透天厝火災火場特性數值模擬

林誠興*, 陳德啟, 周國達, 黃志平

元智大學機械工程系

摘　要

早期台灣地區有許多透天厝建築，隨著時代演變，這些建築物設計多半已老舊，消防規劃並不完備，一旦發生火災，常常造成重大人員傷亡及財物損失。因此舊式建築物火災的研究非常重要，以避免或減少類似災害之發生。本研究是以FDS(Fire Dynamics Simulator) 火災模擬軟體，來探討臺灣「桃園龍潭安康新村 3 層樓建築物」之實際火場，並與消防局及媒體提供之資料做比對，重現當時火場情境之驗證模擬。分析原始火場房間之溫度場、CO 濃度的變化，探討相關參數對火災的影響，以期望能提供相關類型建築物之防火構造資訊，並應用這些資訊，來減少類似災害的發生。

關鍵詞：透天厝、火災、數值模擬

*姓名：林誠興　現職：元智大學機械工程系教授　電話：03-4638800-2457　傳真：03-4558013

E-mail：mecslin@saturn.yzu.edu.tw

NUMERICAL SIMULATION OF FIRE DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR A TYPICAL TOWNHOUSE

C.S Lin*, T.C Chen, K.D Chou, J.P Huang

Department of Mechanical Engineering, Yuan Ze University

ABSTRACT

Old-style townhouses were popular in Taiwan during 1960-1980, many of these houses were poorly-designed and did not include enough fire protection equipment so that often caused large casualty and property loss on a fire incident. Hence, It is important to evaluate the townhouse fire protection capability. In this paper, the FDS(Fire Dynamics Simulator) software is utilized to develop a computer model for investigating the fire incident occurred in a townhouse of An-Kang Village, Longtan, Taiwan. The important parameters for the fire field characteristics-such as upper temperature distribution and CO concentration site. The simulation results are in good agreement with the post fire reports. The information calculated might be useful for the future fire safety assessment and fire protection engineering evaluation of the similar buildings.

Keywords: Townhouse, Fire, Numerical Simulation

*姓名：林誠興　現職：元智大學機械工程系教授　電話：03-4638800-2457　傳真：03-4558013

E-mail：mecslin@saturn.yzu.edu.tw

壹、前言

根據內政部消防署民國 88 至 97 年之統計資料，因火災造成死亡及財物損失相當可觀。其造成這些火災發生的主要原因依序如下：電氣設備、人為縱火、煙蒂、爐火烹煮、機器設備、施工不慎、掃墓祭祖及玩火等，當中人為因素所佔比例總和最高。而民國 97 年發生火災總次數為 2879 次，建築物火災為 1879 次，其中以住宅火災 1171 次（約佔總次數 40.67%）為最多，發生原因則以電氣火災 1013 次為最多。回顧民國 92 年蘆洲大火一口氣奪走十三條人命，引起社會對縱火之正視，對於狹小巷弄的救災障礙、騎樓機車停放的問題，剎那間成為社會關注的焦點，投入火災的研究更是刻不容緩。

老舊透天住宅大多是於 65 至 75 年間所興建的建築物，所以此種建築物一般屋齡至少超過 20 年以上，此種老舊建築（社區）於火災防範有以下潛在危險之問題：

一、建築結構多為鋼筋磚牆結構，二樓以上共用一個樓梯及出入門口，使發生火災時人員逃生不易。

二、因興建當時建築法規不完善，消防設備不足，或常有巷弄狹小，騎樓違規使用嚴重，防火逃生觀念不足，造成消防人員不易搶救。

三、建築老舊，輸電設備往往因為使用過多電器或老舊不堪負荷而走火，增加火災發生機率及複雜性。建築物內任意改裝室內裝潢，且多半使用易燃物質（木材或塑膠），造成火災發生之嚴重性。

四、因防盜而加裝鐵窗，使受困火災人員無處可逃。頂樓常有違規加蓋，且多半使用易燃物質，當低層發生火災產生煙囪效應，往往使頂樓傷亡更型嚴重。

綜觀以上特色如圖 1，老舊透天厝之火災防範，比一般新式建築物，可說更為複雜且難以推行，所以，本次研究的動機，即希望藉由火災之發生案例，進而探討如何降低此類型火災之財產損失及傷亡率。

圖 1 透天厝巷弄小不利於搶救(東森新聞、自行拍攝、桃園縣消防局)

