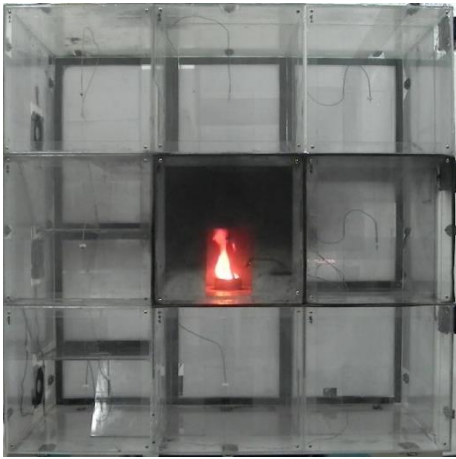
(a3) 實驗 100 秒



(b3) 小尺度 100 秒



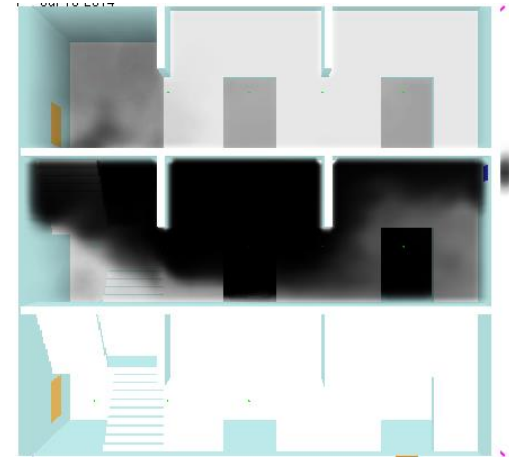
(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

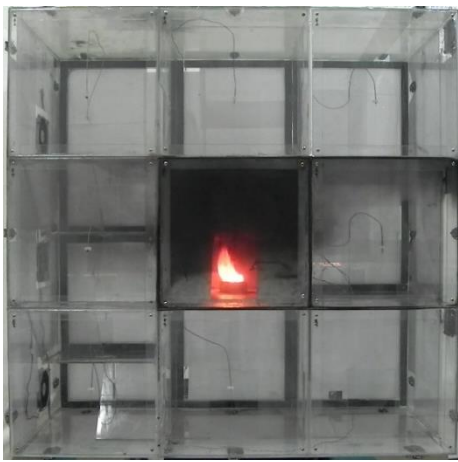


(b4) 小尺度 200 秒

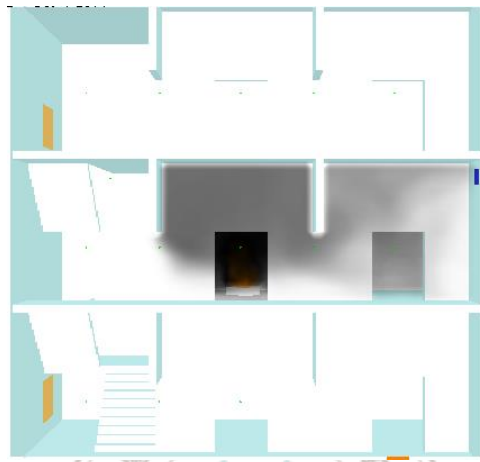


(c4) 全尺度 635 秒

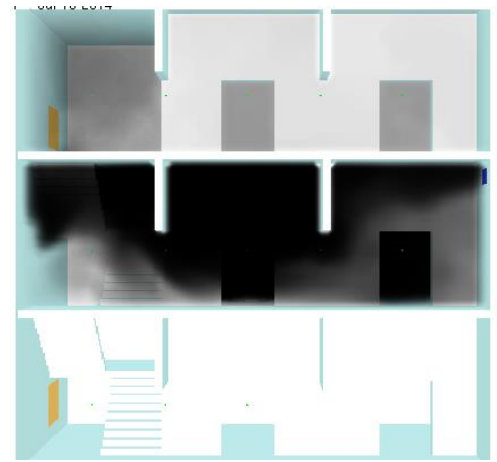
附圖 5.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