電腦科技發達，火災相關模擬軟體亦發展蓬勃，利用電腦（Computer）計算的方式來評估建築物之安全性已成為火災研究經濟、簡便的方法。若能把火災模擬軟體程式應用在建築物火災，經由計算了解精確的高溫火場之煙層流動、溫度變化等等數據，不但可以預測有效安全逃生避難時間，並可作為消防設備設計之參考。近年來 CFD 應用於許多 Townhouse Building 火災的研究，包括(C.S. Lin, S.C. Wang, et al.) [1~5]，對建築物不同牆壁材質和通風之影響及閃燃現象之影響模擬，這些影響火勢的重要因子，往往也是關係著人員是否能順利逃生的關鍵。目前研究火災模式之一的場模式，是將建築物空間分成數十萬至數百萬個格點來分析，對火災物理現象可提供更精確的描述，配合強大的後處理功能，可將火場各種物理現象用 3D 方式呈現，故場模式已逐漸成為研究火災的主要模式[6~8]。

貳、模擬軟體與火場重建簡介

FDS 是 NIST/BFRL(美國國家標準局暨技術協會火災實驗室)所發展出來的場模式火災模擬軟體，此軟體計算流場模式為 LES(Large Eddy Simulation)，其燃燒使用混合分量的燃燒模式，輻射熱傳是以 FVM(Finite Volume Method)方式求得，並可設定多重網格、撒水設備、通風設備等。而 3D 動態顯像功能 Smokeview 軟體，可用來顯示火場之溫度場、火流方向、煙流擴散等參數之動態情境，供火災研究人員分析與探討。FDS 主要以 Navier-Stokes Equations 來計算火災對建築物等空間所造成的流場與熱傳變化，其守恆方程式如下：

(1)質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho\ \mathbf{u} = \dot{m}'''$$

(2)動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\mathbf{u} + \nabla \cdot \rho\mathbf{u}\mathbf{u} + \nabla p = \rho\mathbf{g} + \mathbf{f_b} + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

(3)能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h\mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' \ - \nabla \dot{\mathrm{q}}'' + \varepsilon$$

(4)理想氣體方程式

$$p = \frac{\rho RT}{\overline{W}}$$

符號說明：(依 FDS 手冊整理)

ρ	Density	h	Enthalpy; heat transfer coefficient	$\mathbf{f_b}$	External force vector (excluding gravity)
$\mathbf{u}$ = (u,v,w)	Velocity vector	$\dot{q}'''$	Heat release rate per unit volume	τ_{ij}	Viscous stress tensor
$\dot{m}'''$	Mass flow rate of per unit volume	$\dot{q}''$	Heat flux vector	T	Temperature
p	Pressure	ε	Dissipation rate	$\overline{W}$	Molecular weight of the gas mixture
$\mathbf{g}$	gravity vector, normally (0,0,−g)	R	Universal gas constant		

本文主要應用場模式 FDS 火災模擬軟體來重建「安康新村 3 層樓建築物」火災案例，以消防局及媒體等各項火場資料，用定性和定量的方式做比對，來重建火場。並以溫度場、與濃度場來探討火場當時情境，藉以了解此火場中人員喪生之主要原因，及逃生時間分析。模擬結果可以做為相關火災案例研究的參考，提出建議，並且可針對此案例做進一步的各項防火 Case 的規劃模擬之後續研究，提供分析所得之重要量化數據，以供相關單位參考；惟本研究純為學術探討，不宜作為法律相關訴訟或其他用途。

參、火場案例描述與模擬規劃

一、火場案例描述

本研究選擇的火災案例，發生地點位於桃園縣龍潭鄉安康新村社區內，時間為民國 96 年 7 月 28 日上午 11 時 30 分左右。案例中建築物為一棟老舊 3 層樓透天民宅，根據電視新聞報導[9]如圖 2、圖 3 所示，火勢雖在 30 鐘內就撲滅，但因惡火來得突然，並從 2 樓向上竄燒，迅速漫延整棟房子。根據桃園縣消防局[10]調查，火場範圍 1 至 3 樓，1 樓僅有樓梯口受到輕微的煙燻痕跡並沒有遭到火損，2 樓、3 樓則全毀。3 樓屬於違章建築，採密閉式建築，沒有頂樓平台可逃生，唯一出入口為 2 樓的木造樓梯，2 樓前方臥室起火後濃煙大火延著 2 樓的木造樓梯往 3 樓漫延，3 樓的對外窗戶都以鐵窗封閉未設逃生窗，女屋主因懷孕行動困