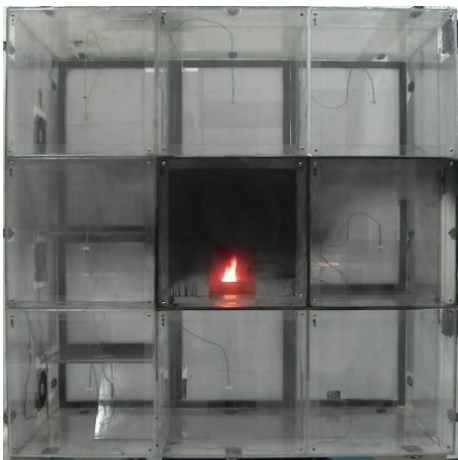
(a5) 實驗 300 秒



(b5) 小尺度 300 秒



(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

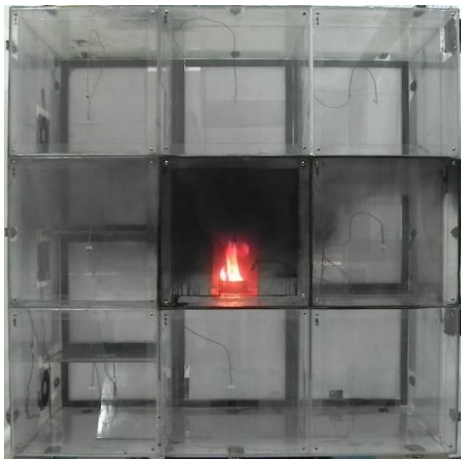


(b6) 小尺度 400 秒



(c6) 全尺度 1265 秒

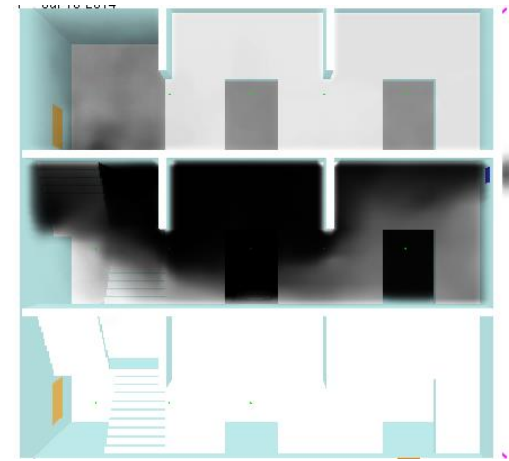
附圖 5.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



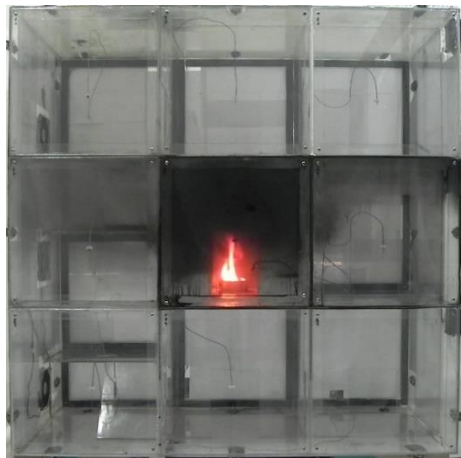
(a7) 實驗 500 秒



(b7) 小尺度 500 秒



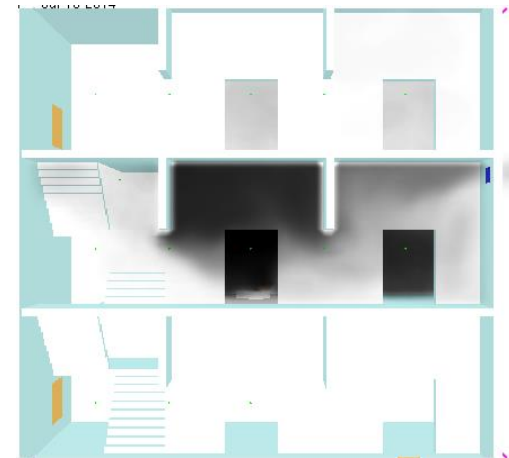
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒

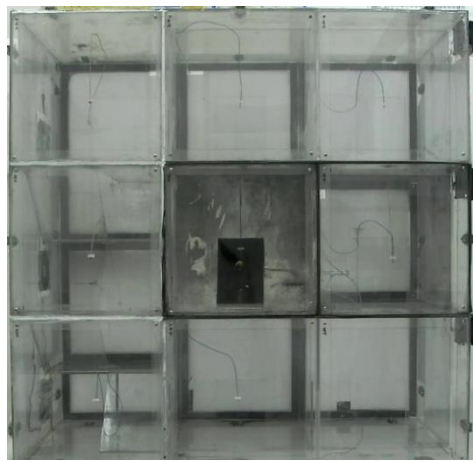


(b8) 小尺度 600 秒

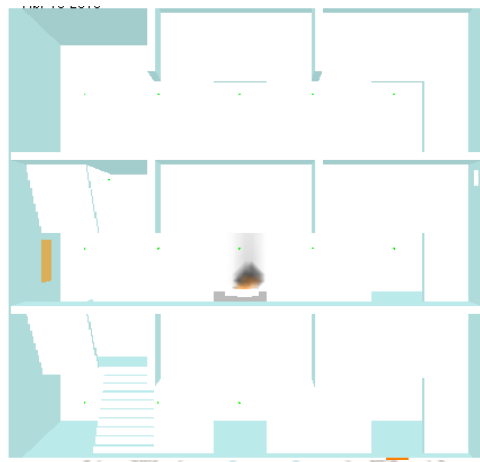


(c8) 全尺度 1900 秒

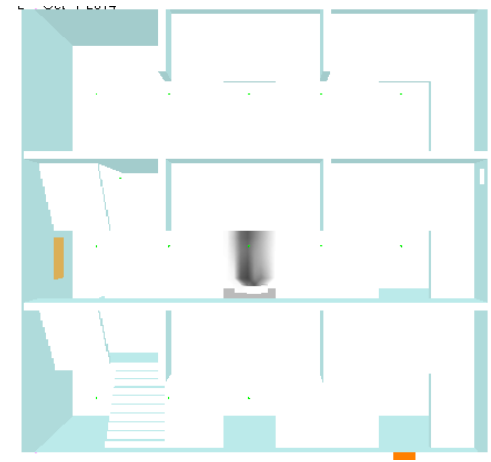
附圖 5.1 Case1 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