難，還要照顧 3 個年幼小孩，導致無法逃生而釀悲劇。

圖2 新聞報導火災狀況(東森新聞)

圖3 消防隊搶救狀況 (東森新聞)

二、火場數值模型規劃

本研究首先根據消防局所提供的火場平面圖，以及自行蒐集的資料，將各房間區域尺寸、內部裝潢擺設，各種物件熱值數據，建立引起火災之主要因子，將火場平面圖劃分為不同編號的房間，再逐一來探討。其內部幾何空間模型，火場建築物模擬之 3D 外觀圖如圖 4 所示。而起火點位於 2 樓前方臥室門口地板下方，火勢經由 2 樓通往 3 樓木製樓梯向上延燒至 3 樓臥房。本研究將規劃模擬房間 6 間，1 樓、2 樓、3 樓模擬配置如圖 4 所示，建材說明如表 1 所示。

表 1 火場建築物主要模擬房間建材說明表(依收集資料自已建立)

樓層	房間編號	房間尺寸寬*長*高(m)	天花板	房間隔間	地板
1 樓	Room 1	3.9*6.8*2.8	WOOD	WOOD	CONCRETE
1 樓	Room 2	2.0*4.3*2.8	WOOD	WOOD	CONCRETE
2 樓	Room 3	2.9*3.3*2.8	WOOD	WOOD	CONCRETE
2 樓	Room 4	2.0*4.1*2.8	WOOD	WOOD	CONCRETE
3 樓	Room 5	3.9*2.4*2.8	WOOD	WOOD	CONCRETE
3 樓	Room 6	2.0*4.1*2.8	WOOD	WOOD	CONCRETE

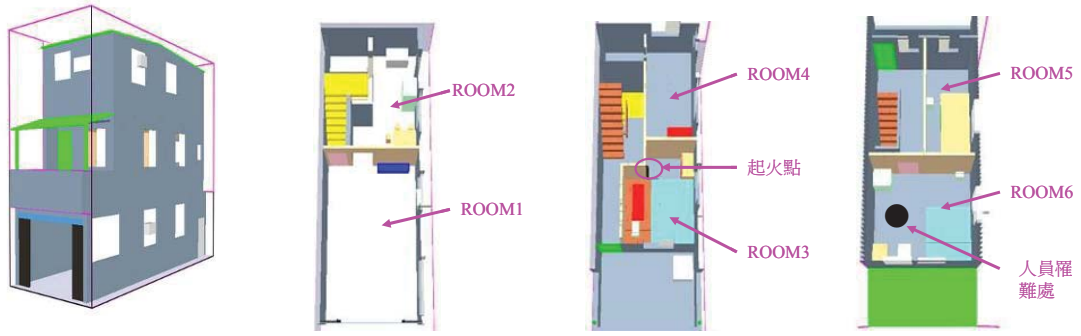


圖 4 火場 3D 建模外觀及 1、2、3 樓建模房間配置(依收集資料用 FDS 建立)

根據消防局火災調查課勘查， 2 樓前方臥室燒得最徹底，門口地板下方有延長電線纏繞被燒的最焦黑，研判就是起火點，故主火源設定為延長電線插座引燃木板，並向上延燒至 2~3 樓。

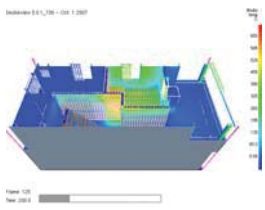
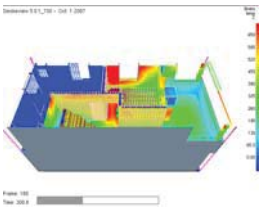
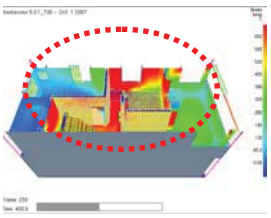
三、火場情境重建

實際的火場是十分的複雜，為了能了解及分析火災發生原因，進而提出有效的建議與對策，因此設法還原當時的火災情境是十分重要的。為能了解當時火災情境，及確保本文所得數據圖形曲線之正確性，應用 FDS 數值模擬並修正參數(反覆修正其邊界條件：易燃物大小、材質、開口、格點…等)，使用火災發生後實際狀況之損害照片及火場鑑識報告等資料，針對火災當時實際狀況做定性定量的驗證比對，探討出近似於當時的火場狀況。

（一）驗證(1)：2樓房間牆壁(Room3)

火災發生時混凝土結構物中，混凝土強度之損失主要取決於混凝土構件受火害溫度之高低。混凝土中含有甚多水泥水化物及其衍生物，當這些物質受火災高溫作用時將發生分解失去結晶水及二氧化碳而損失重量，此等變化可歸納如下：常溫~105℃ 毛隙孔水蒸發，105℃~440℃矽酸鈣水化物結晶水分解，440℃~580℃氫氧化鈣結晶水分解，當火害溫度繼續升高至 580℃，混凝土中之 Ca(OH) 脫水分解，至 600℃以後，混凝土中之微觀結構受到嚴重破壞，因此造成整體破壞[11]。

根據火場照片如圖 5 所示，可以看到房間(Room3)燒到只剩下幾支木頭角柱，天花板及木板牆壁都已經燒成灰燼，牆壁房間有水泥剝落的痕跡。如圖 6~8 Room3 壁面溫度暫態 200、300、400 秒所示，隨著溫度持續上升，在模擬 400 秒時房間(Room3)的牆壁表面溫度已到達 650℃，且由於長時間暴露在高溫中加上老舊房子的水泥牆面因年代久遠關係，產生了水泥剝落現象，模擬結果與真實火場相近似。(註：圖 5 來自桃園縣消防局；圖 6~8 使用 FDS 模擬之結果)。

			
圖 5 Room3 災後牆壁照片	圖 6 Room3 壁面溫度暫態 200 秒	圖 7 Room3 壁面溫度暫態 300 秒	圖 8 Room3 壁面溫度暫態 400 秒

（二）驗證(2)：2樓對外窗戶

位於 2 樓房間(Room3~ Room4)靠近馬路的窗戶如圖 9 所示，房間(Room3)的窗戶已經燒破，鋁門窗框架也已經不見，儲藏室(Room4)的窗戶只剩下一半。在同一玻璃面若內外溫差超過 150℃以上玻璃會爆裂或溫度達到 400℃以上玻璃會被軟化等實驗的數據。模擬結果如圖 10 所示在房間(Room3)的空間溫度達到 400℃以上將近 300 秒，儲藏室(Room4)的空間溫度達到 400℃以上將近 150 秒。如圖 11~12 溫度截面變化圖是有足夠的熱量導致房間(Room3)和儲藏室(Room4)的玻璃產生爆裂或軟化，模擬結果與火場照片比對確實如此。(註：圖 9 來自桃園縣消防局；圖 10~12 使用 FDS 模擬之結果)。

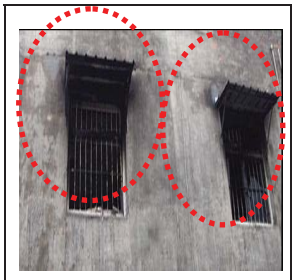
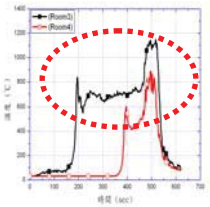
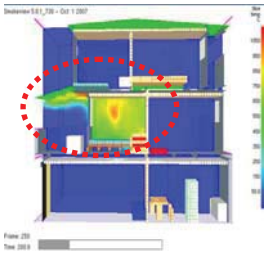
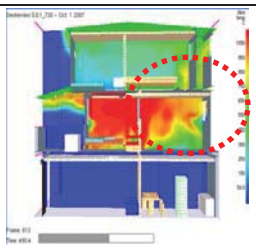
			

圖 9 Room3、Room4 對外窗戶	圖 10 Room3、Room4 空間溫度	圖 11 Room3 暫態 200 秒截面溫度	圖 12 Room4 暫態 430 秒截面溫度

肆、結果與討論

本章節主要在探討此建築物在火災發生時之狀況，探討火勢延燒、濃煙擴散、各房間溫度場、濃度場變化，目的為還原火災時燃燒的情形，茲分別說明如下：

一、原始火場(Base Case)之火勢與濃煙

圖 13~14 分別表示火場在暫態 100 秒、180/200 秒、400 秒、600 秒時火勢濃煙擴散情形。起火位置為 2 樓 Room3 門口後方，由圖 13~14 可發現在前 100 秒時火勢及濃煙並未擴散，模擬至 300 秒後，火勢迅速燃燒，並向左右竄燒到 Room4。而至 400 秒後，2 樓幾乎已完全被波及並沿著天花板向上漫延到 3 樓，通往 3 樓的樓梯為木製樓梯，更加速火勢的延燒，此時火勢濃煙逐漸擴大到 3 樓之 Room5、Room6，直至模擬結束仍未有熄滅消退跡象。而起火點因在 2 樓，從模擬的暫態圖來看，因熱流的物理現象，大火及濃煙直接從 2 樓樓梯往上竄燒，所以 1 樓並未被波及，因此溫度和 CO 未有明顯的變化，故 Room1 和 Room2 是