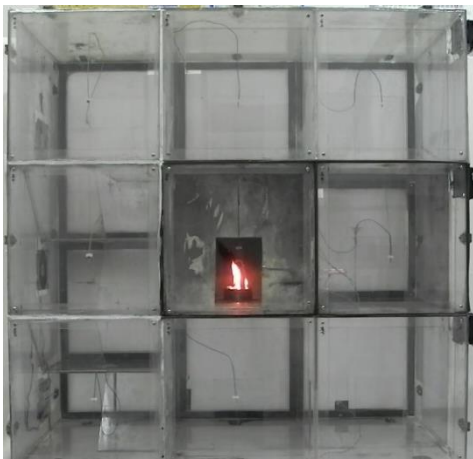
(a1) 實驗 5 秒



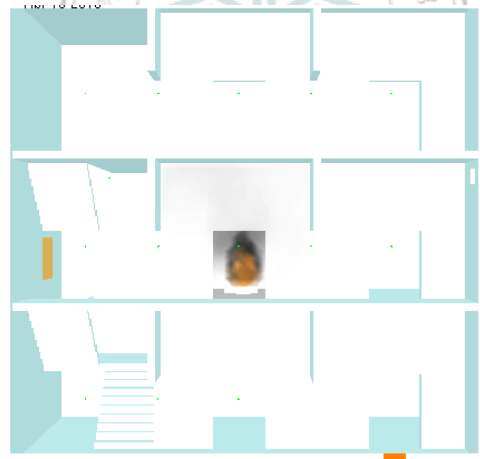
(b1) 小尺度 5 秒



(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

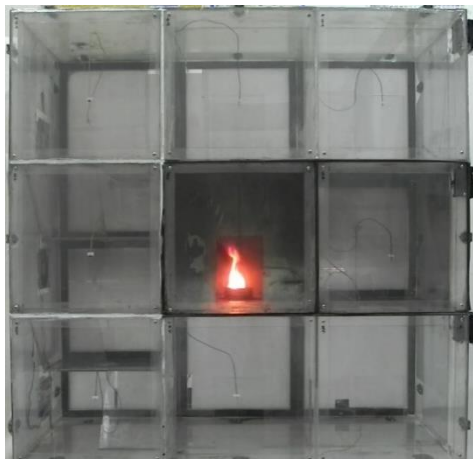


(b2) 小尺度 10 秒

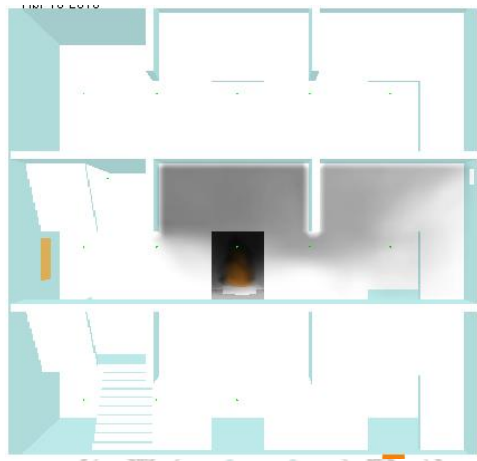


(c2) 全尺度 32 秒

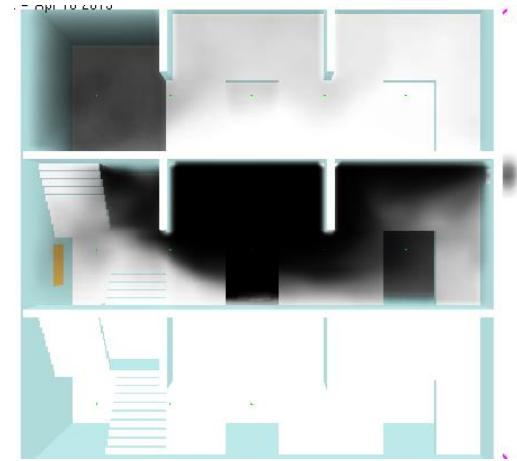
附圖 5.2 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



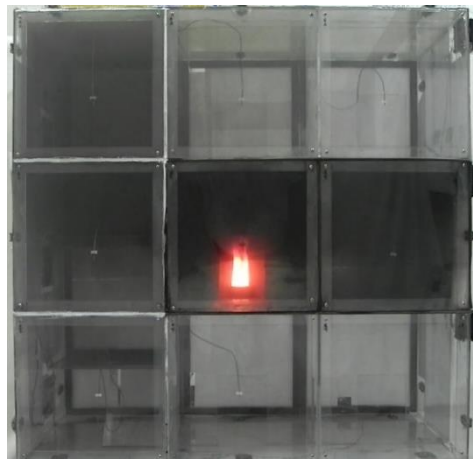
(a3) 實驗 100 秒



(b3) 小尺度 100 秒



(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

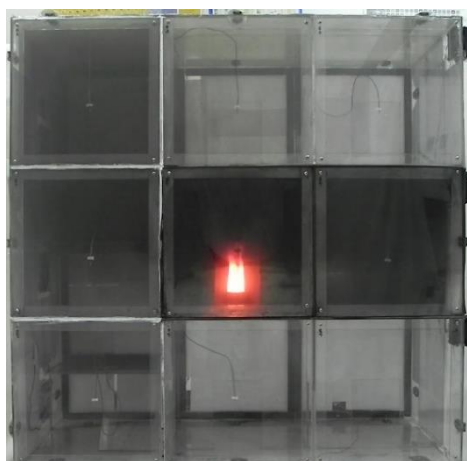


(b4) 小尺度 200 秒



(c4) 全尺度 635 秒

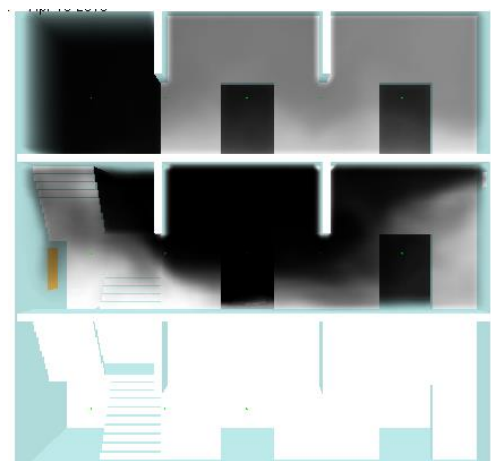
附圖 5.2 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



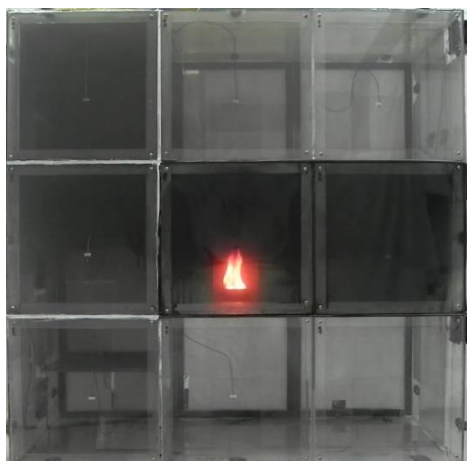
(a5) 實驗 300 秒



(b5) 小尺度 300 秒



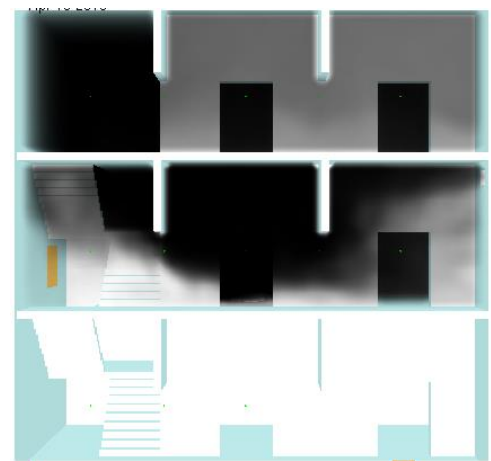
(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

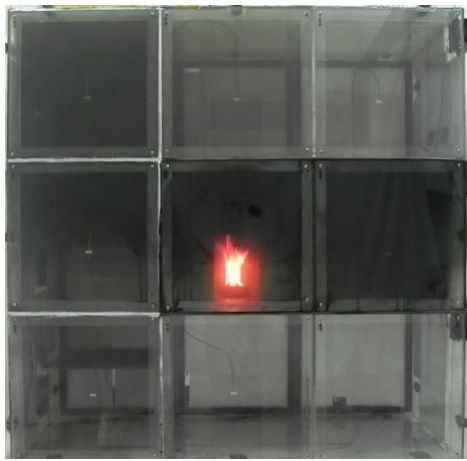


(b6) 小尺度 400 秒



(c6) 全尺度 1265 秒

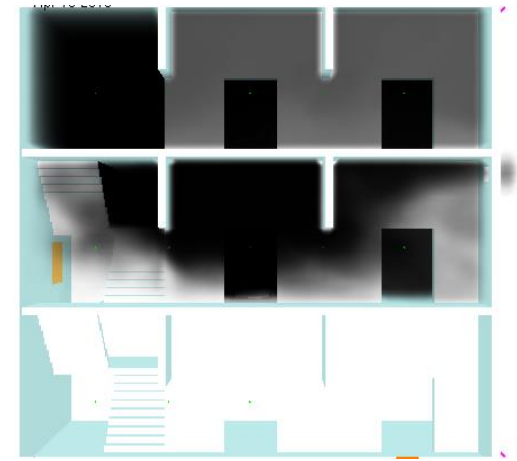
附圖 5.2 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



(a7) 實驗 500 秒



(b7) 小尺度 500 秒



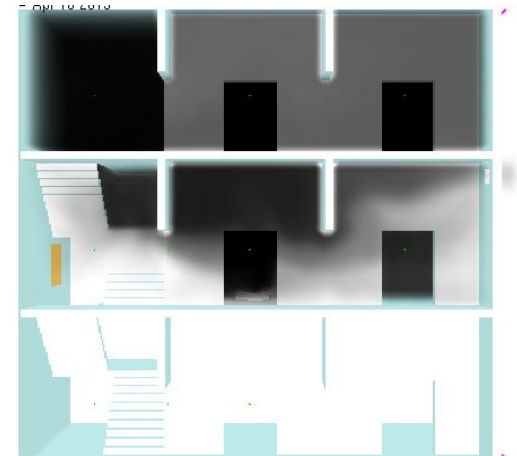
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒



(b8) 小尺度 600 秒

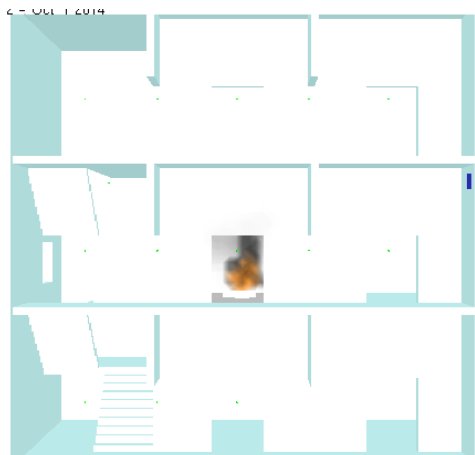


(c8) 全尺度 1900 秒

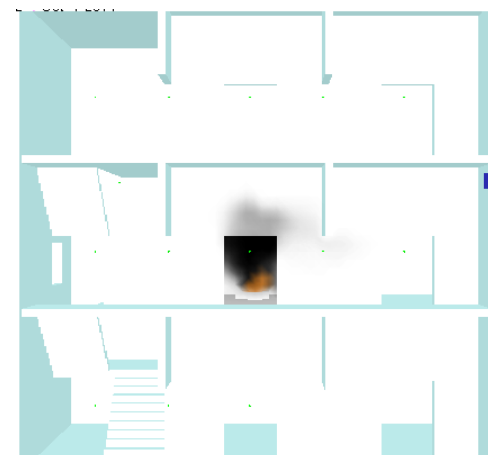
附圖 5.2 Case2 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)