屬於較安全的區域。(註：圖 13、14 使用 FDS 模擬之結果)。

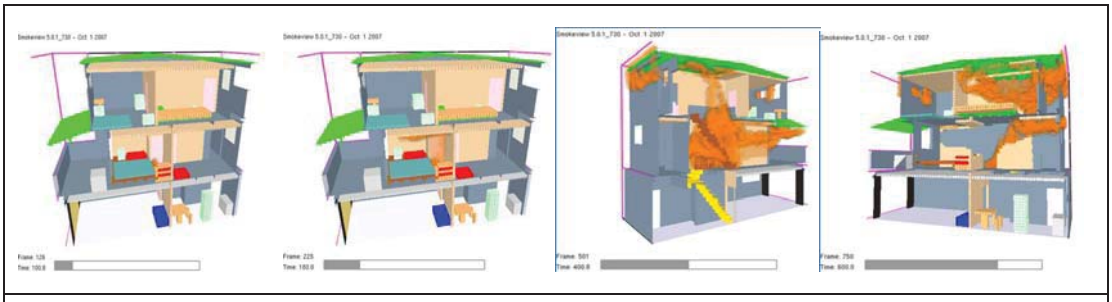


圖 13 火勢分佈暫態 100 秒、180 秒、400 秒、600 秒

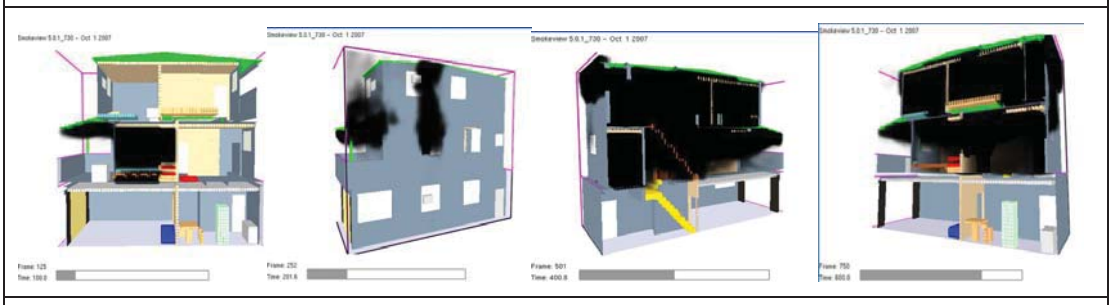


圖 14 濃煙分佈暫態 100 秒、200 秒、400 秒、600 秒

二、原始火場上層溫度探討

圖 15~17 為 Room1~6 上層溫度曲線圖。1 樓主要的房間為客廳(Room1)及廚房(Room2)。因起火位置為 2 樓 Room3 門口後方，火勢向上竄燒，並未波及 1 樓，所以於 620 秒模擬結束後房間(Room1)及廚房(Room2)上層溫度始終沒有太大的變化，上層溫度維持在水平線高度與當時的天氣溫度相近約 30℃，整個 1 樓空間溫度並不足以引燃室內的易燃物，所以 1 樓並沒有遭受到火損，只有在 1 樓樓梯口有少許的煙燻痕跡。

火災發生後，因 Room3 在起火源的隔壁，加上使用木板隔間，燃燒迅速，初期發熱、發煙量均高，溫度持續上升，在 184 秒時上層溫度超過 608℃以上，出現閃燃點後持續燃燒，上層溫度維持在 800℃將近有 250 秒的時間。而同在 2 樓的 Room4，受到火勢延燒，在 386 秒上層溫度到達 617℃，然後天花板開始著火，此時 2 樓已陷入火海中。隨著高溫火燄順著 2 樓樓梯往上竄入 3 樓的 Room5~6，Room5 到 470 秒上層溫度已到達 451℃，房間內玻璃窗開始軟化破裂，溫度持續升高。因為 3 樓只有單一出口且房間窗戶及後陽台都加裝鐵窗，當火勢從 2 樓後方樓梯延燒上來後，根本沒有地方可以逃生只能躲在房間內等待救，在模擬到 350 秒(Room6)上層溫度到達 614℃，等不及消防隊到達就已經活活被燒死在房間內，共造成 3 名小孩及 1 名懷孕的女屋主罹難。(註：圖 15~17 使用