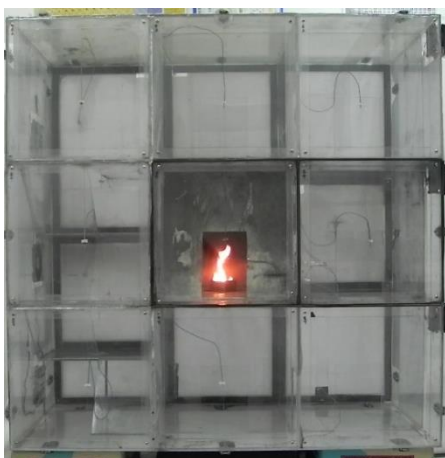
(a1) 實驗 5 秒



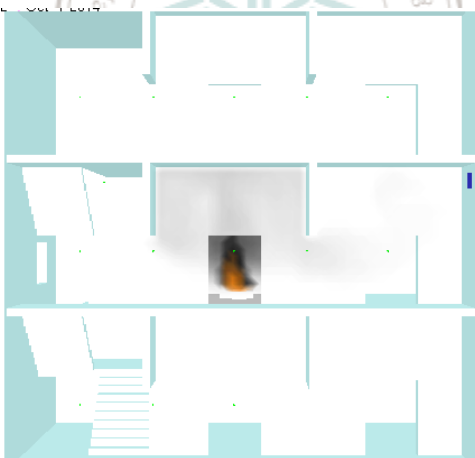
(b1) 小尺度 5 秒



(c1) 全尺度 15 秒



(a2) 實驗 10 秒

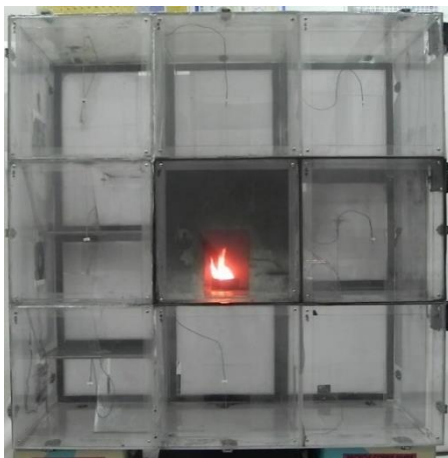


(b2) 小尺度 10 秒

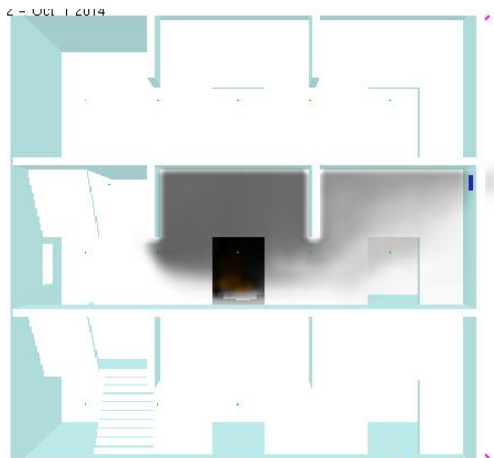


(c2) 全尺度 32 秒

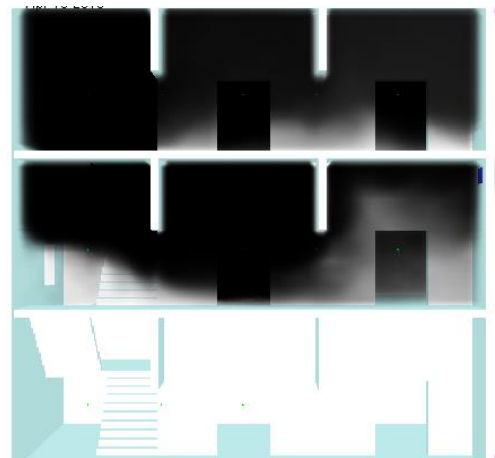
附圖 5.3 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖



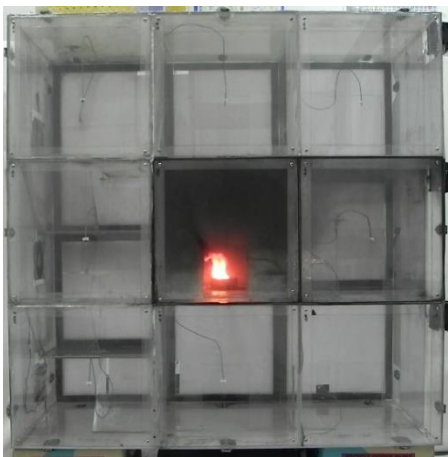
(a3) 實驗 100 秒



(b3) 小尺度 100 秒



(c3) 全尺度 320 秒



(a4) 實驗 200 秒

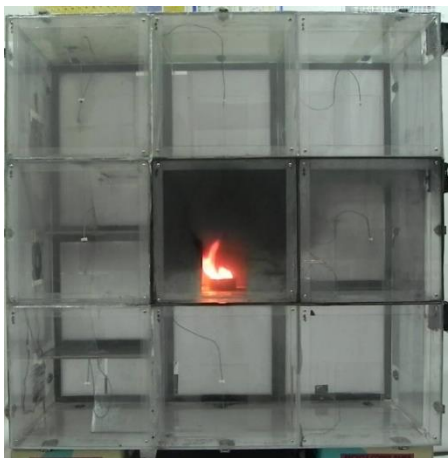


(b4) 小尺度 200 秒



(c4) 全尺度 635 秒

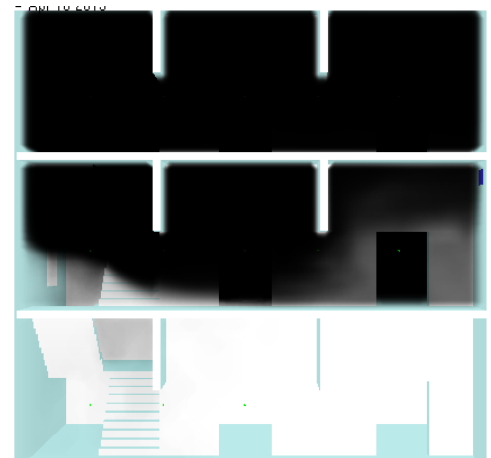
附圖 5.3 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 2)



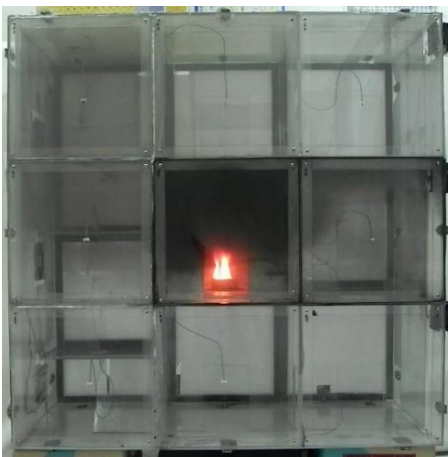
(a5) 實驗 300 秒



(b5) 小尺度 300 秒



(c5) 全尺度 950 秒



(a6) 實驗 400 秒

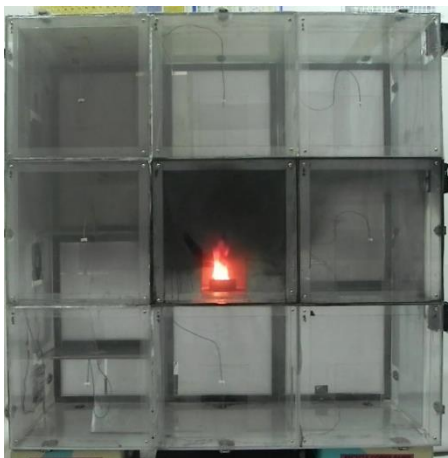


(b6) 小尺度 400 秒

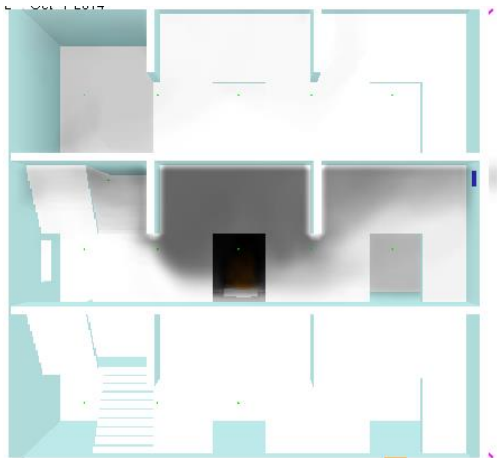


(c6) 全尺度 1265 秒

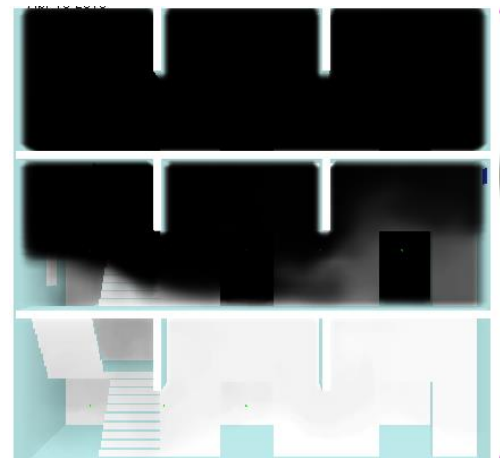
附圖 5.3 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 3)



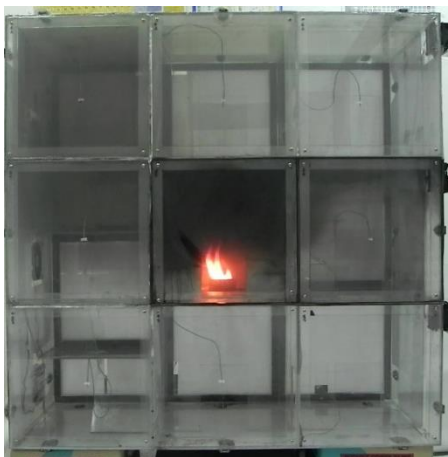
(a7) 實驗 500 秒



(b7) 小尺度 500 秒



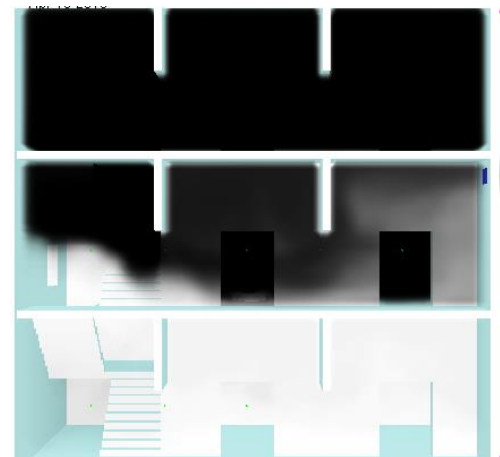
(c7) 全尺度 1585 秒



(a8) 實驗 600 秒



(b8) 小尺度 600 秒



(c8) 全尺度 1900 秒

附圖 5.3 Case3 不同大小模型與實驗之煙霧變化比較圖(續 4)