FDS 模擬之結果)。

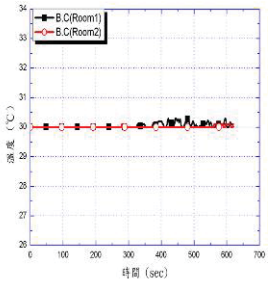


圖 15　Room1~2 上層溫度曲線圖

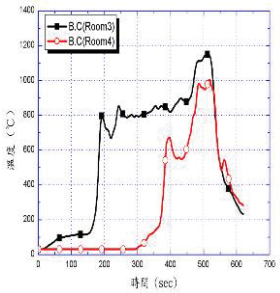


圖 16　Room3~4 上層溫度曲線圖

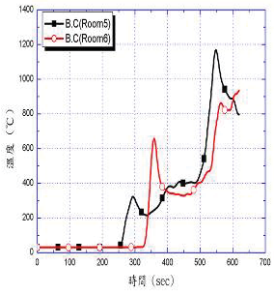


圖 17　Room5~6 上層溫度曲線圖

三、原始火場一氧化碳濃度探討

如圖 18 及 19 為 Room1~6 CO 濃度曲線圖，1 樓客廳(Room1)及廚房(Room2)並未受到濃煙的波及，所以並幾乎沒有偵測到 CO 濃度值。2 樓房間(Room3)為起火房間，主火源在 150 秒後開始引燃木板門，CO 濃度開始上升，火源附近易燃物受熱一段時間後開始路路續續被引燃，火勢逐漸增大，發煙量持續升高，燃燒所產生濃煙釋放出之 CO 濃度上升梯度呈非線性倍數成長，並於 185 秒達到 1170ppm，由於房內易燃物不斷燃燒，CO 一直維持高濃度狀態，在 200 秒到 500 秒中維持在 2500~3000ppm 間振盪。房間(Room4)的木板牆未被大火燒破之前，CO 濃度僅隨著房間(Room3)門縫竄出之少量濃煙而些微增加，於 352 秒前 CO 濃度僅達 10ppm，隨著大火將木板牆燒破後， CO 大量隨著濃煙湧入房間(Room4)，此時 CO 濃度在短時間內快速上升，之後高溫濃煙仍持續不斷的大量竄出，因此在 479 秒時便迅速的達到該區域空間的最高濃度 2885ppm。

3 樓房間(Room5)在 350 秒時 CO 濃度已經來到 979ppm，隨著大火將木板牆燒破，蓄積在樓梯間充滿的高溫濃煙便瞬間開始大量竄入房間(Room5)內，在 360 秒此時房間(Room5)內的 CO 濃度已陡升到 1502ppm，大火持續燃燒高溫濃煙不斷從窗戶排出，在 450~550 秒 CO 濃度持續振盪平均約 2500ppm，之後火勢慢慢緩和，模擬到消防隊 620 秒抵達後 CO 濃度已經下降到 2132ppm。

3 樓房間(Room6)為受困者罹難的房間，等到大火將房間(Room3)木板牆燒破後，大量的濃煙開始延著 2 樓樓梯開口往上竄，此時 CO 濃度開始上升，當女主人求生時打開房門，CO 濃度開始湧入房間(Room6)，但發現 3 樓走廊已經佈滿濃煙，2 樓梯口溫度高無法往下逃生，只好又跑回房間(Room6)與 3 名小孩一起等待

救援。但大火很快就燒上來火燄沿著天花板開始延燒，不到 1 分鍾的時間就將房間(Room6)的木板牆燒破，此時 CO 濃度開始大量湧入房間(Room6)，在 430 秒 CO 濃度已經升到 1095 ppm。人在含量達 1000ppm 以上時會有意識模糊、呼吸困難、昏迷及痙攣的現象，所以當時女主人與 3 名小孩可能已經昏迷，隨後房間(Room6)被大火吞噬，在 508 秒 CO 濃度已經升到 3023ppm，之後將近 100 秒的時間都平均保持在 3000ppm 左右，模擬到消防隊 620 秒抵達後 CO 濃度仍有 2949ppm。(註：圖 18、19 使用 FDS 模擬之結果)。

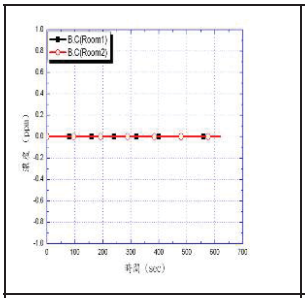


圖 18 Room1~2
CO 濃度曲線圖

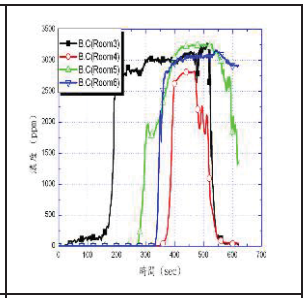


圖 19 Room3~6
CO 濃度曲線圖

伍、結論

探討本透天民宅火災傷亡的原因，依消防局提供資料、實際火場觀察、媒體報導及模擬結果，可歸納為下列幾點：

一、房屋電線老舊劣化，引起異常過熱或電線短路而引燃周圍的易燃物。加上房間為木板隔間，衣物、雜物過多，火載量極高，造成火災燃燒迅速。

二、2 到 3 樓為木製樓梯，加快火勢延燒的速度，且起火源靠近 2 樓樓梯口阻礙了罹難者的唯一逃生出口。

三、對外窗戶均裝設封閉式鐵窗，3 樓為加蓋鐵皮屋無逃生門，造成罹難者均無法逃生。

四、罹難者為懷孕 8 個月的孕婦以及三名年幼的小孩，行動能力較差。加上社區巷弄狹小且違規停車者眾多，阻礙了消防車進入灌救的時機且消防栓搶救水源嚴重不足，導致救援的時間拉長。

本研究主要應用數值模擬方法，來探討建築物火場情境重建，並針對原始火場予以定性描述和量化討論。由模擬結果可看出火災發生 200 秒後，因使用木板隔間，衣物及雜物多，使得火勢燃燒迅速、濃煙密佈，並快速向上漫延到 3 樓。加上建築物為單一樓梯及鐵窗阻礙，因此人員可容許逃生時間有限，導致於 3 樓

Room6 的人員因逃生無門而不幸喪生。總之，火災造成的損失相當可觀，因此必須能夠建立消防觀念與設施，如老舊電線定期檢查或更新、避免堆放大量可燃物、鐵窗勿使用封閉式、住宅應準備家庭用滅火器等，才能提早發現火災或預防火災，避免此類似悲劇的再度發生。

陸、參考文獻

1. S.C. Wang, C.S. Lin, 2008, “Suppression Capability Investigation for a Water Mist System in a Basement Building Fire.” *International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science*, pp. 851-858.
2. Z. Zhai, Q.Y. Chen, 2004, “Numerical determination and treatment of convective heat transfer coefficient in the coupled building energy and CFD simulation”, *Building and Environment*, pp.1001-1009.
3. S.C. Wang, C.S. Lin, C.C. Yu, 2008, “Dynamic Simulation of Back draft Phenomena in a Townhouse Building Fire.” *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 37(3),pp. 153-164.
4. C.S. Lin, et al., 2006, “Ventilation Effect on Fire Smoke Transport in a Townhouse Building.” *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 35 (6), pp.387-401.
5. N.B. Kaye, G.R. Hunt, 2007, “Smoke filling time for a room due to a small fire: The effect of ceiling height to floor width aspect ratio.” *Fire Sciences Journal* Vol.42,pp.329-339.
6. R.C. Dubes, A.K. Jain, 1989, “Random Field Models in Image analysis.” *J. Applied Statistics*, Vol.16, No.2,pp.131-164.
7. N.L. Ryder, et al., 2004, “Consequence modeling using the fire dynamics simulator.” J*ournal of Hazardous Materials*, pp.149-154.
8. T.S. Shena, Y.H. Huangb, S.W. Chiena, 2008, “Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene.” *Building and Environment 43*, pp.1036–1045.
9. 新聞媒體，2007。ET-Today。
10. 桃園縣消防局第四大隊龍潭分隊，2007，《住宅火災搶救報告書》。
11. 朱煌林，2005，《探討混擬土之耐火性評估(中) 》。臺灣省土木技師公會。